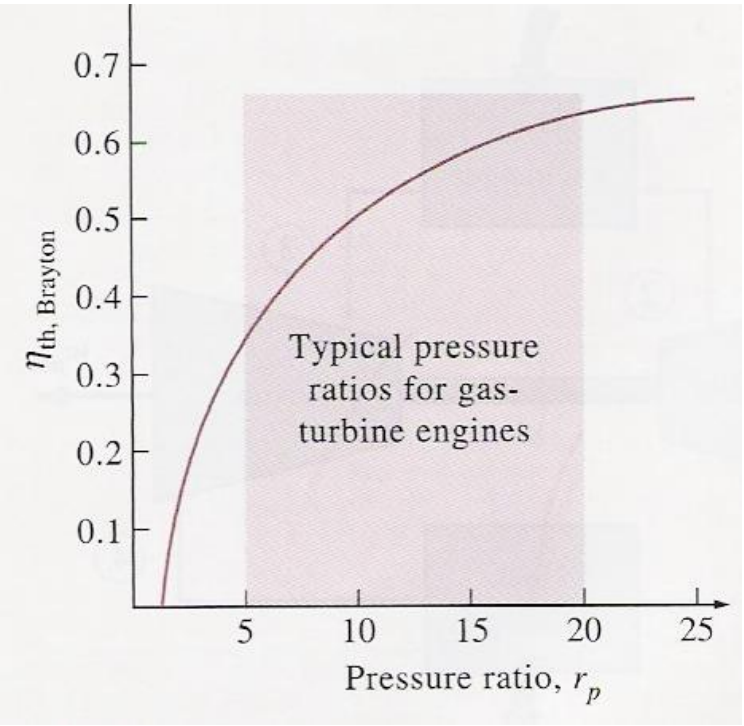
التوربين الغازي – ضاغط الهواء Gas Turbine - Air Compressor

الغرض الرئيسي من الضاغط Main purpose of a compressor

يقع الضاغط في المقدمة خلف مدخل الهواء . تتكون من مروحة دوارة (على شكل مغزل) Spinning fan مع عدد من الريش الثابتة Fixed blades مرتبة في عدة صفوف . يتم سحب الهواء إلى المحرك من محيطه بإستخدام مراوح الضاغط التي تُدار من التوربين عن طريق عمود (محور) Shaft . يتم تسخين هذا الهواء عن طريق ضغطه ويُقاد إلى واحدة من العديد من غرف الاحتراق Combustion chambers . يمكن أن يصل الضاغط إلى ضغوط مثالية تصل إلى ٤٠ مرة أعلى من الضغط الجوي Atmospheric pressure ، وأن كفاءة التوربين الغازي Gas turbine efficiency ستزداد كلما زادت نسبة الإنضغاط Pressure ratio

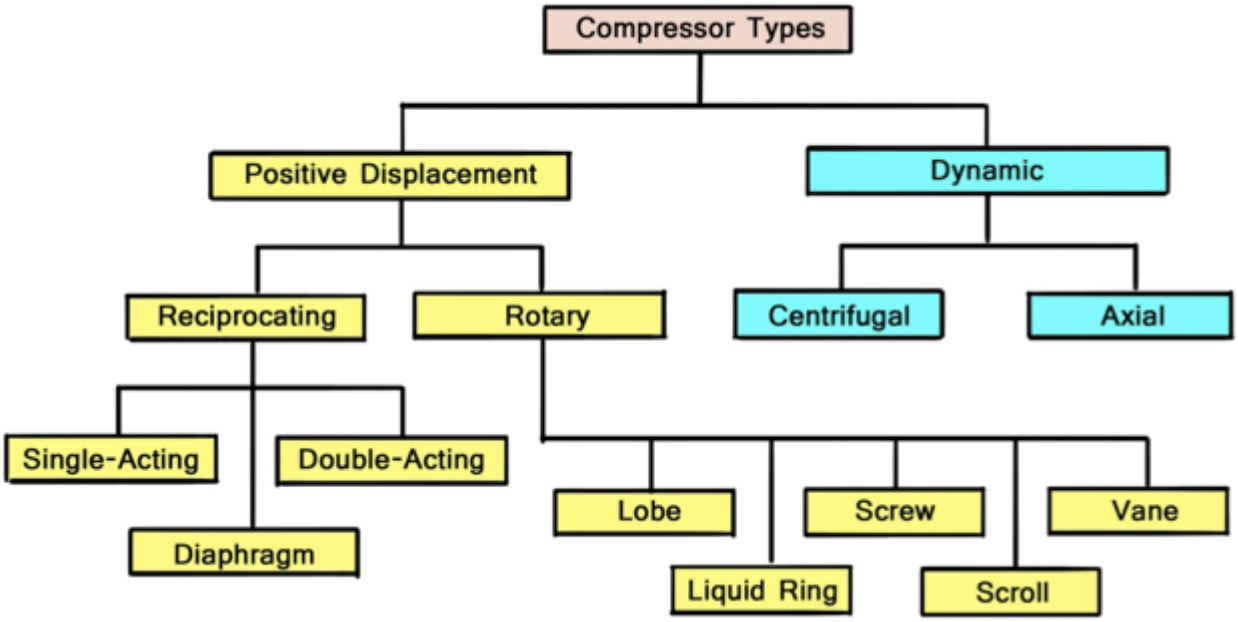


الشكل (٣٨) نسبة الإنضغاط مقابل كفاءة التوربين الغازي

الأنواع الرئيسية للضواغط المستخدمة في محركات التوربينات الغازية
Main types of compressors used in gas turbine engines

بصورة عامة تُصنف الضواغط في مجموعتين رئيسيتين :
١- ضواغط الإزاحة الإيجابية Positive displacement compressors (التي يتم فيها زيادة ضغط الهواء عن طريق تقليص حجمه) .
٢- الضواغط الديناميكية (الحركية) Dynamic compressors (التي يتم فيها زيادة ضغط الهواء بزيادة سرعته) .

والشكل التالي يلخص تصنيف الضاغطات :

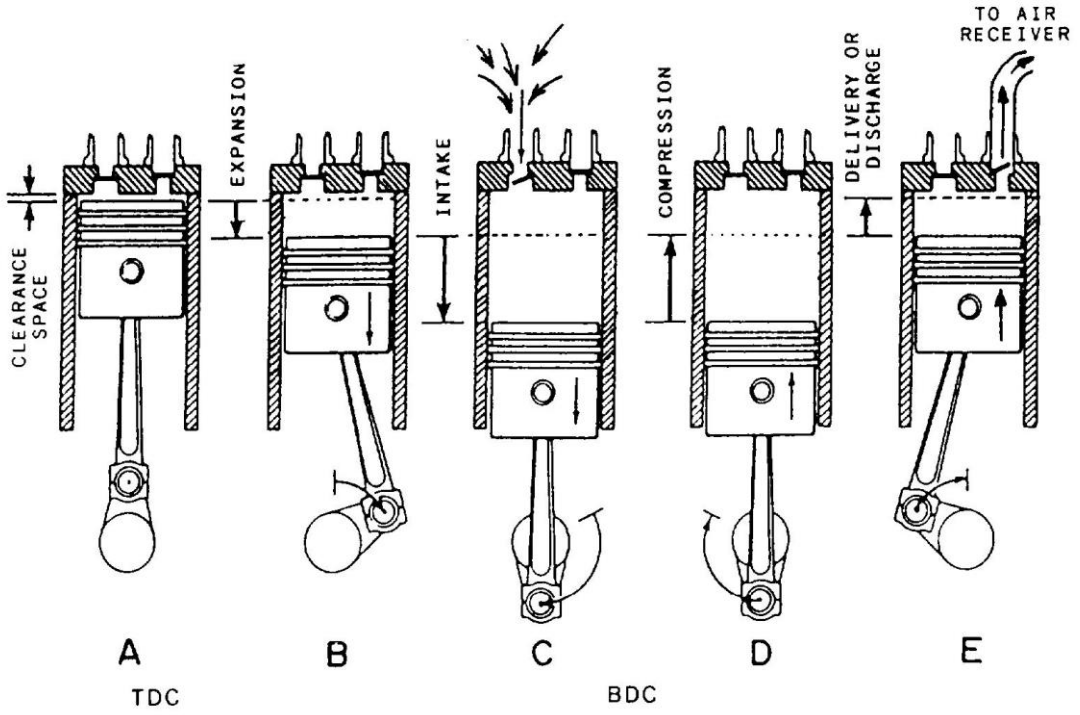


الشكل (٣٩) تصنيف الضواغط

معظم الضواغط الشائعة االإستخدام في التوربين الغازي هي :
١- ضاغط الطرد المركزي Centrifugal Compressor .
٢ - الضاغط المحوري Axial Compressor .
لاحظ أن كلاهما من النوع الديناميكي .

لا تستخدم الضواغط الترددية في التوربين الغازي بسبب :
أ - لها مستوى إهتزاز أعلى بسبب النبضة أو الضربة Pulsation (بسبب التغيير الحاصل في الحركات من الدورانية إلى الترددية Reciprocal motion إلى الدورانية Rotary motion) .
ب - تنتج ضغطا مرتفعا جدا .
ج - مع زيادة حجم التوربين الغازي ، يجب زيادة حجم الضاغط الترددي وسيتطلب قدرة أكبر بسبب أجزائه الثقيلة .
د - إنها توفر أو تجهز تدفق هواء قليل مقارنة بضواغط الطرد المركزي أو المحوري Centrifugal or Axial compressors .
هـ - تشتمل على الكثير من الأجزاء المتحركة Moving parts (المكابس pistons ، أذرع الربط أو التوصيل Connecting arms ، عمود المرفق أو الكرنك Crank shaft ، صمامات السحب والتفريغ (التصريف) Intake & Discharge valves) .

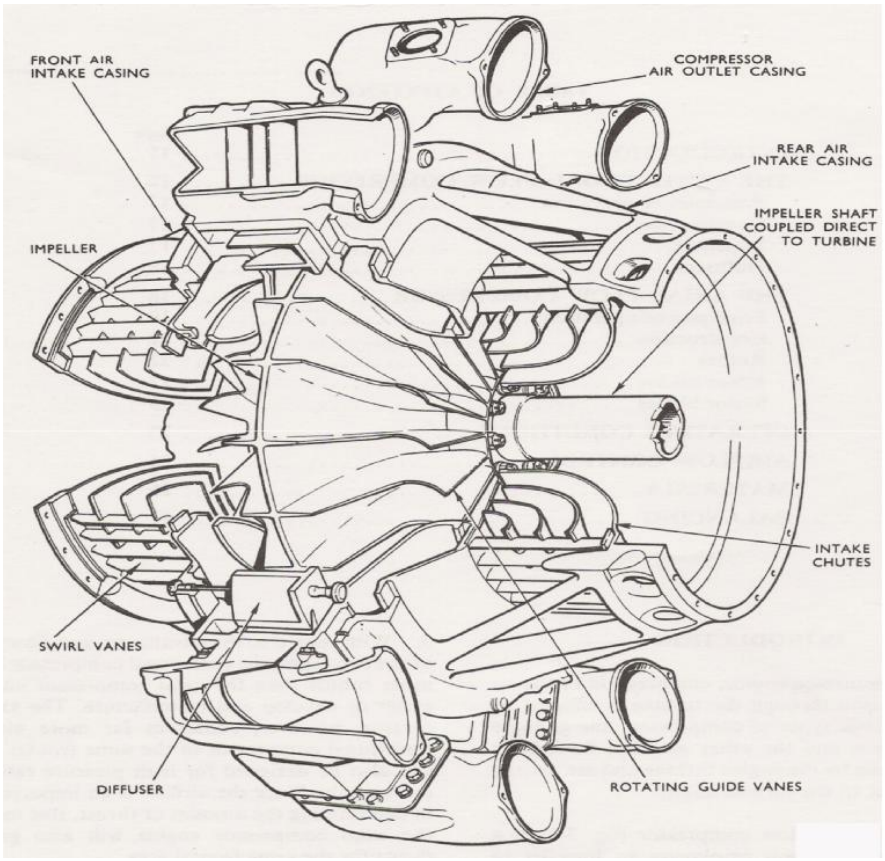
و- غير فعال نسبيا Relatively inefficient (٢٠ ٪ - ٤٥ ٪) .
ز – إستهلاك عالي للقدرة High power consumption .
ح - متطلبات صيانتها عالية لأحتوائها على أجزاء متحركة أكثر مقارنة بأنواع الضواغط الأخرى .
ي - جيد لتطبيقات هواء الخدمة Service air .



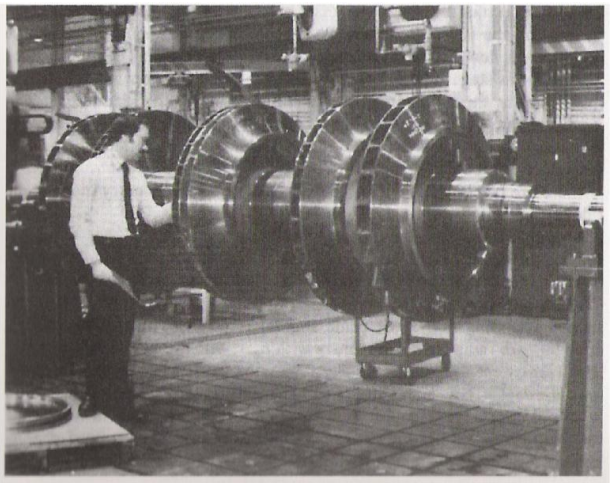
الشكل (٤٠) ضاغط ترددي Reciprocating Compressor

ضاغط الطرد المركزي Centrifugal Compressor

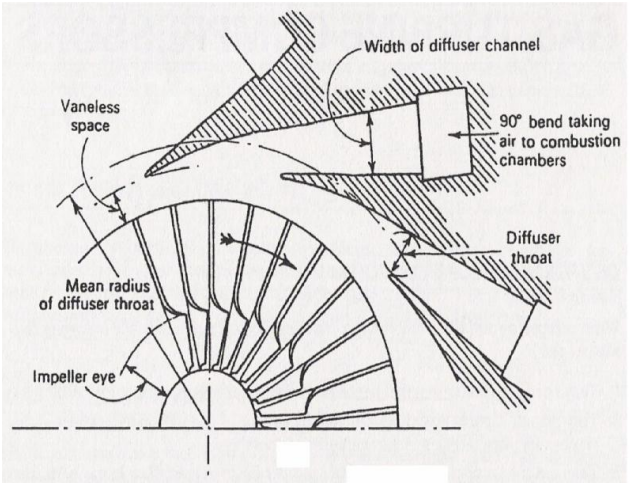
ضاغط الطرد المركزي هو عبارة عن ضاغط ديناميكي ، فهو يزيد من ضغط الهواء عن طريق تسريعه (تعجيله) ، يدخل الهواء إلى ضاغط الطرد المركزي في وسط الدافعات الدوارة للضاغط (الدافعات المروحية Impellers) ويخرج عن طريق قوة الطرد المركزي إلى تصريف الضاغط Compressor discharge الذي يقع في قوس غلاف الضاغط (إتجاه تصريف تدفق الهواء يكون عمودي على محور الدوران) . يتم الحصول على تسريع Acceleration للهواء من خلال عمل واحد أو أكثر من الدافعات الدوارة ؛ هواء التصريف أو التفريغ يكون خالي من النبضات Pulsation .



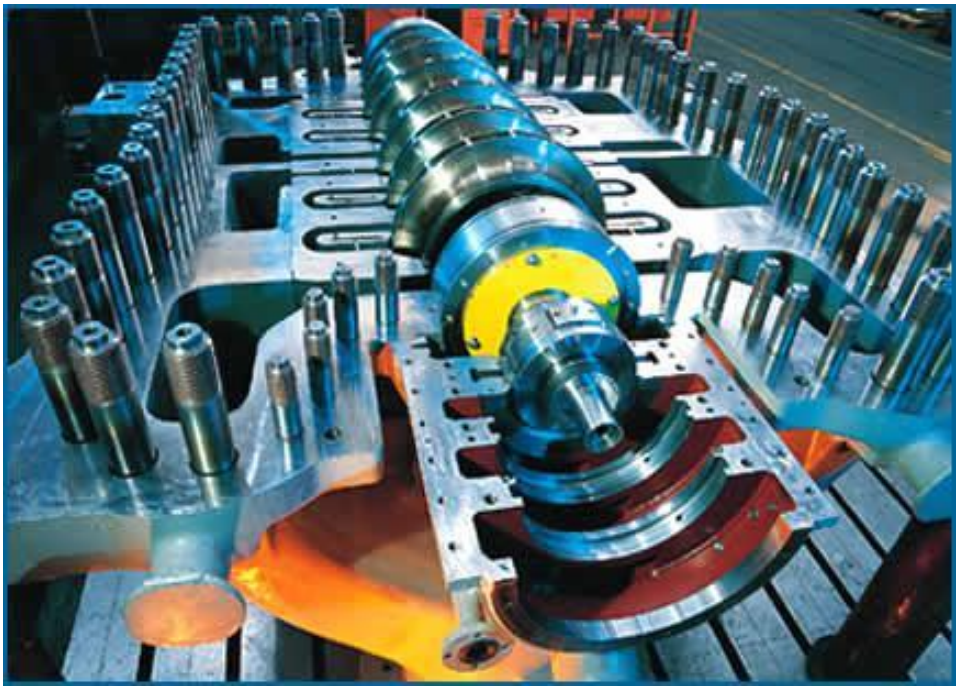
الشكل (٤١) ضاغط الطرد المركزي Centrifugal Compressor



الشكل (٤٢) ضاغط الطرد المركزي متعدد المراحل
Multistage Centrifugal Compressor



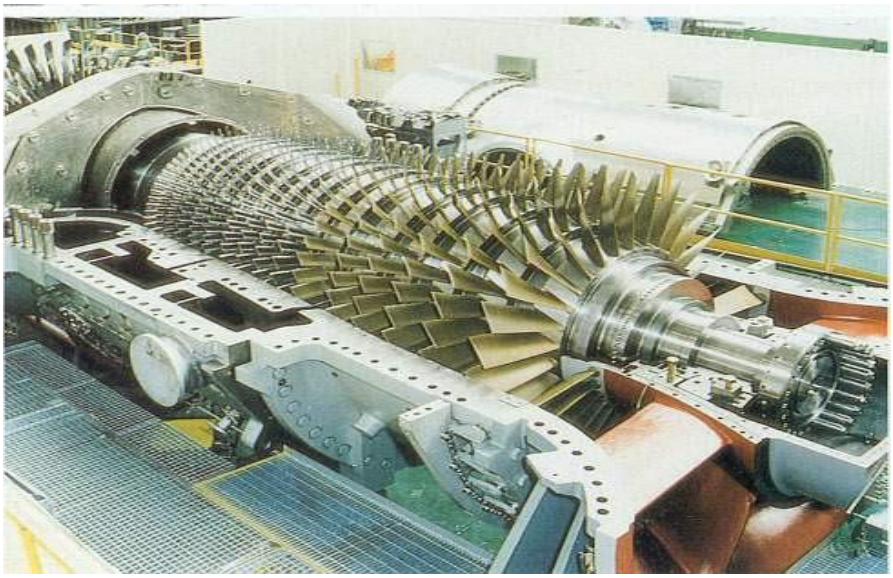
الشكل (٤٣) ناشرة ضاغط الطرد المركزي
Centrifugal Compressor Diffuser



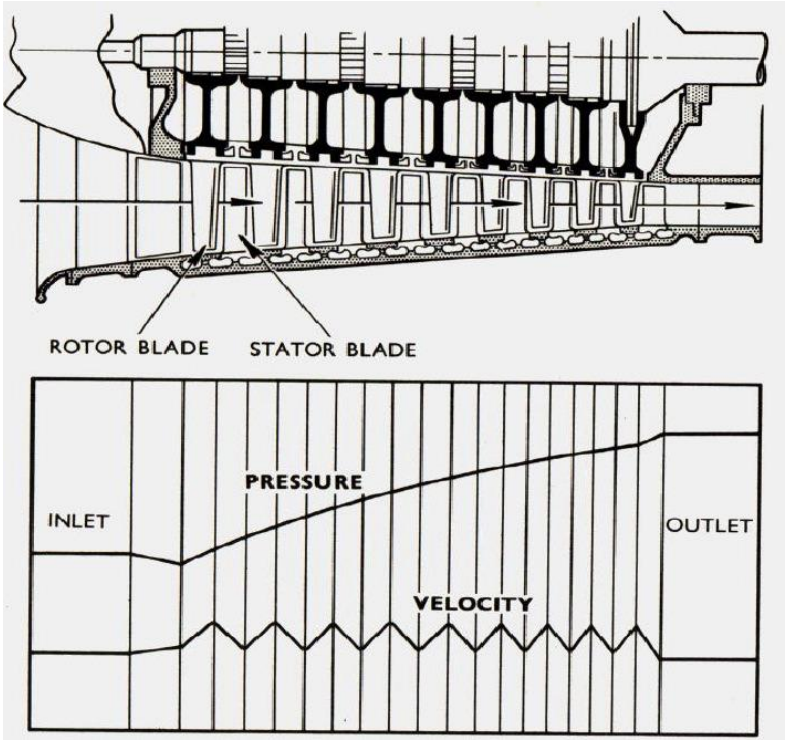
الشكل (٤٤) ضاغط الطرد المركزي متعدد المراحل

الضاغط المحوري Axial compressor

جميع توربينات الغاز الحديثة عالية الإنتاج تستخدم ضواغط التدفق المحوري ، ومبادئ التشغيل موضحة في الشكل (٤٦) . يدخل الهواء إلى اليسار ويتم تسريعه بواسطة مجموعة من الريش الدوارة Rotary blades . يترك الهواء المجموعة الأولى من الريش الدوارة ويدخل مجموعة من االريش الثابتة Stationary blades، حيث يتباطأ الهواء وتتحول طاقته الحركية Kinetic energy إلى طاقة ضغط Pressure energy . تتكرر هذه العملية من خلال الكثير من المراحل التي تعتمد على الضغط النهائي المطلوب . (يكون إتجاه التدفق موازيا لإتجاه الدوران) .

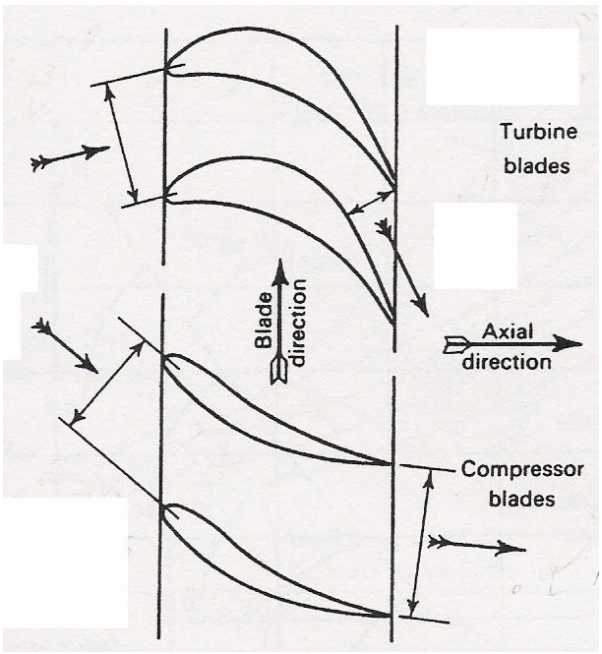


الشكل (٤٥) ضاغط محوري للتوربين الغازي سيمنز SEMENS – V94.2 والمراحل الستة الأولى مطلية بالألمنيوم



الشكل (٤٦) منحنيات
السرعة - الضغط للضاغط المحوري
pressure & speed curves

بالرجوع إلى الشكل (٤٦) :
أ - ريش متحركة لتسريع الهواء .
ب - ريش ثابتة تبطئ الهواء وبالتالي تغير الطاقة الحركية للهواء إلى طاقة ضغط .
ج - سرعة التصريف Discharge velocity يجب أن تساوي سرعة السحب Suction velocity .
يختلف تصميم ريش الضاغط عن ريش التوربين ، حيث يكون الشكل الجانبي لريش الضاغط مائلة ومتباعدة Divergent profile والتي تعمل كناشرة Diffuser لزيادة ضغط الهواء ، في حين أن ريش التوربين لها شكل جانبي متقارب Convergent profile والتي تعمل كفوهة أو منفث Nozzle لأن التوربين يخفض ضغط الهواء عن طريق تغيير طاقة ضغطه إلى طاقة حركية . الرجوع إلى الشكل (٤٧) .



الشكل (٤٧) الشكل الجانبي لريش
التوربين والضاغط

لاحظ أن ريش الضاغط تتعرض إلى إجهاد عالي High stress ولكن بدرجة حرارة أقل بينما غرفة الاحتراق Combustion chamber تعاني من إرتفاع درجة الحرارة ولكن مع إجهاد أقل نسبيا .
في الضاغط المحوري ، تصميم الريش المتحركة ذات أهمية لتوفير شكل إنسيابي (ديناميكي هوائي Aerodynamic) مع الحد الأدنى من الخسائر ، كما يجب أن يكون خلوصية Clearance طرف (قمة) الريشة Blade tip أقل قدر ممكن لتحسين كفاءة الريشة المتحركة ولمنع التسرب من جهة طرف الريشة . وعادة تكون خلوصية الريش المتحركة للضاغط (٧ ملمتر mm) لتقليل خسائر أطراف الريش Blade tip losses .
أثناء الجو الرطب ، قد تحدث الرطوبة العالية فقط في المراحل الست الأولى من الضاغط لأن الهواء يُسخن بسرعة وقد يحدث تكثف Condensate . للتغلب على ضرر التنقر Pitting damage لريش الضاغط ، يتم طلاء المراحل الست الأولى بصبغة الألومنيوم Aluminum pigment .
قد يحتوي الهواء الداخل إلى ضاغط الهواء على غبار أو أوساخ Dust or dirt (حتى لو كان يمر من خلال منظومة مدخل أو سحب الهواء Air intake system) وهذا الغبار أو الملوثات Contaminations سوف تلتصق بريش الضاغط والتي ستؤثر على أداء الضاغط Compressor performance بسبب :
أ- سوف تقل كفاءة مرحلة الضاغط Compressor stage efficiency لأن تراكم الأوساخ على الريشة المتحركة سوف يسبب تغير في زاوية تصريف الريشة بمقدار (٧ ° درجات) والذي سيؤدي إلى تغيير إتجاه سرعة الخروج Output velocity direction إلى المرحلة التالية وبالتالي تقليل كفاءة الريشة .
ب – عندما تلتصق الأتربة أو الغبار على ريش الضاغط فإنها ستشكل نقاطا ساخنة Hot spots ، تذكر أن ريش الضاغط ستُسخن أثناء تشغيل الضاغط بسبب الاحتكاك الناتج عن الدوران العالي . سوف تولد الأوساخ أو الأتربة نقاط ذات درجة حرارة عالية على الريشة لكونها ذات موصلية حرارية Thermal conductivity مختلفة عن الصلب Steel (يتم تصنيع ريش الضاغط من معدن الصلب أو الفولاذ) ، لذلك فإن هذه البقع الساخنة سوف تنتج إجهادات حرارية Thermal stresses على الريشة والتي ستؤدي إلى فشل الريشة إذا لم يتم إزالة الأوساخ أو غسلها .
ج- قد ينتج عن الأوساخ المترسبة على ريش الضاغط إضطراب Turbulence في تدفق الهواء ، تولد إهتزاز وزيادة في درجة حرارة التصريف Discharge temperature مما يؤدي إلى تقليل كفاءة الريشة Blade efficiency .
معظم ضواغط التوربينات الغازية لها وحدة غسل يتم فيها غسل ريش الضاغط بمزيج من الماء الخالي من المعادن والأملاح Demineralized water ومادة خاصة لإزالة أي أوساخ أو غبار على ريش الضاغط ، ويمكن إجراء عملية الغسيل عندما يكون التوربين الغازي في وضع التشغيل (On-line washing) أو عندما يكون التوربين الغازي في وضع الأحتياط Stand by (Off- line washing) .

عملية غسل الضاغط Compressor washing process

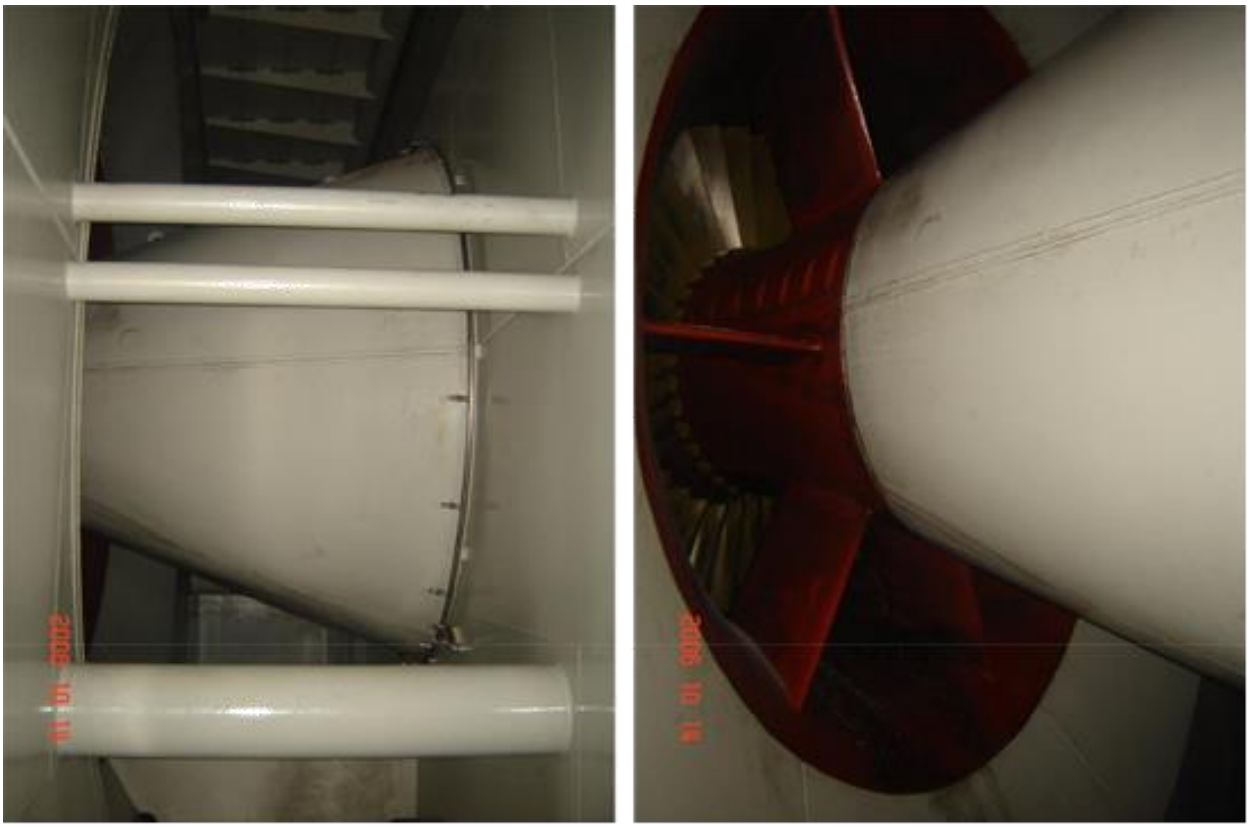
الهدف من عملية تنظيف الضاغط هو إزالة الرواسب من الريش التي تسببت في انخفاض انتاج وكفاءة التوربينات الغازية . حيث لا يمكن إزالة تلوث الهواء المحيط بالكامل عن طريق نظام ترشيح أو تصفية مدخل الهواء . بشكل رئيسي هناك نوعان من غسيل الضاغط ، أثناء التشغيل و أثناء التوقف Online & Off line washing ، وتتم عملية غسل الضاغط بإستخدام محلول التنظيف Detergent solution والماء الخالي من المعادن والأملاح من أجل التنظيف النهائي . يتم رش كلا السائلين على ريش الضاغط من خلال نوعين من الفوهات Nozzles :

أ - فوهات نفاثة Jet nozzles التي تتكون من فتحتين نفاثتين تضخان أو تحقنان المياه بسرعة عالية

ويتم إستخدامها للغسل فقط أثناء اللاحمل Off load حيث أنها تحقن مياه بسرعة عالية والتي ستكون ضارة على ريش الضاغط التي تدور بسرعة تزامن Synchronizing speed تساوي ٣٠٠٠ دورة في الدقيقة rpm . سيصبح تأثير قطرة ماء صغيرة واحدة مثل الرصاصة .

ب - فوهات الرش Spray nozzles تكون متواجدة على مسافات متساوية حول محيط مدخل الضاغط ، في عكس إتجاه ريش التوجيه المتغيرة لمدخل الضاغط Variable compressor inlet guide vanes ، كل منها تضخ الماء بإعتدال .

وحدة تنظيف الضاغط المحمولة على منصات إنزلاقية Compressor cleaning skid تتكون من خزان ووحدة ضخ ، وتقوم مضخة الطرد المركزي Centrifugal pump بسحب محلول التنظيف والمياه منزوعة المعادن من الخزان المحمول أو المتنقل Portable tank وتغذيتها من خلال خرطوم Hose إلى فوهات النفث أو الرش . يتم ضخ (محلول التنظيف - المياه منزوعة المعادن) عند ضغط حوالي (١٠ بار bar) . تستخدم صمامات العزل Isolation valves في التحول من الفوهات النفاثة إلى فوهات الرش وبالعكس . الشكل (٥٠)



الشكل (٤٨) فوهات غسل الضاغط Compressor washing nozzles

الشكل (٤٩) وحدة غسل الضاغط Compressor Washing Skid

هنالك طرق بديلة لتنظيف الضاغط وتشمل ما يلي :

أ - تفكيك Diassemble الضاغط جزئيا لتنظيف ريش المحور الدوار ، هذه الطريقة تعطي نتيجة ممتازة ولكنها تتطلب انقطاع وتوقف لوقت طويل .

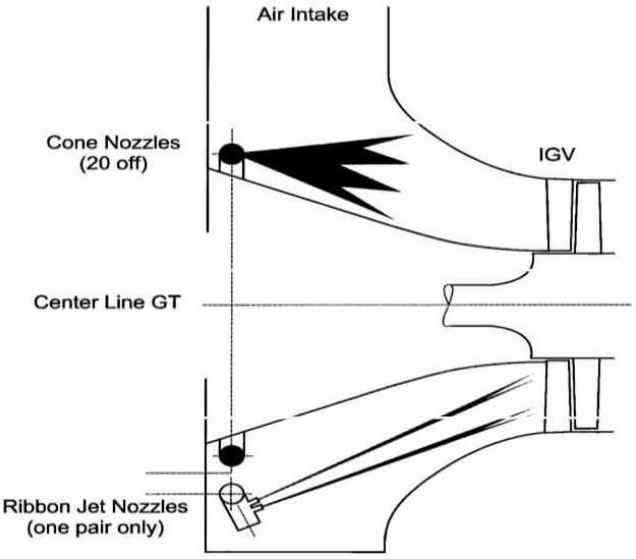
ب - حقن قشور الجوز أو خشب الجوز المسحوق وحقن الأرز وحقن الكربون المركز . ولكن لا ينبغي إستخدام هذه الطريقة في التوربينات الغازية الحديثة بسبب :

أ- خطر الحريق .

ب- التلوث والإنسداد بسبب الزيوت .

ج- خلل في نظام التبريد .

د- الفشل المبكر للجزء الساخن .



إجراءات الغسل الطبيعي للضاغط :

- **تطبيق فوهات مخروطية Cone nozzles فقط .**
- **غسل في وضع التوقف Off-line washing أو الإحتياط ، يوصى بسرعة (٦٠٠ – ٩٠٠ دورة\ دقيقة) .**
- **ممكن الغسل في وضع التشغيل On-line washing (التوربين الغازي مرتبط بالشبكة Grid) ولكن لا يوصى بهذا الإجراء .**
- **الإنتباه للتوصيات الموجودة في كتيبات التوربين الغازي GT manuals .**

الفوهات النفاثة الشريطية المسطحة flat ribbon jet nozzles

- **يطبق فقط للرواسب الصلبة Hard deposits المترسبة على ريش الضاغط**
- **ينفذ عند سرعة جهاز التدوير البطيء Turning gear فقط .**
- **فتح (IGVs) الريش الموجهة لمدخل الضاغط Compressor inlet guide vanes يدويا .**
- **الإنتباه للتوصيات الموجودة في كتيبات التوربين الغازي GT manuals .**

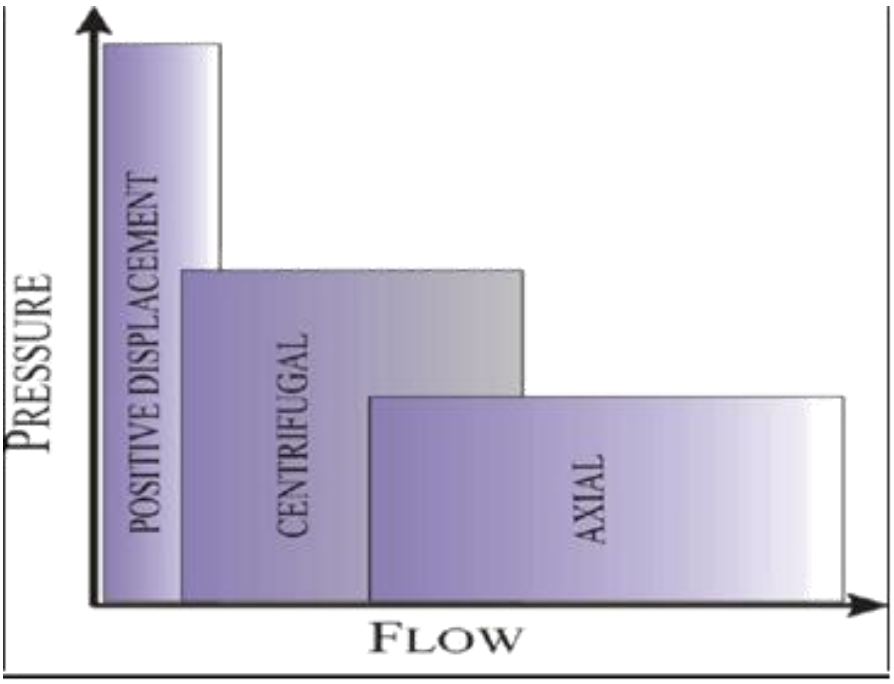
الشكل (٥٠) أنواع فوهات غسل الضاغط

الفرق بين الضواغط المحورية والطرد المركزي

The difference between axial & centrifugal compressors

ت	الضاغط المحوري Axial Compressor	ضاغط الطرد المركزي Centrifugal Compressor
١	كفاءة أعلى (٨٢ ٪ - ٩٠ ٪) .	كفاءة أقل (٧٢٪ -٨٢٪) .
٢	أكبر في الحجم .	أصغر في الحجم .
٣	له كفاءة آيزونتروبية أعلى Higher **isentropic** efficiency.	له كفاءة آيزونتروبية أدنى .
٤	أطول في الحجم .	أقصر في الحجم .
٥	جيد لتطبيقات (الضغط \ التدفق) المتوسط Medium pressure/flow application.	جيد لتطبيقات (ضغط منخفض \ تدفق كبير) low pressure / large flow application.
٦	يستخدم في تطبيقات سرعة أعلى (محرك الطائرة) (aircraft engines) .	تستخدم في تطبيقات عالية السرعة (التوربينات الغازية الأرضية land base gas turbines) .
٧	يقل أدائه بترسب الأوساخ على أسطح الريش .	غير معرض لفقدان أدائه بسبب تراكم الأوساخ على أسطح الريش .
٨	يوجد تكوين متعدد المراحل Multistage configuration مع لا خسائر بالضغط .	بزيادة عدد مراحله سوف تزداد خسائر الضغط .
٩	كلفة أغلى .	كلفة أقل غلاءا

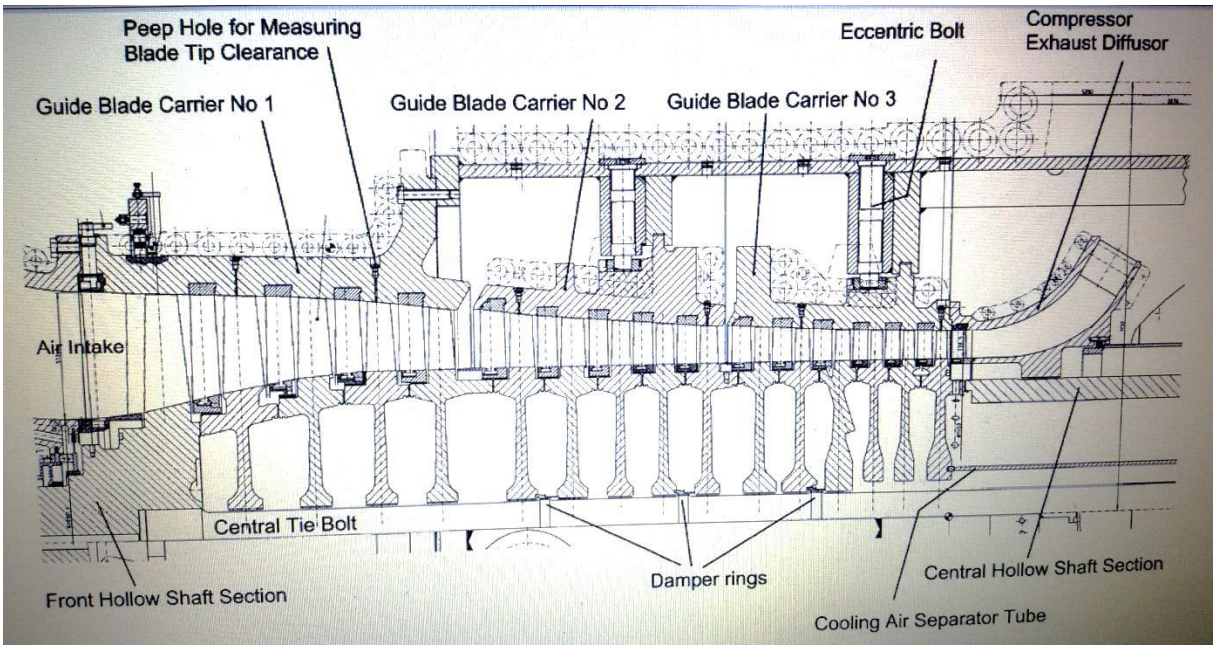
ملاحظة توضيحية : عملية متساوية الأنتروبية (آيزونتروبية **isentropic**) هي العملية التي تتم عند أنتروبي ثابت أي dS= 0 ، عملية حرارية مثالية تتم بدون فقدان حرارة ومادة بين النظام والمحيط أي لا إحتكاك في العملية .



الشكل (٥١) نطاق تشغيل الضواغط

تصميم الضاغط المحوري Axial Compressor Design

يتكون الضاغط المحوري من :
١- الجزء الثابت Stator وحامل ريش التوجيه Guide Blade Carrier .
٢- المحور Rotor .
٣- ريش توجيه المدخل Inlet Guide Vanes .
٤- ناشر العادم Exhaust Diffuser .
٥- خطوط التنفيس أو النزف Blow off Lines .



الشكل (٥٢) مقطع طولي Longitudinal section للتوربين الغازي سيمنز (SIEMENS-V94.2) - قسم الضاغط

١- الجزء الثابت وحامل ريش التوجيه Stator & Guide Blade Carrier

يتكون الجزء الثابت للضاغط من ثلاث حاملات ريشة توجيهية ، يتم فصلها عن بعضها البعض لتوفير تحكم جيد في خلوصية طرف قمة الشفرة Blade tip clearance ، يمكن ضبط موضع حامل ريشة التوجيه بإستخدام برغي لا مركزي Eccentric bolt الذي يوفر المرونة Flexibility لحركة حامل ريشة التوجيه في كل الإتجاهات ما عدا الإتجاه المحوري بمقدار (٣ ملم mm) . يتم قياس خلوصية طرف الريشة عن طريق ستة ثقوب ضيقة Peep holes موجودة على الجزء الثابت للضاغط .
هناك ثغرات أو فجوات Gaps في الجزء الثابت للضاغط التي توفر ممرات لنزف أو تنفيس الهواء Blow off.
توجد حلقات كاربونية Carbon rings مثبتة في أجزاء حول المحور لحماية الريش المتحركة من الإحتكاك بالجزء الثابت للضاغط في حالة إختلاف محاذاة المحور (فقدان الإستقامة المحورية Rotor misalignment)
عادة ما يصنع الجزء الثابت للضاغط من سبائك الصلب Steel alloys .

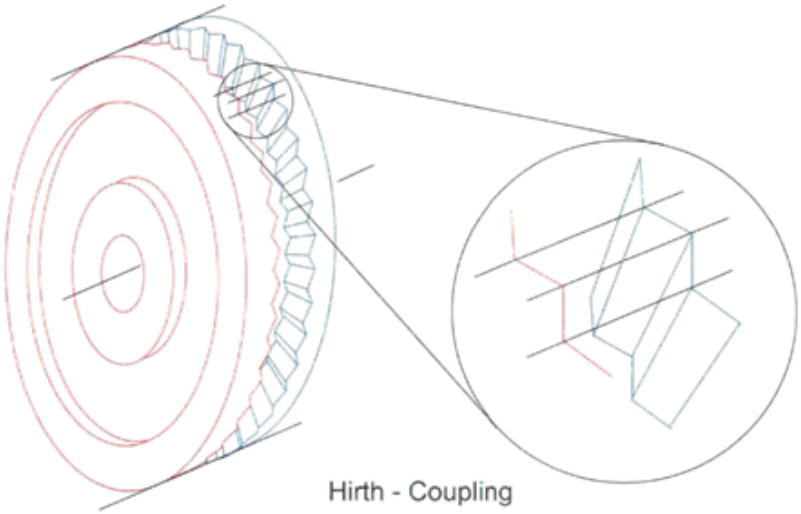
٢- المحور الدوار للضاغط Compressor rotor

يتألف المحور من أقراص دوارة Rotor disks يتم تجميعها مع بعض بواسطة قارنة أو توصيلة هيرث Hirth Coupling وهي نوع من الوصلات الميكانيكية التي تحمل اسم المطور Albert Hirth . الشكل (٥٢) والشكل (٥٣) . يحمل القرص الدوار الريش المتحركة Moving blades للضاغط .

تكون الأقراص الدوارة مجوفة من الداخل وهناك براغي ربط مركزية تُضمن أنها مثبتة في مواضعها ، لاحظ أن هناك فجوة بين الأقراص الدوارة (حوالي ٣ مم mm) وبراغي الربط المركزية ، هذه الفجوة هي لتوفير ممرات للهواء المستخلص Extracted air من الضاغط لتبريد المكونات الساخنة (الحارقة والتوربين) Combustor & Turbine . تستخدم حلقات التخميد Damper rings لتقليل إهتزاز براغي الربط المركزية من خلال دعمها أو إسنادها بالأقراص الدوارة .

يتم إسناد المحور عن طريق محامل شعاعية و محورية Radial & Axial bearings (journal bearings) . يُصنع المحور من سبائك الصلب steel alloys وتُصنع ريشه بشكل عام وشفراته بشكل عام بواسطة عملية تشغيل آلي أو ميكانيكي Machining process .

الشكل (٥٣) القرص الدوار للضاغط Compressor Rotor Disk



الشكل (٥٤) قارنة أو توصيلة هيرث Hirth Coupling

٣ - ريش التوجيه المتغيرة لمدخل الضاغط Compressor variable inlet guide vanes (I.G.V)

تحتوي معظم التوربينات الغازية الحديثة على ريش التوجيه المتغيرة لمدخل الضاغط (I.G.V) ، وعادة ما يتم ضبط فتحها بنسبة ٤٠٪ عندما تكون الوحدة في وضع الإحتياط ، بمجرد بدء تشغيل التوربين الغازي يتم وضع ال(I.G.V) تحت السيطرة لغرض إستخدامها في توفير الهواء اللازم للحمل المحدد و أيضا للسيطرة على درجة حرارة مخرج التوربين Turbine outlet temperature وتجنب الزيادة في درجة الحرارة بزيادة فتح ال (IGV) اللازم لزيادة تدفق هواء الضاغط لتبريد التوربين .

I.G.V يُستخدم للتحكم في تدفق الضاغط لحمل معين وللسيطرة على درجة حرارة مدخل المرجل Boiler في الدورة المركبة Combined cycle ، وكذلك يتم ضبطه عند فتح (٤٠٪) أثناء بدء تشغيل التوربين الغازي من أجل تقليل تدفق مدخل الضاغط الذي سيقلل من الإجهادات على المرحلة الأولى من الريش المتحركة للضاغط (أطول ريش متحركة في الضاغط) أثناء بدء التشغيل . تتم حركة ريشة توجيه المدخل IGV عبر محرك كهربائي Electric motor متصل بآلية ريشة التوجيه Guide vane mechanism ، أنظر الشكل (٥٥) .

كلما أزداد حمل التوربين الغازي ، ستزداد نسبة فتح IGV حتى تصل إلى (١٠٠٪ فتح) ، عندئذ يقال أن الوحدة تحت عملية أو في حالة تشغيل الحمل الأساس Base load operation (أي أن تدفق الضاغط يكون في الحد الأقصى) ، لاحظ أن ضخ كمية وقود إضافية إلى التوربين الغازي سوف تزيد من درجة حرارة مدخل التوربين إلى قيمة أعلى ويمكن توفير قدرة إضافية Extra power ولكن في هذه الحالة ، يقال أن الوحدة تحت عملية حمل الذروة Peak load لأن درجة حرارة مخرج التوربين أعلى مما هي عليه في حالة تشغيل الحمل الأساس لأن ال (IGV) لا يمكن فتحه فعليا أكثر من نسبة (١٠٠٪) لتوفير هواء التبريد الضروري للتوربين

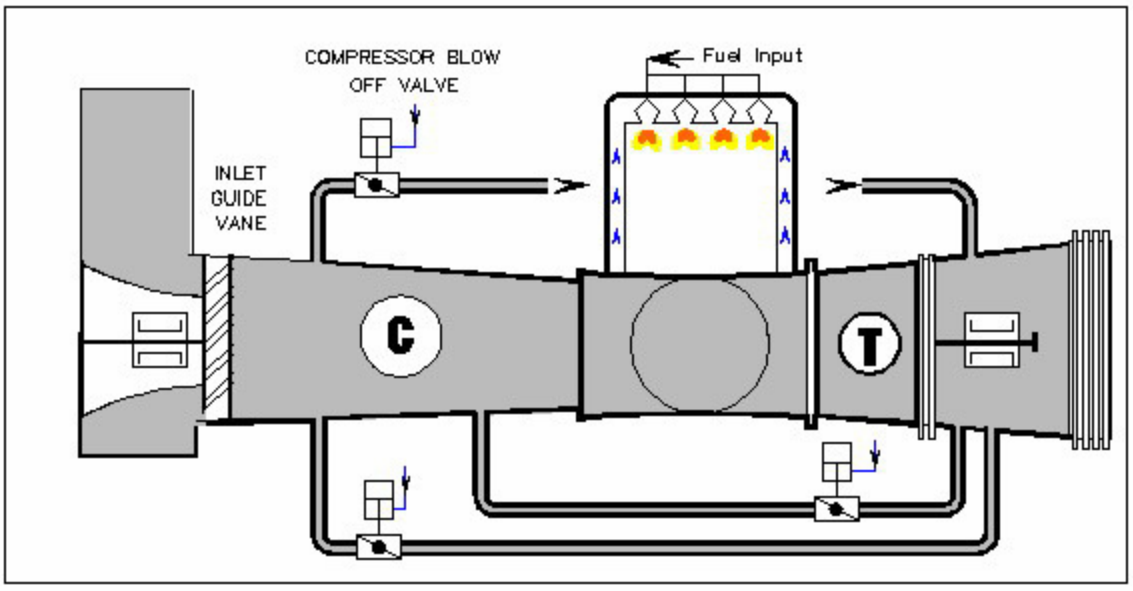
الشكل (٥٥) ريش التوجيه المتغيرة لمدخل الضاغط Compressor variable inlet guide vanes (I.G.V)

٤- ناشر العادم Exhaust Diffuser

يستخدم ناشر العادم لتوفير المزيد من الزيادة في ضغط الهواء وكذلك لإزالة الدوامات Vortices من الهواء وجعل تدفقه أكثر رقائقي أو إنسيابي Laminar بعد أن تم تغيير إتجاه الهواء المتدفق على طول مراحل الضاغط Compressor stages بأكملها ، وبالتالي زيادة الاضطراب Turbulence .
إن عدد مراحل الضاغط أكثر من مراحل التوربين Turbine stages حيث تتطلب أي زيادة في ضغط الهواء من ضاغط محوري (ضاغط ديناميكي) إما زيادة في حجم المراحل أو زيادة في عدد المراحل لغرض إنتاج الضغط المرغوب .

٥ - خطوط التنفيس أو النزف Blow off Lines

يتم تصميم أنظمة التنفيس Blow-Off للتحكم في نسبة الضغط \ التدفق (Pressure / Flow Ratio) ، أثناء التشغيل بسرعة منخفضة ، مثل فترة بدء التشغيل Start up period .
ضاغط التدفق المحوري يحتوي على خط تنفيس (أو خطوط نزف Bleed lines) لتفريغ بعض الهواء الداخل إلى الضاغط أثناء بدء التشغيل وتمريره بسرعة إلى العادم عبر ممر إلتفافي أوحولي By pass (حول غرفة الإحتراق والتوربين) ، وهذا يساعد على القضاء على ظاهرة إرتداد الضغط وعدم إستقرار التدفق (إضطراب الهواء) في الضاغط Compressor surge أثناء التشغيل المنخفض السرعة (بدء التشغيل) .
على كل من هذه الخطوط يوجد صمام تنفيس يكون عادة من نوع الفراشة Butterfly valve ويعمل بالهواء المضغوط Compressed air المستخلص من هواء الضاغط .
عادة يتم وضع أو تثبيت خطوط التنفيس بنسبة ٣٠٪ و ٦٠٪ خلال الضاغط ، بالنسبة للضاغط المحوري الذي يحتوي على ١٠ مراحل ، فيجب أن يكون هناك صمام تنفيس واحد بينما يحتاج ضاغط محوري كبير إلى ثلاثة خطوط ، لاحظ أن ظاهرة إرتداد الضغط أو إضطراب الهواء مرتبطة فقط بالضاغطات الديناميكية Dynamic compressors أما ضواغط الإزاحة الإيجابية Positive displacement compressors فلا تحتاج إلى صمام تنفيس .



الشكل (٥٦) خطوط التنفيس أو النزف للضاغط Compressor blow off Lines

مزايا خطوط التنفيس Advantages of blow off lines

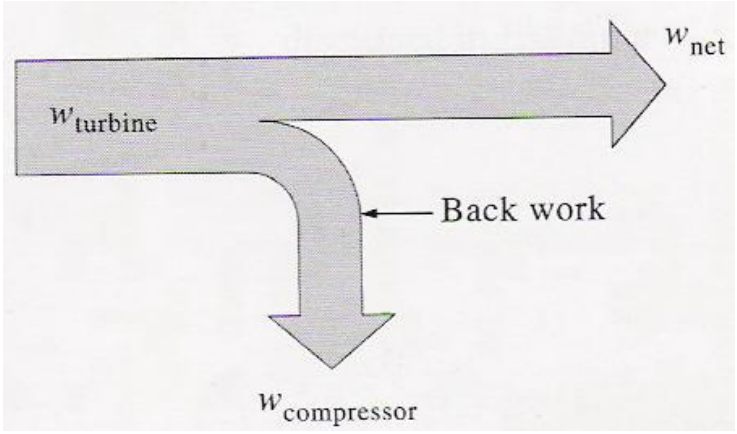
١ - يتم إستخدام هواء التنفيس كمانع إنجماد Anti icing وذلك لمنع حدوث إنسداد في الطقس البارد بسبب تكون الجليد في بيت تصفية هواء المدخل Air intake filter house ، يتم إعادة تدوير وتمرير هذا الهواء النازف (أكثر دفئا من الهواء الخارجي) إلى مدخل الضاغط مرة أخرى .
٢ - يتم إستخدام هواء النزف كهواء تطهير وتنظيف Purge air للأفران Furnace في الدورة المركبة Combined cycle .
٣ - خطوط النزف تبدد الطاقة في حالة التوقف المفاجىء Trip ، وتمنع السرعة المفرطة Over-speed .
٤ - إذا تم تقليل السرعة إلى أقل من الحد الأدنى للتردد ، فسوف تُفتح صمامات التنفيس لمنع حدوث ظاهرة إرتداد ضغط الضاغط Compressor surge .
بالرجوع إلى الشكل (٥٦) هناك نوعان من خطوط التنفيس أو النزف عند نسبة ٣٠ ٪ من طول الضاغط (المرحلة رقم ٥) وخط واحد عند نسبة ٦٠٪ من طول الضاغط (المرحلة رقم ١٠) ، والسبب في وجود خطين منفصلين عند ٣٠٪ من طول الضاغط لأن ضغط الهواء في هذه المرحلة ليس عاليا ، لذا فإن حجمه أكبر ، وهذا يعني أننا بحاجة إلى طرد كمية كثيرة من الهواء ، ولكن عند ٦٠ ٪ من طول الضاغط (المرحلة رقم ١٠) يتم رفع ضغط الهواء لذلك يجب نزف كمية قليلة من الهواء فقط إلى الخارج وبالتالي يكفي وجود خط نزف واحد .
لاحظ أنه :
سيتم إغلاق صمامات التنفيس في المرحلة رقم ٥ عند ٣٨ هرتز Hz (٢٢٨٠ دورة في الدقيقة rpm) .
سيتم إغلاق صمام التنفيس في المرحلة رقم ١٠ عند ٤٩ هرتز Hz (٢٩٤٠ دورة في الدقيقة rpm) .
يجب على الضاغط توفير أو تجهيز نوعين من الهواء :
١- الهواء الخارج من المرحلة الأخيرة للضاغط ويدخل غرفة الإحتراق ليتم إستخدامه في الإحتراق .
٢- الهواء الذي يتم إستخراجه أو إستخلاصه من الضاغط في موقع مختلف عبر ممرات مخفية وإرساله لتوفير التبريد الغشائي Film cooling للمكونات الساخنة من التوربين الغازي (غرفة الإحتراق وقسم التوربين) .
كل ١٪ من الهواء المستخلص Air extraction من الضاغط سوف يقلل من قدرة التوربين بنسبة ٢٪ لأن الهواء المستخرج يُستخدم لتبريد المكونات الساخنة و ليس كهواء للإحتراق .

الشكل (٥٧) خطوط التنفيس أو النزف Blow off lines

إعتبارات التصميم الرئيسية في الضاغط محوري
The main design considerations in axial compressor

١- نسبة الشغل الراجع (Back Work Ratio (B.W.R. :

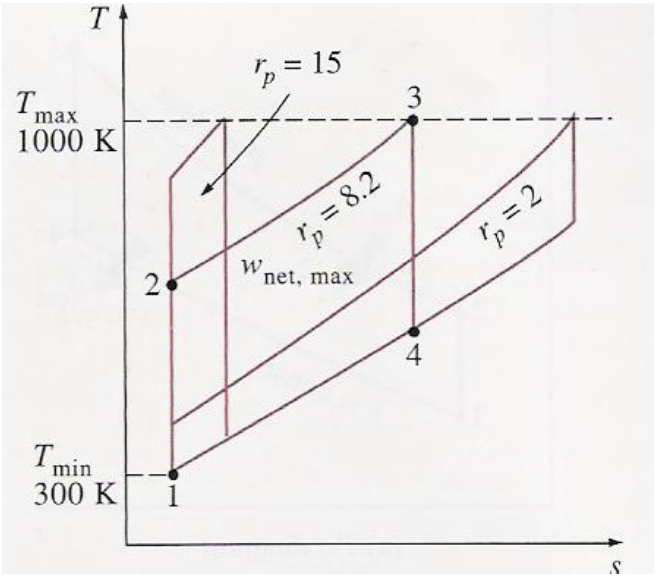
هي نسبة شغل الضاغط (Wc) إلى شغل التوربين (Wt) B.W.R. = Wc / Wt
يتم توفير القدرة الميكانيكية Mechanical power للضاغط والمطلوبة لضغط أو كبس الهواء عن طريق التوربين ، بالنسبة للتوربينات الغازية الكبيرة يمكن إيجاد نسبة شغل راجع أكبر من (٠,٥) . يجب أن يوفر التوربين الغازي قدرة ميكانيكية إضافية لتشغيل الضاغط . لذلك ، فإن التوربين المستخدم في التوربين الغازي أكبر من التوربين المستخدم في التوربين البخاري لنفس ناتج القدرة الصافي Net power output .



الشكل (٥٨) نسبة الشغل الراجع Back Work Ratio

٢- نسبة الإنضغاط (rp) Pressure Ratio :

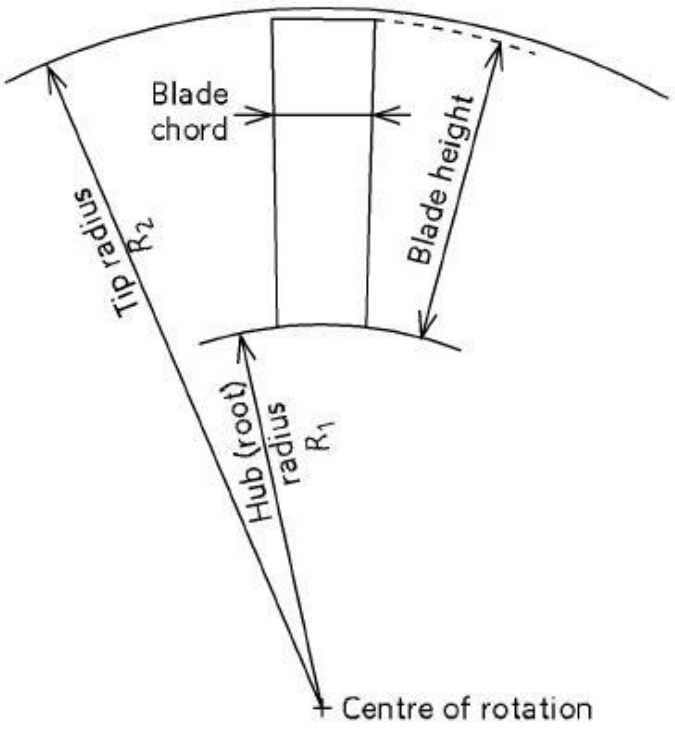
هي نسبة ضغط تصريف الضاغط Compressor discharge pressure إلى ضغط مدخل الضاغط Compressor inlet pressure ، بالنسبة للتوربينات الغازية الحديثة هذه النسبة تزيد عن (٢٠) .



الشكل (٥٩) لقيم ثابتة من درجات الحرارة لكل من مدخل الضاغط والتوربين ، فإن زيادة نسبة الإنضغاط ستؤدي إلى زيادة شغل التوربين إلى الحد الأقصى ، بعد ذلك سوف يقل

٣- نسبة المحور\ الرأس Hub/Tip Ratio :

هي نسبة قطر المحور Hub الذي يتم تركيب الريش فيه (Root) إلى القطرحتى نهاية قمم أو رؤوس الريش Blades tips (القطر الخارجي لكل المحور في ذلك المقطع) . Hub / Tip Ratio = R1 / R2



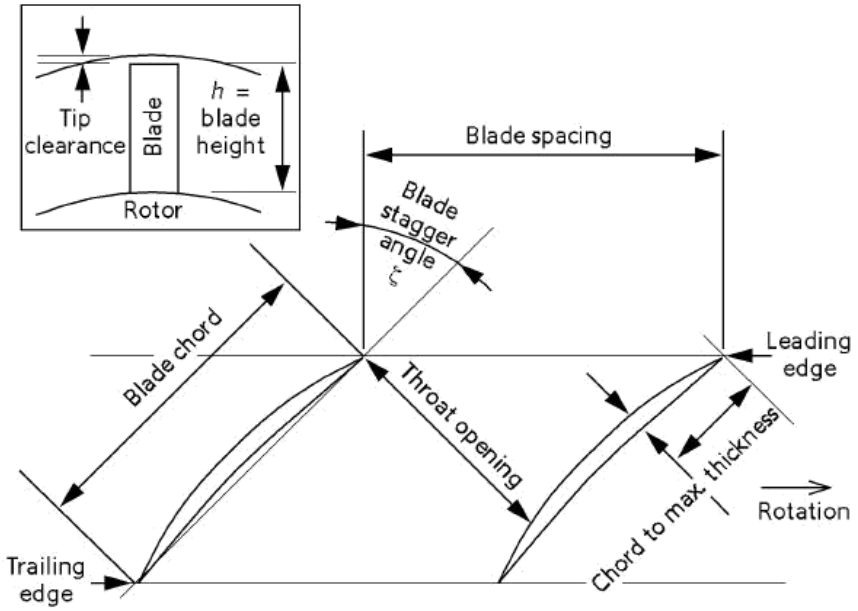
الشكل (٦٠) نسبة المحور\ الرأس Hub/Tip Ratio

لنسبة (المحور\الرأس) تأثيرعلى تصميم الضاغط . حيث أن القيمة المنخفضة للنسبة تسمح بأن يكون قطر الضاغط الكلي أصغر قليلاً ، ولكنها تزيد من ارتفاع الريشة Blade height .
عند نهاية مدخل الضاغط لا تقل نسبة المحور\الرأس عادة عن (٠،٥) ، بينما في نهاية مخرج الضاغط تكون قيمته (٠,٩) (أي أن طول الشفرة يكون في الحد الأدنى) .

٤- نسبة الأبعاد أو نسبة إمتداد الريشة Aspect Ratio :

يتم تحديد نسبة الأبعاد لريشة الضاغط بالمعادلة التالية :
نسبة الأبعاد = إرتفاع الريشة \ وتر الريشة

$$\text{aspect ratio} = \frac{\text{blade height}}{\text{blade chord}}$$

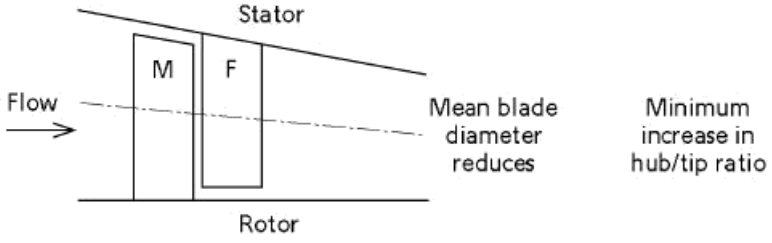


الشكل (٦١) المصطلحات المستخدمة في وصف تصميم ريشة الضاغط

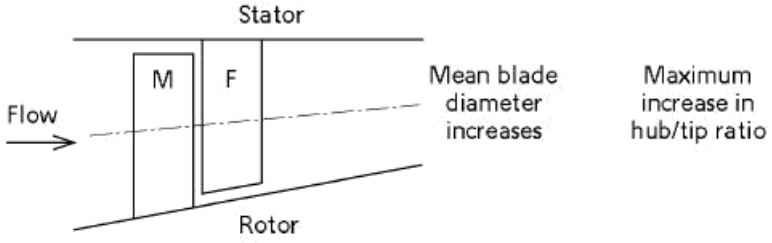
إن القيمة العالية لنسبة الأبعاد تعني كفاءة أعلى للضاغط . ومع ذلك ، يتم ضبط وتثبيت إرتفاع الريشة من خلال التدفق الكتلي للهواء Mass flow of air في المرحلة التي يتم أخذها بنظر الإعتبار ، ويمكن إجراء التغييرات في نسبة الأبعاد فقط من خلال تغيير طول الوتر Chord length ، وبالتالي لزيادة نسبة الأبعاد ، يجب تقليل عرض الوتر Chord width . من عيوب تصميم الريش أنها أخف وأنحف Thinner مما يؤدي إلى حدوث مشاكل إهتزاز الريشة .

٥- متوسط قطر الريشة Mean Blade Diameter :

عندما يمر الهواء على طول الضاغط ، ينخفض حجمه النوعي Specific volume ، وحيث أن سرعة التدفق المتوازية مع المحور الطولي Longitudinal axis تبقى ثابتة تقريبا (التوربين الغازي الأرضي له سرعة ثابتة (سرعة التزامن Synchronizing speed في كل فترات التحميل) ، فإنه يترتب على ذلك الحاجة إلى تقليل مساحة المقطع العرضي Cross-sectional area لتعويض النقص في حجم الهواء . وطرق تقليل المساحة هي تناقص تدريجي للقطر الداخلي Inside diameter للغلاف الخارجي Outer casing ، وكذلك زيادة القطر الخارجي للمحور الدوار مع الحفاظ على قطر داخلي ثابت للجزء الثابت Stator . إضافة إلى ذلك يمكن الجمع بين هاتين الطريقتين عن طريق زيادة قطر المحور الدوار وتقليل قطر الغلاف Casing diameter .
لاحظ أن ضاغط التدفق المحوري مصمم ليكون له سرعة تدفق ثابتة إذا كانت سرعة محوره ثابتة من اللا حمل No-load إلى التحميل الكامل Full load . ومع ذلك ، فأن هذه الحالة ليست كما هي في تكوين (مولد الغازGas generator و توربين القدرة Power turbine).
إن سرعة عمودي الضغط العالي والضغط المنخفض (HP & LP shafts) مستقلة ميكانيكيا ولكن يوجد إقتران ديناميكي هوائي Aerodynamic coupling قوي بينهما .

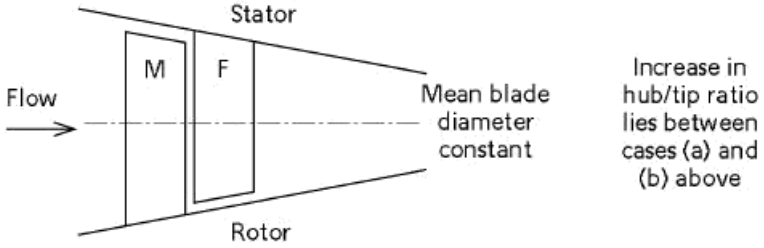


(a) Stator inside diameter reducing, rotor diameter constant



(b) Stator inside diameter constant, rotor diameter increasing

(c)



الشكل (٦٢) طرق تقليل مساحة المقطع العرضي للضاغط للتعويض عن النقص في الحجم النوعي للهواء مع زيادة الضغط على طول الضاغط

تلميح : الملاحظات أعلاه هي لتبسيط تصميم الضاغط . سيتم تحديد التصميم الرئيسي للضاغط من خلال الكثير من العوامل المعقدة Complex factors .

بالإشارة إلى الشكل (٦٢) الذي يوضح ثلاثة أنواع لتقليل مساحة المقطع العرضي للضاغط هي :

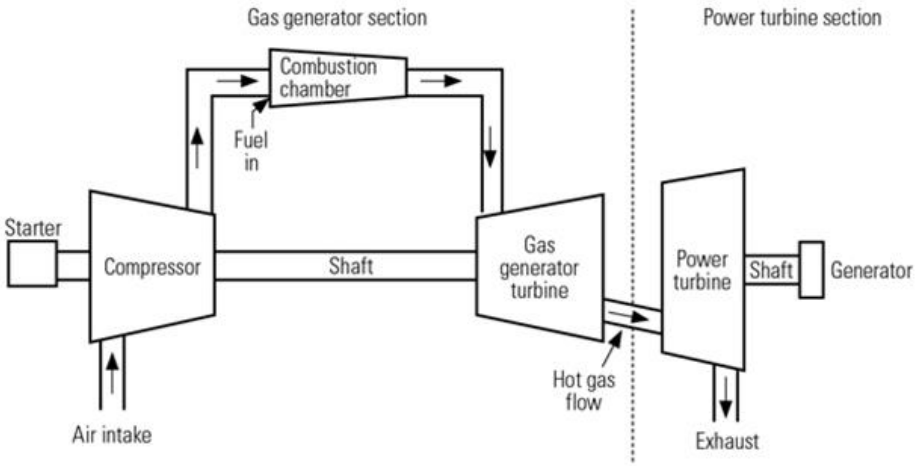
في (a) متوسط القطر يقل مع حركة الهواء خلال الضاغط ، في (b) يزداد متوسط القطر ، وفي (c) متوسط القطر يبقى ثابت . عموما ، تأثيرات متوسط قطر الريش هي :

(a) يمكن توليد نسب ضغط عالية جدا (b) محددة على نسب ضغط حوالي ١٤ (c) تقدم حلا مفيدا لأنها تستطيع التعامل مع نسب ضغط حتى حوالي ٢٤ .

ملاحظات توضيحية لبعض المصطلحات الواردة في الفقرة (٥) :

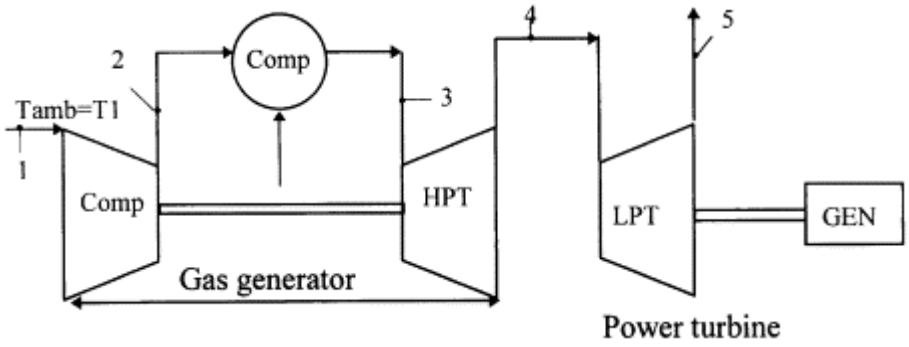
١- مولد الغاز Gas generator :

يحتوي كل محرك توربين غازي على قسم إحتراق وضاغط وتوربين . يسمى (الضاغط ، والحارق ، والتوربين) قلب أو لب المحرك Core of the engine ، ولأن جميع التوربينات الغازية تتكون من هذه المكونات Components ، فإن قلب المحرك التوربيني الغازي يشار إليه أيضا بأسم مولد الغازGas generator نظرا لأن مخرج القلب هو غاز العادم الساخن Hot exhaust gas الذي يحرك ويقود توربين القدرة . الشكل (٦٣) .



الشكل (٦٣) توربين غازي منفصل العمود split shaft gas turbine

٢- عمودي الضغط العالي والضغط المنخفض (shafts HP & LP) :
تحتوي بعض التوربينات الغازية ذات التصميم GE على عدة أعمدة تدور بسرعات مستقلة . تختلف ضغوطات غازات الاحتراق الساخنة التي تتدفق من خلال أقسام التوربين (قسم HP وقسم LP).
تشير HP و LP إلى أعمدة الضغط العالي و الضغط المنخفض High-Pressure and Low-Pressure shafts والسرعات . الضغوط هي ضغوط نسبية ، أحد التوربينين يعمل عند ضغط أعلى من الآخر الذي يسمى توربين الضغط المنخفض .
عادة ما يرتبط عمود HP مباشرة بالضاغط المحوري (إقتران ميكانيكي Mechanically coupled) ، وعادة ما يكون عمود LP متصلا مباشرة بالحمل وهو عبارة عن ضاغط طرد مركزي ، أو مضخة ، أو مولد Centrifugal compressor, or a Pump, or a Generator . يحتاج عمود HP ، الذي يحرك الضاغط المحوري ، إلى العمل في نطاق السرعة الذي تم تصميم الضاغط المحوري من أجل تشغيله . ويحتاج عمود LP ، الذي يقود الحمل ، إلى العمل بالسرعة التي يتطلبها الحمل . الشكل (٦٤) .



الشكل (٦٤) توربين غازي مزدوج العمود Dual shaft gas turbine

٦ – إلتواء ريشة الضاغط Compresosr blade twist

يجب أن تكون ريشة الضاغط ملتوية من أجل الحفاظ على نفس سرعة وإتجاه الريشة (سرعة الريشة هي الحد الأقصى عند الطرف أو الرأس Tip والحد الأدنى عند الجذر Root) ، ستكون السرعة المتجهة

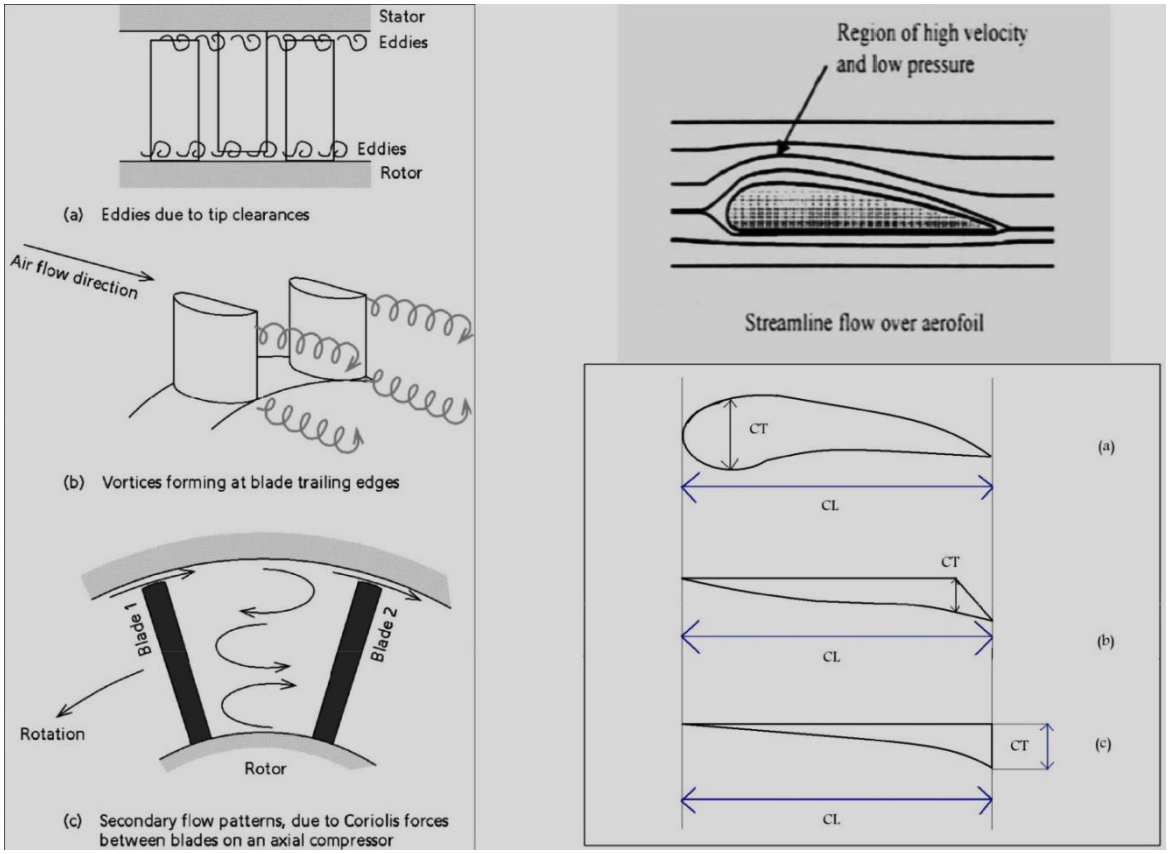
Velocity vector مختلفة عند كل نصف قطر من الريش Radius of the blades وبالتالي فإن زوايا الريشة اللازمة لملاقاة تيار الهواء بشكل صحيح ستختلف عند كل نصف قطر من الريشة التي تمثل تصميما ضعيفا للريشة ، لذلك يجب أن تكون ريش الضاغط ملتوية للحصول على الزاوية الصحيحة لكل نصف قطر الريشة . يمكن رؤية إلتواء الريشة بوضوح في الشكل (٦٥) .

الشكل (٦٥) إلتواء ريشة الضاغط Compresosr blade twist

لاحظ أن إلتواء ريشة الضاغط يقل كلما تحركنا على طول الضاغط لأنه في هذه المراحل يتناقص طول ريشة الضاغط لذلك يتم تقليل إلتواء الريشة . يتغير شكل مقطع ريشة الضاغط (شكل السطح الإنسيابي للريشة Airfoil) بالإعتماد على سرعة الهواء داخل الضاغط ، الشكل (٦٦) .

أنواع تأثيرات الهواء أثناء عملية الإنضغاط في الضاغط المحوري

The types of air effects during compression process in axial compressor



الشكل (٦٦)

الشكل (٦٧) أنواع دوران الهواء Air circulation
في الضاغط المحوري

الشكل (٦٦) تصميم شكل السطح الإنسيابي Airfoil لريشة الضاغط :

(a) - ريش دون سرعة الصوت Subsonic Blades (M<0.7 , Z=45%)

(b) - ريش ضمن سرعة الصوت Transonic Blades (1.3 >M >0.7 , Z=65%)

(c) – ريش فوق سرعة الصوت Supersonic Blades (M >1 , Z=85%)

حيث أن : M = رقم ماخ Mach number وهو رقم بدون وحدة ويمثل نسبة السرعة الموضعية Local flow velocity لمائع ما إلى سرعة الصوت Speed of sound في نفس ذلك المائع .

Z = سمك الوتر Chord thickness \ طول الوتر Chord length

تأثيرات تدفق الهواء على الضاغط المحوري Air flow effects on axial compressor

نحن نعتقد أن الهواء يمر بتدفق منتظم و مستقر Steady stream عبر الريش ، ولا ينحرف عن مساره ، وهذا غير صحيح . حتى بين جذر وطرف الريشة يمكن أن تحدث إختلافات كبيرة . أظهرت إحدى الإختبارات على ضاغط ذو أداء جيد بإستخدام أجهزة قياس دقيقة خاصة Special instrumentation اختلافا في درجة حرارة الهواء بين الجذر والطرف بمقدار (٥ درجة مئوية °C) ، هذا التغير في درجة الحرارة يؤثر على خصائص الهواء Air properties .

يوضح الشكل (٦٧) بعض التدفقات التي يمكن أن تحدث بين أثنين من الريش .

توضح النقطة (a) الدوامات الناتجة عن تسرب الهواء Air leaking بين ريش الجزء الثابت والمحور الدوار ، وتوضح النقطة (b) الدوامات الناتجة عن الحواف الخلفية للريش وهذه مماثلة في النوع للدوامات التي يمكن رؤيتها في بعض الأحيان على أطراف جناح الطائرة Wing tips of aircraft في الجو الرطب (الرطوبة العالية High humidity) . أما النقطة (c) فإنها توضح أنماط الدوران التي تنشأ بسبب تسارع كوريوليس Coriolis acceleration الذي يؤثر على تدفق الهواء .

(ينشأ تسارع كوريوليس عندما يتحرك الجسم نحو الخارج بشكل شعاعي أثناء الدوران المحيطي Rotating circumferentially) .
كل مكونات أو أنماط التدفق أعلاه تسبب خسائر تقلل من كفاءة الضاغط .

ملاحظة توضيحية : في الفيزياء ، يطلق اسم تأثير أو قوة كوريوليس Coriolis force على التشوه الظاهري في حركة الأجسام عندما ترصد أو ينظر إليها من إطار مرجعي دوراني (متحرك حركة دائرية) وتشير إلى القوة المؤثرة على حركة الأجسام المتحركة . أطلق هذا الاسم على ذكر غاسبارد - غوستاف كوريوليس Gaspard-Gustave de Coriolis ، العالم الفرنسي الذي وصف هذا التشوه الظاهري في عام ١٨٣٥ . هي قوة وهمية لا وجود لها ومع ذلك لها تأثير حقيقي (مثلا قوة كوريوليس هي القوة المسؤولة عن تحريك العواصف حركة دائرية والكثير من التيارات البحرية) .

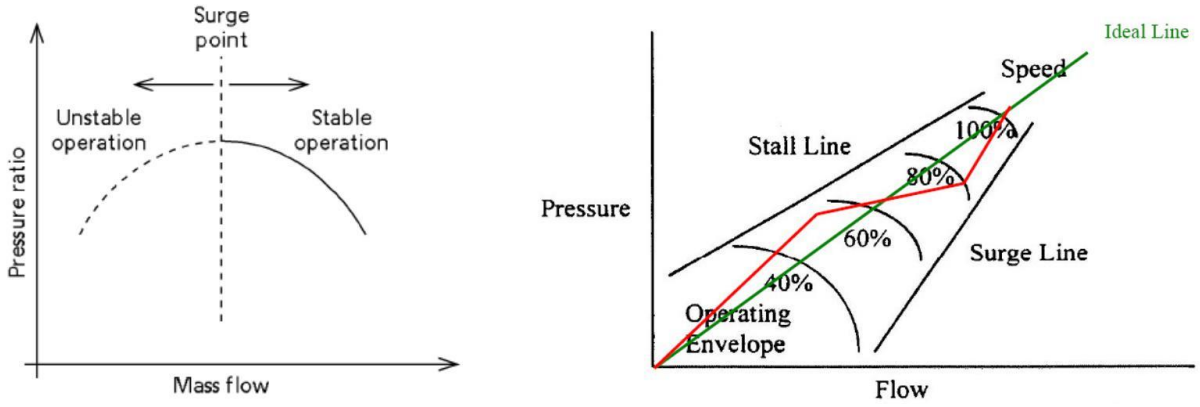
ظاهرة إضطراب الهواء في الضاغط المحوري Axial Compressor Surge
إضطراب \ توقف الضاغط Compressor Surge/Stall

إضطراب الهواء ظاهرة تحدث في ضاغط التدفق المحوري ، تحدث هذه الظاهرة عندما يعمل الضاغط بنسب ضغط ومعدل تدفق كتلي غير صحيحة (أي أنها غير متجانسة معا) والنتيجة هي عدم إستقرار تدفق الضاغط وتدفق عكسي للهواءCompressor flow instability & reversed air flow ، والذي سيُنتج إهتزازات عالية للريش (خاصة ريش المراحل الأخيرة) والتي قد تؤدي إلى فشل في الريشة .
الشكل (٦٨) يُظهر عدم إستقرارية تدفق الضاغط .

الشكل (٦٨) عدم إستقرارية تدفق الضاغط
(a) توقف كامل للتدفق Full stall .
(b) توقف التدفق في الحافة الأمامية لطرف الريشة Leading edge tip stall
(c) توقف التدفق في الحافة الخلفية لجذر الريشة Trailing edge root stall
(d) تدفق كامل Full flow
(e) توقف التدفق في الحافة الخلفية لطرف الريشة Trailing edge tip stall

تم تصميم الضاغط المحوري للتشغيل عند نقطة تصميم Design point تعمل عندها بكفاءة أكبر ، مع تدفق الهواء في كل مرحلة تقترب من الريش عند الزاوية الصحيحة في جميع أنحاء الضاغط ، وسرعة التدفق بالتوازي مع محور الضاغط ستكون ثابتة على طول الماكينة ، وعند أقصى قيمة .
يجب أن يكون تشغيل الضاغط إلى حد كبير عند أو بالقرب من هذه النقطة (نقطة التصميم) . فعند سرعة محددة ، إذا تغير معدل التدفق الكتلي mass flow rate أو نسبة الإنضغاط Pressure ratio ، فسيحدث إضطراب Disturbed في توازن التدفق .
إذا زادت نسبة الضغط إلى أكثر من نقطة معينة ، فسوف تتناقص السرعة المحورية للهواء وسيحدث توقف مفاجيء للتدفق عند الريش blades stall لأن التدفق سيقترب الآن من الريش بزاوية غير صحيحة . ومن

المحتمل أن يحدث تغير مفاجىء (إضطراب) Surge في الضاغط ، بتدفق يتراوح بين البناء والانهيار Building up and Breaking down ، مع إمكانية كاملة لتوصيل الهواء . يمكن إدراك وملاحظة هذه الحالة على الضاغط من خلال الضوضاء العالي High noise ، وفي الحالات السيئة ، من خلال الأضرار المادية Physical damage للماكينة . وبالمثل ، إذا أنخفضت نسبة الإنضغاط إلى حد بعيد ، فإن السرعة المحورية سوف تزداد وسوف يتوقف التدفق عند الريش مرة أخرى .
يشار إلى الحالة الأولى بوصفها أنها توقف مفاجىء ناتج عن صدمة إيجابية Positive shock stall والثانية توقف مفاجىء ناتج عن صدمة سلبية Negative shock stall . يجب تجنب التشغيل في ظل هذين الشرطين .
إذا تم رسم نسبة الإنضغاط مقابل معدل التدفق الكتلي ، فسيتم الحصول على منحنى يسمى منحنى تشغيل الضاغط Compressor operating curve . أنظر إلى الشكل (٦٩) .



الشكل (٦٩) منحنى تشغيل الضاغط Compressor operating curve

الأسباب الرئيسية لظاهرة إضطراب الهواء في الضاغط المحوري

Main reasons of compressor surge

يمكن ان تكون أسباب ظاهرة إضطراب تدفق الهواء في الضاغط المحوري :
١- إنخفاض السرعة الدورانية بينما الضاغط يعمل بتدفقه المقدر (المصمم) Rated flow .
٢- يتم إغلاق صمامات التنفيس Blow off valves في وقت مبكر (قبل الوصول إلى السرعة المقدرة Rated speed) .
٣- إنسداد خطوط تفريغ أو تصريف الضاغط Compressor discharge lines التي تزيد فجأة من تفريغ الضاغط .
٤- إنخفاض مفاجئ في ضغط تفريغ الضاغط Compressor discharge pressure .

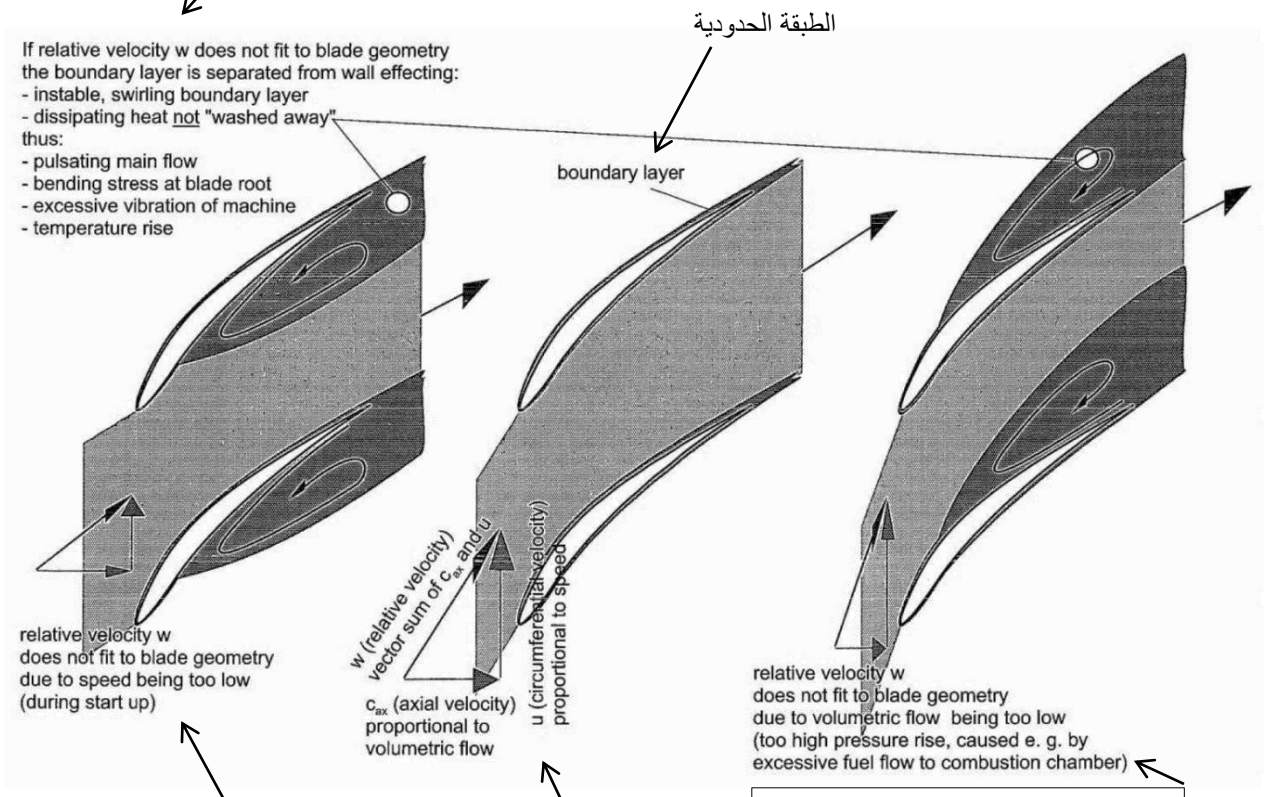
وبما انه يجب تجنب ظاهرة إضطراب الضاغط ، فإنه يجب تنصيب أجهزة حماية للضاغط من هذه الظاهرة Compressor surge protection .

إذا لم تتناسب السرعة النسبية Relative velocity مع هندسة الريشة Blade geometry ، فيتم فصل الطبقة الحدودية Boundary layer عن تأثير الجدار :

- غير مستقر ، طبقة حدودية إلتوائية (دوامة) Unstable , swirling boundary layer
- تبديد حرارة ليس (بالماء) Dissipating heat not (washed away)

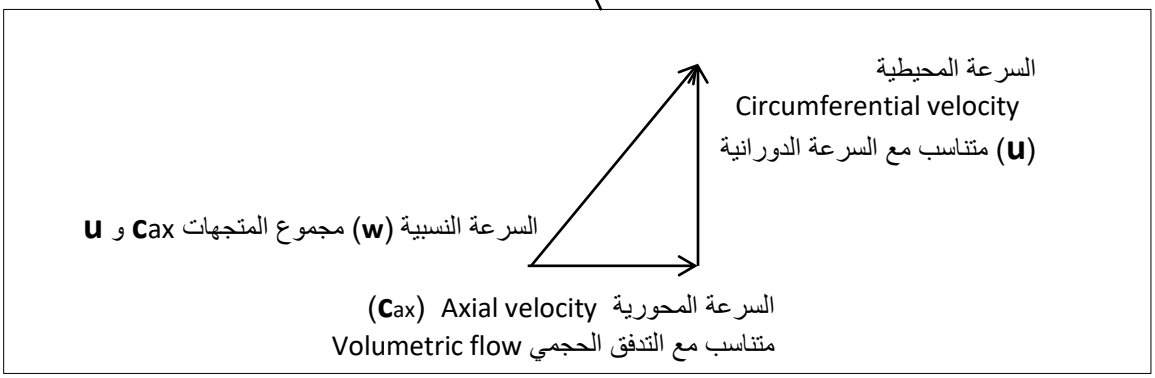
بالتالي :

- تذبذب التدفق الرئيسي Pulsating main flow
- إجهاد إنحناء في جذر الريشة Bending stress at blade root
- الإهتزاز المفرط للماكينة Excessive vibration of machine
- إرتفاع درجة الحرارة



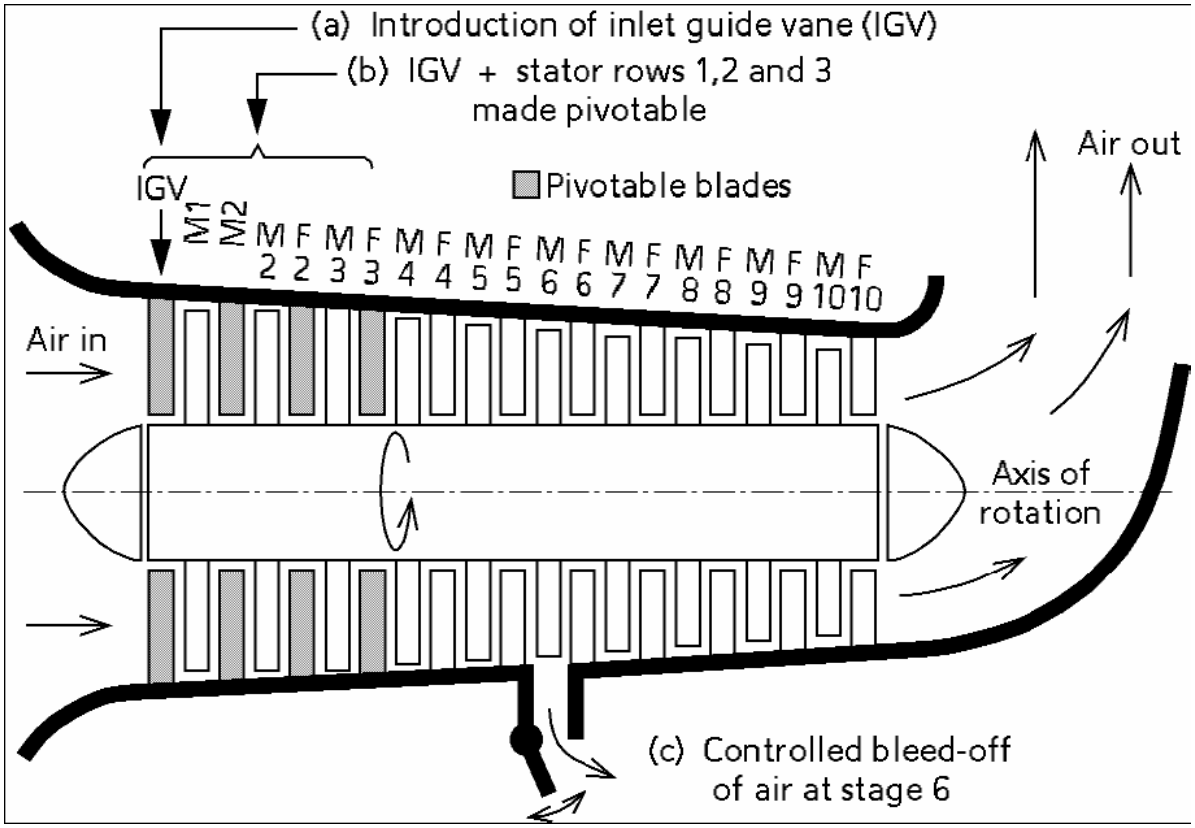
السرعة النسبية **W** لا تتناسب مع هندسة الريشة لأن السرعة الدورانية بطيئة جدا (أثناء بدء التشغيل)

السرعة النسبية **W** لا تتناسب مع هندسة الريشة لأن التدفق الحجمي بطيء جدا (ضغط عالي جدا ، تدفق وقود مفرط إلى غرفة الإحتراق)



الشكل (٧٠) إضطراب الضاغط Compressor surge هو نتيجة زاوية الإصطدام الزائدة Excessive angle of attack

يمكن تجنب مشكلة إضطراب الهواء في الضاغط المحوري بإستخدام الطرق التالية :
(أ) تركيب ريشة توجيه مدخل متغيرة Variable inlet guide vane للتحكم في زاوية التدفق الوارد إلى الزاوية المطلوبة بحيث تتطابق مع زاوية الصف الأول من الريش المتحركة Moving blades .
(ب) جعل زاوية الصفوف القليلة الأولى من الريش الثابتة متغيرة (ريش موازنة أو محورية Pivotable blades) . بحيث يمكن التحكم في ذلك تلقائيا ، ويضمن مطابقة زاوية الريشة لزاوية التدفق حتى لا يحدث التوقف المفاجىء Stalling .
(ج) توفير نزف هواء من الضاغط خاضع للسيطرة Controlled air bleed off بحيث تستقبل المراحل بعد نقطة النزف كمية أقل من الهواء ، وتنخفض سرعته نسبيا .
في العديد من الحالات ، يتم إستخدام جميع الحلول الثلاثة المذكورة أعلاه معا .

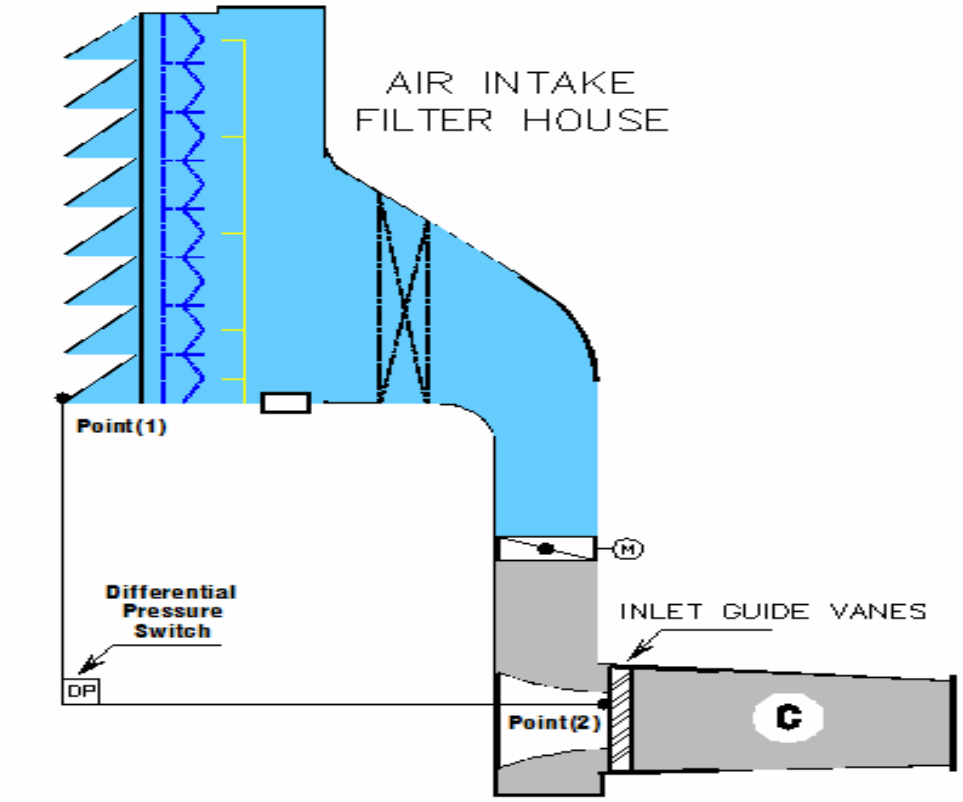


الشكل (٧١) طرق التحكم في ظاهرة إضطراب الضاغط المحوري Compressor surge

الحماية من إضطراب الهواء في الضاغط المحوري Compressor Surge Protection

الحماية من ظاهرة إضطراب الضاغط توفر مراقبة ممتازة لظاهرة إضطراب الهواء في الضاغط المحوري ، هذه الحماية في حالة تفعيلها سوف تقوم بإيقاف التوربين الغازي لتجنب تضرر وتلف ريش الضاغط نتيجة تدفق الهواء العكسي بسبب الإضطراب Surging .
تتكون هذه الحماية من مؤشر ضغط تفاضلي Differential pressure indicator ومتحسسات ضغط Pressure sensors عدد (٢) ، يتم وضع إحدى هذه المتحسسات في مدخل بيت فلاتر سحب الهواء Air intake filter house لقياس الضغط المحيط Ambient pressure (النقطة point 1) .

ويتم وضع متحسس الضغط الآخر عند مدخل الضاغط قبل ريش توجيه المدخل Inlet guide vanes (النقطة point 2) كما في الشكل (٧٢) .



الشكل (٧٢) حماية إضطراب الضاغط Compressor Surge Protection

لاحظ أن الضغط الكلي Total pressure هو مجموع الضغط الإستاتيكي (الساكن) Static pressure والضغط الديناميكي (الحركي) Dynamic pressure ، والضغط الساكن هو نتيجة القوة المبذولة من قبل الهواء عندما تكون في حالة السكون والضغط الديناميكي هو نتيجة القوة التي تبذلها الهواء عند تحركها (ضغط السرعة Velocity pressure) :

الضغط الكلي (TP) = الضغط الإستاتيكي (ST) + الضغط الديناميكي (DP)

بالتالي فإن الضغط الكلي عند النقطة (١) : TP1 = ST1 + DP1

لاحظ أن : الضغط الساكن على النقطة (١) هو الضغط المحيط .

يكون الضغط الديناميكي على النقطة (١) تقريبا مساوي للصفر لأن سرعة الهواء بطيئة جدا .

والضغط الكلي عند النقطة (٢) : TP2 = ST2 + DP2

لاحظ أن : الضغط الساكن على النقطة (٢) أقل من الضغط الساكن على النقطة (١) بسبب الفراغ Vacuum الناتج عن طريق سحب الضاغط Compressor suction .

ويكون الضغط الديناميكي على النقطة (٢) أعلى بكثير من الضغط الديناميكي على النقطة (١) نظرا لإرتفاع سرعة الهواء بسبب سحب الضاغط .

الآن لتوضيح ما ورد أعلاه :
يجب أن يكون الضغط الساكن عند النقطة (١) في حالة التشغيل العادية أكبر من الضغط الساكن عند النقطة (٢) ، لذلك يتم ضبط حماية إضطراب الضاغط Compressor surge protection بحيث :
يجب أن يكون على ألأقل الضغط التفاضلي الساكن (Differential Static Pressure ΔPs) = SP1 - SP2 أعلى من (٤٠ ملي بار mbar) . أي أن الضغط الساكن عند النقطة (١) يجب أن يكون على الأقل أكثر من الضغط الساكن عند النقطة (٢) بـ (٤٠ mbar) .
لاحظ أنه إذا كانت (ΔPs) أقل من (٤٠ mbar) فهذا يعني أن الضغط الساكن عند النقطة (٢) يقترب من الضغط الساكن عند النقطة (١) مما يعني أن الضاغط لم يعد يمتص أو يسحب الهواء حتى إذا كان يعمل عند سرعته وتدفقه المقدرتين Rated speed & flow (أي حدوث ظاهرة التغير المفاجيء أو الإضطراب للهواء في الضاغط) .
عادة ما تكون لأجهزة تحسس الضغط التفاضلي لإضطراب الضاغط ثلاث قنوات لتوفير التكرار أو التأكيد ، فإذا كانت اثنتان من هذه القنوات عبارة عن إشارة خارجية تشير إلى (ΔPs <40 mbar) ، عندئذ ستبدأ عملية إيقاف التوربين الغازي Gas turbine trip عن طريق وحدة تحكم التوربين الغازي .
إذا لم يتم تنشيط حماية إضطراب الضاغط لأي سبب كان أثناء تحضيرات بدء التشغيل ، فإنه يتم حظر بدء تشغيل التوربين الغازي .
تكون حماية إضطراب الضاغط فعالة فقط عندما تكون السرعة (٤٢ هرتز Hz ، ٢٥٢٠ دورة \ دقيقة rpm) وما فوقها .
إذا انخفضت سرعة التوربين الغازي أثناء التشغيل العادي ، فسيحدث ما يلي :
أ - عند سرعة التوربين (٤٧,٥ هرتز ، ٢٨٥٠ دورة \ دقيقة) ، ستغلق ريش التوجيه المتغيرة لمدخل الضاغط Compressor variable inlet guide vanes (I.G.V) بنسبة (٧٥٪) وذلك لتقليل تدفق الضاغط وبالتالي تجنب إضطراب الهواء في الضاغط بسبب إنخفاض السرعة .
ب - عند سرعة التوربين (٤٧ هرتز ، ٢٨٢٠ دورة \ دقيقة) ، سيتوقف التوربين الغازي تحت حماية التردد Frequency protection .

ملاحظات توضيحية :

١- الإضطراب أو التغير المفاجيء Surge هو إنهيار كامل للتدفق الثابت أو المنتظم للهواء Steady flow عبر الضاغط . يتم تعريفه على أنه الحد الأدنى من التشغيل المستقر Stable operation للضاغط . حيث يقل معدل التدفق الكتلي للهواء Mass flow rate وتزداد السرعة الدوارنية للضاغط . وبالتالي يتعرض محامل الضاغط والمحرك إلى أجهادات ضغط وقد يؤدي إلى تلفه .
٢- التوقف Stalling : في التوقف ينعكس إتجاه التدفق على طول الجدار وينحرف خطوط الجريان الإنسيابية Streamlines القريبة من السطح بسبب التأثيرات القوية جدا لإجهاد القص اللزج Viscous shear وتدرج الضغط السلبي أو العكسي Adverse pressure gradient . عندئذٍ تتم إعادة توجيه التدفق ، كما تكثر إجهادات القص اللزجة الكبيرة ، على الأقل موضعيا . و ربما ينتج عن ذلك ضوضاء Noise .
من الممكن أن تتوقف بضعة عناصر من مرحلة الضاغط دون توقف كامل المرحلة أو تحدث أحداث مشابهة. عندما يحدث توقف قوي جدا لمرحلة إما في أحد عناصره ، أو أن مجموعة من العناصر مجتمعة تتوقف بشكل جماعي فإن نسبة الإنضغاط الكلية مقابل خاصية التدفق Overall pressure ratio vs. Flow characteristic لم تعد مستقرة (منحدر سلبي Negatively sloped) ، ثم تدخل المرحلة في مرحلة التوقف

غرف الإحتراق في التوربين الغازي Gas Turbine Combustion Chamber

مبادىء الإحتراق Principals of combustion

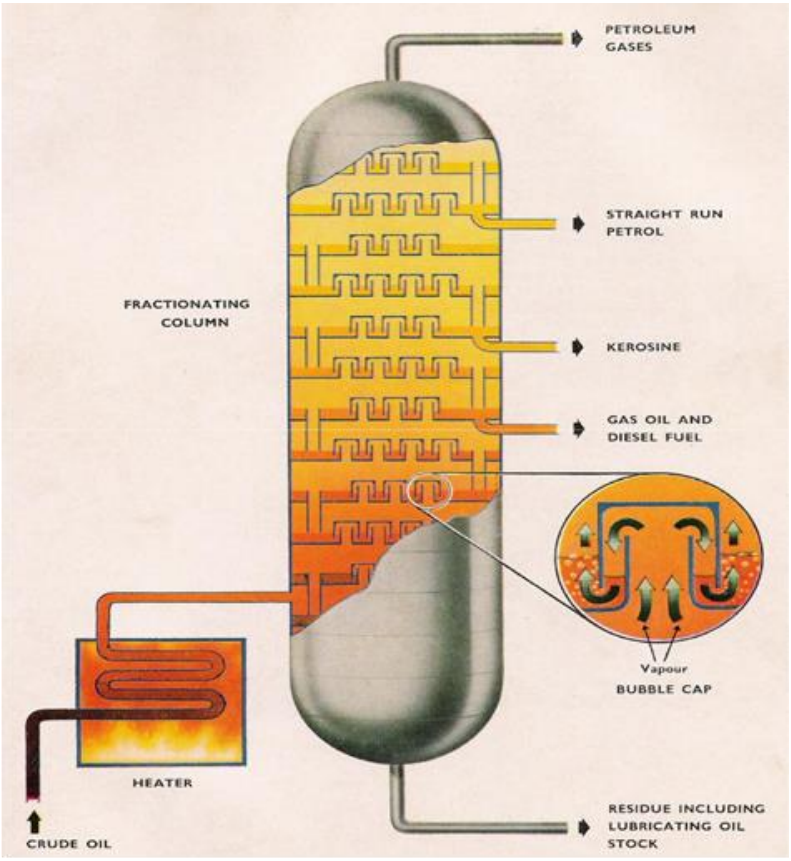
١- الوقود Fuel : أي مادة يمكن حرقها (مؤكسدة Oxidized) لتحرير طاقة Energy تسمى وقود . معظم أنواع الوقود الشائعة تتكون من المواد الهيدروكربونية Hydrocarbon . توجد الهيدروكربونات في كل الأطوار أو الحالات Phases (الصلبة ، السائلة ، الغازية Solid, Liquid, Gaseous) مثل الفحم Coal ، والبنزين Benzene أو الكازولين Gasoline ، والغاز الطبيعي Natural gas . معظم أنواع الوقود تتكون من خليط من المركبات الهيدروكربونية وتتواجد كعُقد Nodes هيدروكربونية معقدة ومتشابكة ، وللبساطة يتم معاملة معظم أنواع الوقود الشائعة كهيدروكربون أحادي ، على سبيل المثال :

أ - يُعامل البنزين أو الكازولين كأوكتان Octane (C8 H18) .

ب - يتم التعامل مع زيت الغاز Gas oil (ديزل Diesel) مثل دوديكان Dodecane (C12 H26) وهي مادة زيتية سميكة من سلسلة البرافينات Paraffin ويستخدم كمذيب .

ج - الكيروسين Kerosene (النفط الأبيض أو زيت البرافين) يُعامل على أنه (C12 H24) .

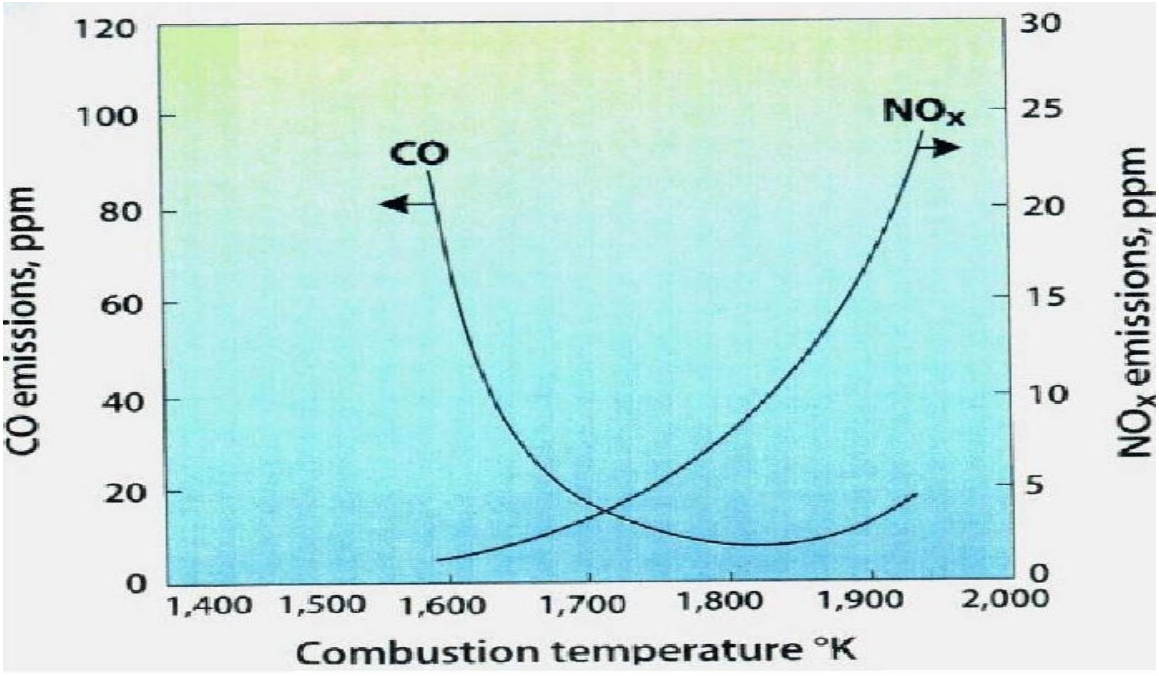
د - الغاز الطبيعي (خليط من ٩٠٪ ميثان Methane (CH4) و١٠٪ إيثان Ethane (C2 H6)) يُعامل على أنه ميثان (CH4) .



الشكل (٧٣) برج التقطير المبسط Simplified distillate tower

٢- المؤكسد Oxidizer : أي مادة غنية بالأوكسجين Oxygen المؤكسد ، أكثر المؤكسدات الشائعة المستخدمة في عمليات الإحتراق هو الهواء لأنه مؤكسد مجاني ويوجد في أي مكان ، ومع ذلك يستخدم الأوكسجين النقي Pure Oxygen في تطبيقات خاصة مثل القطع واللحام Cutting & welding لعدم إمكانية إستخدام الهواء .
٣ - الإحتراق Combustion : تفاعل كيميائي يتم فيه تأكسد الوقود وإطلاق أو تحرير كمية كبيرة من الطاقة .
٤ - متفاعلات الاحتراق Combustion reactants : مكونات Components موجودة قبل الاحتراق (المواد الكيميائية الحاضرة في بداية التفاعل الكيميائي) .
٥ - منتجات الاحتراق Combustion products : مكونات موجودة بعد الاحتراق ، أي وقود هيدروكربوني Hydrocarbon fuel عند احتراقه كاملا ، سينتج غاز ثاني أوكسيد الكربون وبخار الماء والنيتروجين Carbon dioxide, water vapor & Nitrogen .

لاحظ أن النيتروجين هو بشكل عام غاز خامل Inert gas فهو يدخل ويخرج من التفاعل بدون تفاعله مع عناصر كيميائية أخرى Chemical elements . ومع زيادة درجة حرارة الاحتراق إلى أكثر من (١٣٠٠ درجة مئوية °C) كما في محركات الاحتراق الداخلي Internal combustion engines ، يبدأ النيتروجين بالتفاعل مع العناصر الأخرى ، وأخطر المنتجات من تفاعلات النيتروجين هو عندما يتفاعل مع الأوكسجين لتشكيل أوكسيد النيتريك Nitric oxide (NO) وثاني أوكسيد النيتروجين Nitrogen dioxide (NO_2) .
نلاحظ أيضا أن النيتروجين يمثل (٧٨٪) من الهواء المستخدم للإحتراق ، لذا فهو يدخل غرفة الإحتراق بكميات كبيرة وعند درجة حرارة منخفضة ويخرج عند درجة حرارة أعلى وبالتالي فإنه يمتص جزءا كبيرا من الطاقة الكيميائية Chemical energy المتحررة خلال الإحتراق .



الشكل (٧٤) درجة حرارة الإحتراق مقابل إنبعاثات أكاسيد النيتروجين وأول أكسيد الكربون
Combustion temperature vs. NOx & CO emission

٦- NOx : رمز يمثل خليط أكاسيد النيتروجين Nitrogen oxides (NO & NO_2) .
٧- SOx : رمز يمثل خليط أكاسيد الكبريت Sulfur oxides (SO_2 & SO_3) .
٨ - تركيب الهواء الجاف Dry air composition : الهواء الجاف (على أساس الحجم) يتكون من (٢٠,٩ ٪ أوكسجين ، ٧٨,١ ٪ نيتروجين ، ٠,٩ ٪ أركون Argon و ٠,١ ٪ تمثل كمية صغيرة من ثاني أوكسيد الكربون والهليوم Helium والنيون Neon والهيدروجين Hydrogen) .
٩ - الهواء النظري Theoretical air : الحد الأدنى من كمية الهواء اللازمة للإحتراق الكامل .
١٠- الهواء الزائد Excess air : كمية الهواء الإضافية Extra air التي تضاف إلى عملية الإحتراق لضمان الإحتراق الكامل أو لتبريد غرفة الإحتراق .
١١- الإحتراق الكامل Complete Combustion : هو عملية إحتراق يتم فيها حرق كل الكربون Carbon الموجود في الوقود (تأكسد) إلى ثاني أوكسيد الكربون (CO_2) ويتم حرق جميع الهيدروجين في الوقود (تأكسد) إلى الماء (H_2O) وكل الكبريت Sulfur في الوقود (إن وجد) يتم حرقه (تأكسد) إلى ثاني أوكسيد الكبريت Sulfur dioxide (SO_2) في المنتجات (نواتج الإحتراق Combustion products) .
١٢- الإحتراق غير الكامل Incomplete Combustion : هو عبارة عن عملية إحتراق تحتوي منتجاتها على وقود أو مكون غير محترق Unburned fuel or component مثل الكربون (C) أو الهيدروجين (H_2) أو أول أكسيد الكربون Carbon Monoxide (CO) أو هيدروكسيد Hydroxide (OH) .

هناك أسباب كثيرة مسؤولة عن الإحتراق غير الكامل ، ومن الأسباب الرئيسية ما يلي :
أ – كمية الهواء المتاحة Available air لا تكفي للإحتراق الكامل (الأوكسجين غير كافي) .
ب - عدم كفاية الخلط أو الإمتزاج في محارق غرفة الإحتراق Combustion chamber burners خلال الوقت المحدد الذي يكون فيه الوقود والأوكسجين في تماس (حتى إذا كان الإحتراق يحدث مع الهواء الزائد) .
ج – التفكك Dissociation والتي يصبح مهم في درجات الحرارة العالية . ففي درجات الحرارة العالية ، تتحلل أو تتفكك نواتج الإحتراق الرئيسية إلى أنواع أخرى . على سبيل المثال ، الإحتراق الكامل للهيدروكربونات مع الهواء يعطي CO_2 ، H_2O ، N_2 (كمنتجات ، ولكن تفكك هذه المنتجات والتفاعلات بين الأنواع الناتجة عن التفكك قد يؤدي إلى إنتاج العديد من الأنواع الأخرى ، على سبيل المثال O، H، OH، N، NO ، وأخرى .
ينجذب (يتفاعل) الأوكسجين إلى الهيدروجين بقوة أكثر من الكربون . لذلك فإن الهيدروجين الموجود في الوقود يتم حرقه عادة بشكل كامل ومع ذلك يتم تكوين H2O حتى عندما يكون مقدار الأوكسجين أقل مما هو مطلوب لعملية الإحتراق الكامل . بعض من الكربون ينتهي كأول أوكسيد الكربون أو مجرد جسيمات كاربونية في المنتجات .

١٣ - درجة حرارة نقطة الوميض Flash Point Temperature :

نقطة الوميض لسائل قابل للإشتعال Flammable liquid هي أدنى درجة حرارة يمكن عندها أن تشكل مع الأوكسجين خليط قابل للإشتعال Ignitable mixture . عند درجة الحرارة هذه ، قد يستمر إحتراق البخار عند إزالة مصدر الإشتعال . نقطة الإحتراق أو الأشتعال Fire point أعلى قليلا من درجة حرارة نقطة الوميض .
يتم إستخدام نقطة الوميض لوصف خصائص الوقود السائل liquid fuel ، ولكنها تستخدم أيضا لوصف السوائل التي لا تستخدم كوقود (مثل زيوت التشحيم والعزل Lubrication & insulation oils) .

البنزين يُستخدم في محركات الإشتعال الشراري Spark ignition engines . يجب أن يتم خلط الوقود مسبقا مع الهواء ضمن حدوده القابلة للإشتعال Flammable limits ويتم تسخينه فوق نقطة الوميض الخاصة به ، ثم

تشتعل بواسطة شمعة الإشعال أو القدح Spark plug . ولا يجب إشعال الوقود مسبقا في المحرك الساخن . لذلك ، فإن البنزين يجب أن يكون له نقطة وميض منخفضة ودرجة حرارة إشتعال ذاتي عالية High auto-ignition temperature .

الديزل مصمم للإستخدام في محركات الإشتعال بالضغط Compression ignition engines . يتم ضغط الهواء إلى أن يتم تسخينه فوق درجة حرارة الإشتعال الذاتي للديزل ، ثم يتم حقن الوقود كرذاذ عالي الضغط High-pressure spray ، مما يحافظ على خليط الوقود والهواء داخل حدود الديزل القابلة للإشتعال . لا يوجد هنالك مصدر إشعال . لذلك ، يجب أن يكون لوقود الديزل نقطة وميض عالية ودرجة حرارة إشتعال ذاتي منخفضة .

Fuel	Flash Point (ºC)
Gasoline (Benzene) بنزين	> -45 ºC
Diesel ديزل	> 62 ºC
Jet fuel وقود الطائرات	> 38 ºC

جدول يبين درجة حرارة نقطة الوميض لأنواع الوقود الشائعة
Flash Point Temperature for common fuels

١٤ - درجة حرارة نقطة الإحتراق Fire Point Temperature :

نقطة الإحتراق للوقود هي درجة الحرارة التي يستمر فيها الوقود بالإحتراق بعد إشعاله لمدة لا تقل عن (٥ ثوان) . فعند نقطة الوميض ، ودرجة الحرارة المنخفضة ، سوف تشتعل المادة ، ولكن قد لا يتم إنتاج البخار بمعدل لإبقاء أو إستمرار الإحتراق . دائما تكون درجة حرارة الاشتعال الذاتي أعلى من نقطة الوميض .

١٥ - درجة حرارة الاشتعال الذاتي Auto-ignition temperature :

هي درجة الحرارة الدُنيا التي يشتعل فيها الوقود في الجو العادي ، دون وجود مصدر خارجي للإشعال ، مثل لهب (شعلة) Flame أو شرارة Spark إذا تم مزجه مع الأوكسجين ، لاحظ أنه من أجل إشعال الوقود ، يجب أن يتعرض إلى درجة حرارة أعلى من درجة حرارة إشتعاله ، لاحظ أيضا أنه لإشعال الوقود ، فعلينا إما إدخال شرارة أو لهب ، أو نضغط خليط من الهواء والوقود إلى ضغط عالي جدا إلى أن تصبح درجة حرارة الخليط أعلى من درجة حرارة إشتعال الوقود . يبين الجدول أدناه درجات حرارة الإشتعال الدُنيا لبعض أنواع معروفة من الوقود عند ضغط الهواء الجوي :

Fuel	Ignition Temperature ºC
Gasoline	260 ºC
Carbon	400 ºC
Hydrogen	580 ºC
Carbon monoxide (CO)	610 ºC
Methane (CH_4)	630 ºC
Sulfur	243ºC
Acetylene (C_2H_2)	482ºC
Ethane (C_2H_6)	538ºC
Diesel	210 ºC
Jet Fuel	210 ºC

جدول يبين درجة حرارة الإشتعال لإنواع الوقود الشائعة
Ignition temperature for common fuels

ملاحظة : لبدء عملية الإحتراق ، ليس فقط علينا أن نحدث شرارة أو لهب في خليط الوقود والهواء ، بل يجب أن تكون النسبة المئوية للوقود في الهواء ضمن نطاق الإحتراق المناسب Proper range of combustion ، على سبيل المثال ، الغاز الطبيعي سيحترق فقط إذا كانت نسبة الغاز في الهواء ما بين (٥ ٪ إلى ١٥ ٪ من حيث الحجم) ، وللهيدروجين النسبة (٤ ٪ إلى ٧٦ ٪ من حيث الحجم) .

١٦ - درجة حرارة اللهب الأديباتية (ثابتة الحرارة) Adiabatic flame temperature :

هي درجة الحرارة القصوى التي يمكن تحقيقها في عملية الإحتراق إذا أفترضنا أنه لا توجد خسائر في الحرارة Heat losses من غرفة الإحتراق Combustor إلى المحيط Surrounding . يوضح الجدول أدناه درجات حرارة اللهب لبعض أنواع الوقود الشائعة .

Fuel	Flame Temperature ºC*
Propane in air	1980 ºC
Butane in air	1970 ºC
Natural Gas in air	1950 ºC
Acetylene in air	2500 ºC
Acetylene in Oxygen	3100 ºC
Methane in air	1950ºC

* على أفتراض الظروف الجوية الأولية Initial atmospheric conditions
(١ بار bar و ٢٠ درجة مئوية °C)

تتأثر درجة حرارة اللهب الأديباتية بالنسبة المئوية للهواء المستخدم في عملية الإحتراق ، على سبيل المثال إذا تم حرق البنزين (Octane - C8 H18) مع :
أ - الكمية النظرية من الهواء Theoretical amount of air ، تكون درجة حرارة اللهب الأديباتية الناتجة (٢١٢٢ درجة مئوية) .
ب - (٤٠٠٪) كمية زائدة Excess amount من كمية الهواء ، تكون درجة حرارة اللهب الأديباتية الناتجة (٦٨٩ درجة مئوية) .
ج - فقط (٩٠ ٪) من الهواء النظري أو (١٠ ٪ عجز أو نقص في الهواء Deficiency air) ، تكون درجة حرارة اللهب الأديباتية الناتجة (١٩٣٦ درجة مئوية) .

ملاحظات توضيحية :

- درجة حرارة اللهب الأديباتية دائما تكون أقصى ما يمكن عندما يتم حرق الوقود بكمية نظرية من الهواء
- في الحالة (ب) درجة حرارة اللهب الأديباتية منخفضة للغاية بسبب الهواء الزائد Excess air المستخدم والذي هو أربعة أضعاف كمية الهواء اللازمة للإحتراق الكامل .

يوضح الجدول التالي بعض درجات حرارة اللهب لبعض أنواع الوقود الشائعة (على أساس الحجم الثابت Constant volume basis) وأيضا مقارنة بين إستخدام الهواء أو الأوكسجين كمؤكسد للإحتراق :

Fuel	Oxidizer	Adiabatic flame temperature(°C)
Acetylene (C_2H_2)	air	2,500
Acetylene (C_2H_2)	Oxygen	3,100
Butane (C_4H_{10})	air	1,970
Butane (C_4H_{10})	Oxygen	2,718
Methane (CH_4)	air	1,950
Natural gas	air	~1,950
Propane (C_3H_8)	air	1,980
Propane (C_3H_8)	Oxygen	2,526

١٧- القيمة الحرارية للوقود Heating Value of the Fuel :
الكمية الإجمالية للحرارة المتحررة عند إحتراق الوقود بشكل كامل ويتم إرجاع منتجات (نواتج) الإحتراق إلى درجة حرارتها قبل أن يتم حرقها .

١٨ - القيمة الحرارية العُليا للوقود Higher Heating Value of the Fuel (HHV) :
الكمية الإجمالية للحرارة المتحررة عند إحتراق الوقود بشكل كامل ويكون الماء في المنتج بهيئة سائل Liquid .

١٩ - القيمة الحرارية الدُنيا للوقود Lower Heating Value of the Fuel (LHV) :
الكمية الإجمالية للحرارة المتحررة عند إحتراق الوقود بشكل كامل ويكون الماء في المنتج بهيئة بخار Vapor .
معظم تحاليل محطات الطاقة Power plants analysis تعتمد على LHV وليس HHV .
إن العلاقة بين HHV و LHV هي : $\mathbf{HHV = LHV + m * h_{fg}}$
m (كغ Kg) = كتلة الماء من منتجات الإحتراق .

h_{fg} (كيلوجول\كيلوغرام KJ/Kg) = الحرارة الكامنة لتبخيرالماء Latent heat of vaporization of the water عند درجة حرارة المنتجات (نواتج الإحتراق) .

Fuel	Energy content kJ/L	Gasoline equivalence,* L/L-gasoline
Gasoline	31,850	1
Light diesel	33,170	0.96
Heavy diesel	35,800	0.89
LPG (Liquefied petroleum gas, primarily propane)	23,410	1.36
Ethanol (or ethyl alcohol)	29,420	1.08
Methanol (or methyl alcohol)	18,210	1.75
CNG (Compressed natural gas, primarily methane, at 200 atm)	8,080	3.94
LNG (Liquefied natural gas, primarily methane)	20,490	1.55

Amount of fuel whose energy content is equal to the energy content of 1-L gasoline.

جدول يبين القيم الحرارية للوقود مقارنة بالبنزين (الكازولين)
Table(3) Calorific vales for fuels compared to gasoline

Element	Chemical Symbol	Atomic Weight
Carbon	C	12
Hydrogen	H	1
Nitrogen	N	14
Oxygen	O	16
Sulphur	S	32

جدول يبين الوزن الذري Atomic weight لبعض المواد (العناصر)

Fuel (phase)	Formula	Molar mass, kg/kmol	Density[1], kg/L	Enthalpy of vaporization[2], kJ/kg	Specific heat[1], C_p kJ/kg · C	Higher heating value[3], kJ/kg	Lower heating value[3], kJ/kg
Carbon (*s*)	C	12.011	2	—	0.708	32,800	32,800
Hydrogen (*g*)	H_2	2.016	—	—	14.4	141,800	120,000
Carbon monoxide (*g*)	CO	28.013	—	—	1.05	10,100	10,100
Methane (*g*)	CH_4	16.043	—	509	2.20	55,530	50,050
Methanol (ℓ)	CH_4O	32.042	0.790	1168	2.53	22,660	19,920
Acetylene (*g*)	C_2H_2	26.038	—	—	1.69	49,970	48,280
Ethane (*g*)	C_2H_6	30.070	—	172	1.75	51,900	47,520
Ethanol (ℓ)	C_2H_6O	46.069	0.790	919	2.44	29,670	26,810
Propane (ℓ)	C_3H_8	44.097	0.500	420	2.77	50,330	46,340
Butane (ℓ)	C_4H_{10}	58.123	0.579	362	2.42	49,150	45,370
1-Pentene (ℓ)	C_5H_{10}	70.134	0.641	363	2.20	47,760	44,630
Isopentane (ℓ)	C_5H_{12}	72.150	0.626	—	2.32	48,570	44,910
Benzene (ℓ)	C_6H_6	78.114	0.877	433	1.72	41,800	40,100
Hexene (ℓ)	C_6H_{12}	84.161	0.673	392	1.84	47,500	44,400
Hexane (ℓ)	C_6H_{14}	86.177	0.660	366	2.27	48,310	44,740
Toluene (ℓ)	C_7H_8	92.141	0.867	412	1.71	42,400	40,500
Heptane (ℓ)	C_7H_{16}	100.204	0.684	365	2.24	48,100	44,600
Octane (ℓ)	C_8H_{18}	114.231	0.703	363	2.23	47,890	44,430
Decane (ℓ)	$C_{10}H_{22}$	142.285	0.730	361	2.21	47,640	44,240
Gasoline (ℓ)	$C_nH_{1.87n}$	100–110	0.72–0.78	350	2.4	47,300	44,000
Light diesel (ℓ)	$C_nH_{1.8n}$	170	0.78–0.84	270	2.2	46,100	43,200
Heavy diesel (ℓ)	$C_nH_{1.7n}$	200	0.82–0.88	230	1.9	45,500	42,800
Natural gas (*g*)	$C_nH_{3.8n}N_{0.1n}$	18	—	—	2	50,000	45,000

[1]At 1 atm and 20°C.

[2]At 25°C for liquid fuels, and 1 atm and normal boiling temperature for gaseous fuels.

[3]At 25°C. Multiply by molar mass to obtain heating values in kJ/kmol.

جدول يبين القيم الحرارية Calorific vales لأنواع الوقود الشائعة

	Coal*	Oil	Gas
Carbon	77.0	85.1	74.0
Hydrogen	5.5	10.9	24.0
Gross calorific value (kJ/kg)	25 586	42 333	53 498
Weight of water vapour in combustion products (kg/kg of fuel)	0.59	0.98	2.17
Weight of wet combustion products (kg/kg of fuel)	9.55	14.60	17.24

جدول يبين تركيب أنواع الوقود الشائعة

٢٠ - نسبة الهواء \ الوقود Air/ Fuel Ratio :
هي نسبة كتلة الهواء إلى كتلة الوقود لعملية الإحتراق . يتم إستخدامها لتحديد مقدار كمية الهواء (كغم) اللازم لحرق (١ كغم) من الوقود المختار . تقلل نسبة (الهواء \ الوقود) العالية من درجة حرارة اللهب (زيادة خسائر غازات العادم Flue gas losses) والعكس صحيح . لذا يجب أن يتم الإختيار الدقيق لهذه النسبة لغرض التغلب على عملية الإحتراق غير الكامل .
مثال : $CH_4 + O_2 = CO_2 + H_2O$
المعادلة بعد التوازن Balancing : $CH_4 + 2O_2 = CO_2 + 2H_2O$
الإحتراق المتكافىء (كميات بنسب متكافئة) Stoichiometric combustion يعني :
(١ كيلو مول Kilo mole) من الميثان CH_4 عند إتحاده تماما مع (٢ كيلو مول) من الأوكسجين O_2 سينتج (١ كيلو مول Kilo mole) من ثاني أوكسيد الكاربون CO_2 + (٢ كيلو مول) من الماء H_2O .

$$N=m/M$$

حيث أن :
N = عدد الكيلو مولات Kilo moles (Kmol) .
m = الكتلة Mass (كغم Kg) .
M = الكتلة الجزيئية Molecular mass (كغم\كيلومول Kg / Kmol) .
أ - كتلة (CH_4) = M * N = ١ * [(٤ * ١) + (١٢)] = ١٦ كغم CH_4
١ كيلومول (CH_4) = ١٦ كغم من CH_4
ب - كتلة (O_2) اللازمة في عملية الإحتراق = ٢ * [(١٦ * ٢)] = ٦٤ كغم من O_2
الهواء يتكون من (٢١ ٪) من الأوكسجين لذلك كمية الهواء التي نحتاجها هي :
٦٤ * (١٠٠\٢١) = ٣٠٥ كغم من الهواء النظري مطلوب لحرق ١٦ كغم من الميثان
نسبة الهواء \ الوقود = كتلة الهواء \ كتلة الوقود = ٣٠٥\١٦ = ١٩
لذلك لغرض إحتراق كلي كامل لكل (١ كغم من CH4) ، نحتاج إلى (١٩ كغم) من الهواء (الهواء النظري) .

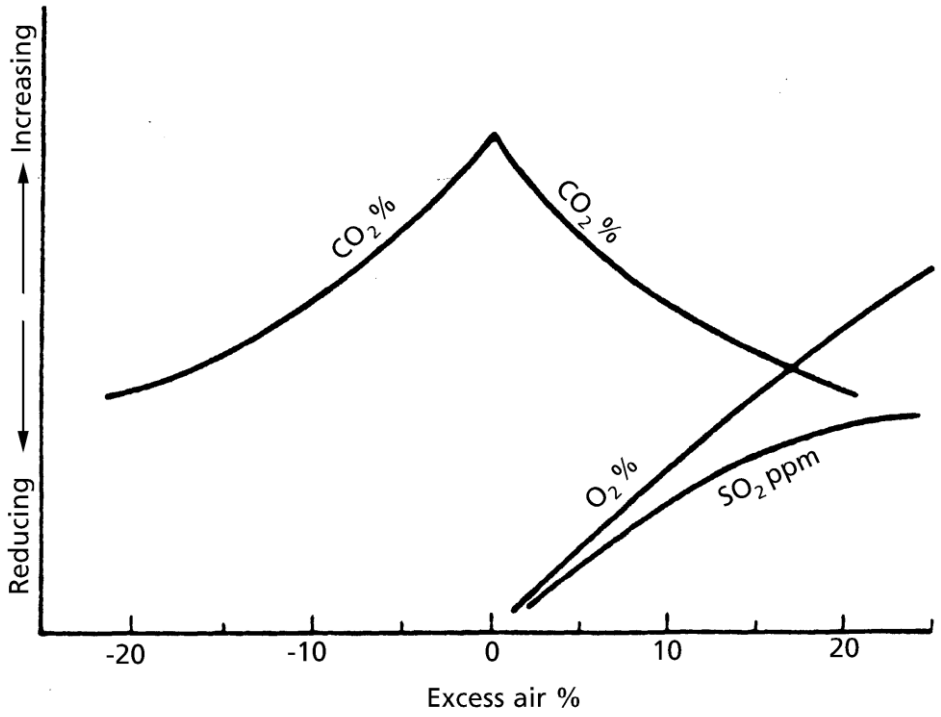
٢١- نسبة الهواء الزائد (λ) Excess Air Ratio :
هي نسبة الهواء المتاح Available air عبر (فوق) الهواء النظري ، وهي عامل تصميم Design parameter مهم جدا لتحليل الإحتراق .
لا توجد عملية إحتراق مثالية لدرجة أنها تحتاج فقط للهواء النظري للإحتراق الكامل ، فكل عمليات الإحتراق تتطلب هواء زائد (فائض) لضمان الإحتراق الكامل ، إضافة إلى أن توفير هواء زائد للإحتراق يمكن أن يقلل من درجة حرارة المنتجات القابلة للإحتراق Combustible products إلى درجة الحرارة المطلوبة .

نسبة الهواء الزائد (λ) = الهواء المتاح \ الهواء المطلوب للإحتراق الكامل

$$\text{Excess Air Ratio } \lambda = \frac{\text{air available}}{\text{air required for complete combustion}}$$

لاحظ أن عملية الإحتراق التي تستخدم الكمية النظرية من الهواء سيكون لها نسبة فائضة من الهواء (λ = ١) .

ومن المعروف أن التوربين الغازي لديه نسبة عالية جدا من الهواء الزائد (سيمنز SIEMENS V94.2 لديه نسبة هواء زائد بمعدل (**λ = ٢،١**) وبالتالي هواء العادم من المدخنة) .
إذا تم إستخدام (١٩ كغم) هواء لعملية إحتراق (١ كغم) ميثان Methane عندئذ يكون نسبة الهواء الزائد (**λ = ١**) .



الشكل (٧٥) تأثير الهواء الزائد على نواتج الإحتراق

متطلبات الإحتراق الجيد Requirements for a good combustion

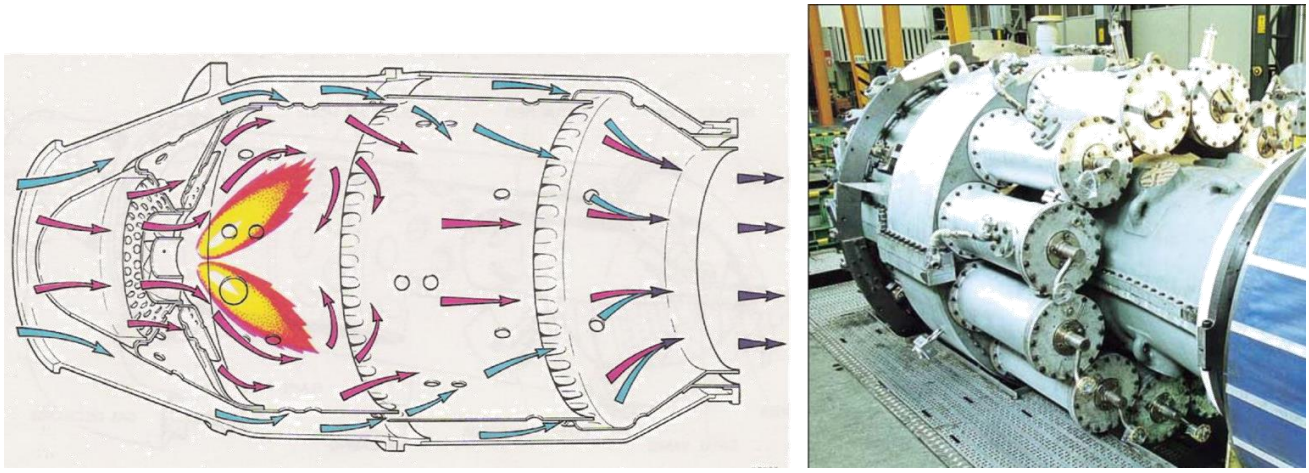
الإحتراق الجيد يتطلب :
أ - الخلط الجيد بين الوقود والهواء .
ب - يجب أن تتم عملية الإحتراق بكمية زائدة من الهواء لضمان الإحتراق الكامل .
ج - يجب حرق منتجات (نواتج) الإحتراق بالكامل للحد من التلوث Pollution .
د - يجب تجنب ترسبات الكربون Carbon deposits على المشاعل Burners .
هـ - يجب تقليل خسائر ضغط الهواء الذي يدخل غرفة الإحتراق .
و - يجب أن يكون الإحتراق في أصغر مساحة ممكنة (لتقليل خسائر إنتقال الحرارة بالإشعاع Radiation heat transfer losses) .
ي - يجب أن يكون الإحتراق مستقرا Stable مع توزيع منتظم ومتماثل لدرجة الحرارة Uniform temperature distribution .

العوامل المهمة لبدء الإحتراق The important factors for combustion to start

لكي يحدث الإحتراق ، هناك أربعة شروط أساسية يجب استيفاؤها وهي :
أ - وجود الأوكسجين :
في كيمياء الإحتراق chemistry of burning or combustion ، نطلب من الوقود أن يتحد مع الأوكسجين لذلك ، إذا لم يكن هناك أي أوكسجين ، فلن يحدث إحتراق . في الحالة العملية ، مصدر الأوكسجين هو الهواء الذي يحتوي على (٢١ ٪ أوكسجين) من حيث الحجم ومتاح بسهولة .
ب - درجة الحرارة الملائمة (الصحيحة) :
سوف يشتعل الوقود فقط إذا أرتفعت درجة حرارته فوق درجة حرارة الإشتعال الذاتي Self ignition temperature بوجود الأوكسجين .
ج- وجود مصدر للإشتعال Source of ignition :
لا يمكن أن تحدث عملية الإحتراق إلا عندما يتم إشعال الوقود ، بوجود الأوكسجين وعند درجة حرارة الإشتعال Ignition temperature أو فوقها ، بواسطة مصدر إشعال ، يمكن أن يكون هذا المصدر شرارة Spark أو شعلة Flame أو جمرات متوهجة Glowing embers أو معدن ساخن أحمر Red hot metal . يمكن أن تكون طريقة أخرى لإشتعال الوقود وذلك بضغط عالي جدا لخليط من الهواء والوقود إلى أن تزداد درجة حرارة الخليط فوق درجة حرارة إشتعال الوقود .
د- النسبة المئوية للوقود في الهواء ضمن النطاق أو المدى المناسب للإحتراق :
الغاز الطبيعي Natural gas سوف يحترق فقط إذا كانت نسبة الغاز في الهواء ما بين (٥ ٪ إلى ١٥ ٪) من حيث الحجم ، وبالنسبة للهيدروجين Hydrogen النسبة (٤ ٪ إلى ٧٦ ٪) من حيث الحجم .

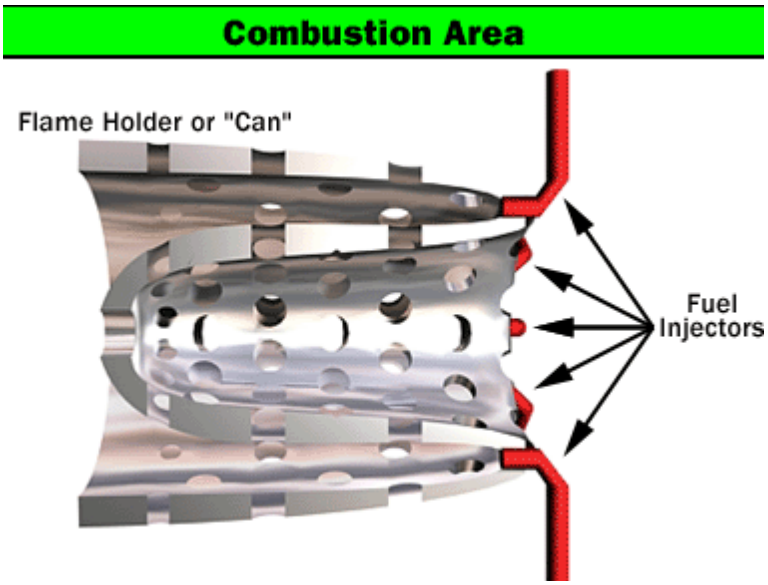
أنواع غرف الإحتراق المستخدمة في التوربين الغازي
Types of combustion chamber which are used in gas turbines

١- غرفة إحتراق نوع العلبة Can type وهي عبارة عن حاوية معدنية أسطوانية cylindrical metal container .



الشكل (٧٦) غرفة إحتراق نوع العلبة . الأسهم الحمراء تمثل الهواء المستخدم للإحتراق والأسهم الزرقاء تمثل هواء التبريد Cooling air

يجب إستخدام حامل الشعلة أو اللهب Flame holder في غرفة الإحتراق لتجنب إطفاء اللهب بسبب تدفق هواء التفريغ Discharge air flow . حامل اللهب هو قطعة معدنية مجوفة و مثقبة Hollow perforated piece of metal .

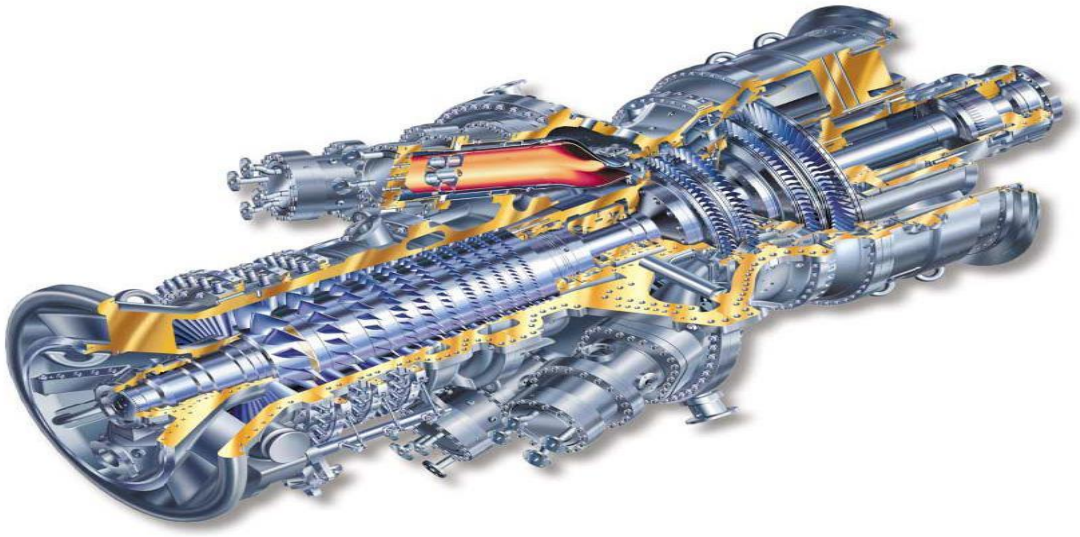


الشكل (٧٧) حامل اللهب أو الشعلة Flame holder

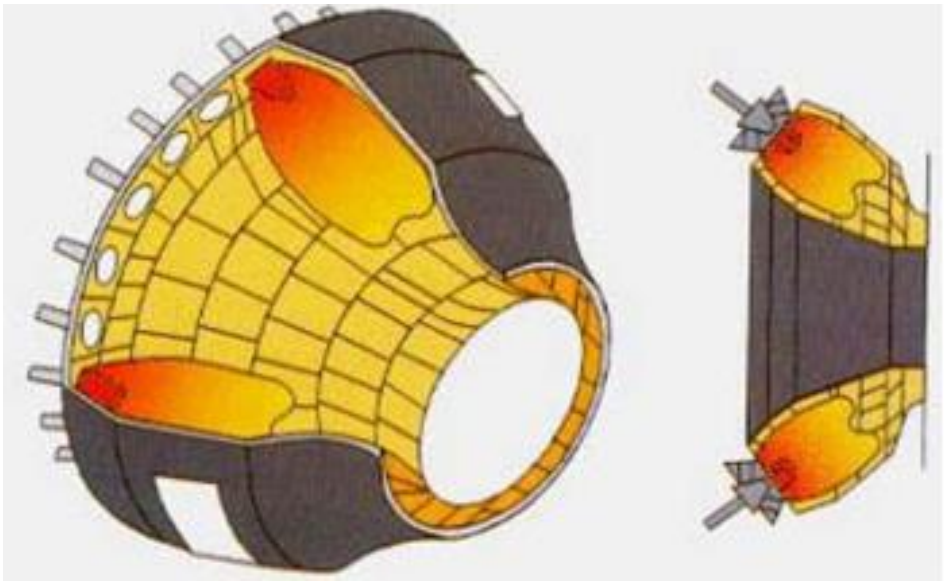
مزايا ومساوىء غرف الإحتراق نوع العلبة
Avantages & Disadvantages of Can type Combustors

ت	المزايا	المساوىء
١	خفيفة الوزن وصغيرة الحجم ، لذلك تُستخدم في الطائرات والمركبات الجوية الأخرى Aircraft	خسائر الضغط العالي High pressure losses
٢	تحيط بالتوربين الغازي والتي تُقلل من أبعاد الماكينة وتُحسن الشكل الإنسيابي للمحرك النفاث Aerodynamic shape of the jet engine	اختلال تشغيل أو سوء أداء إحدى العُلب ، يمكن أن يؤدي إلى تضرر التوربين بسبب عدم إنتظام توزيع الحرارة Heat distribution will disturbed
٣	سهولة صيانتها Easy in maintenance	توزيع غير متساوي للحرارة Uneven heat distribution
٤	خسائر إنتقال الحرارة بالإشعاع تكون بأدنى حد Minimum radiation heat transfer losses	أكثر ملاءمة لضاغط الطرد المركزي Centrifugal compressor حيث ينقسم التدفق إلى تيارات (خطوط جريان) منفصلة في النواشر Diffusers .

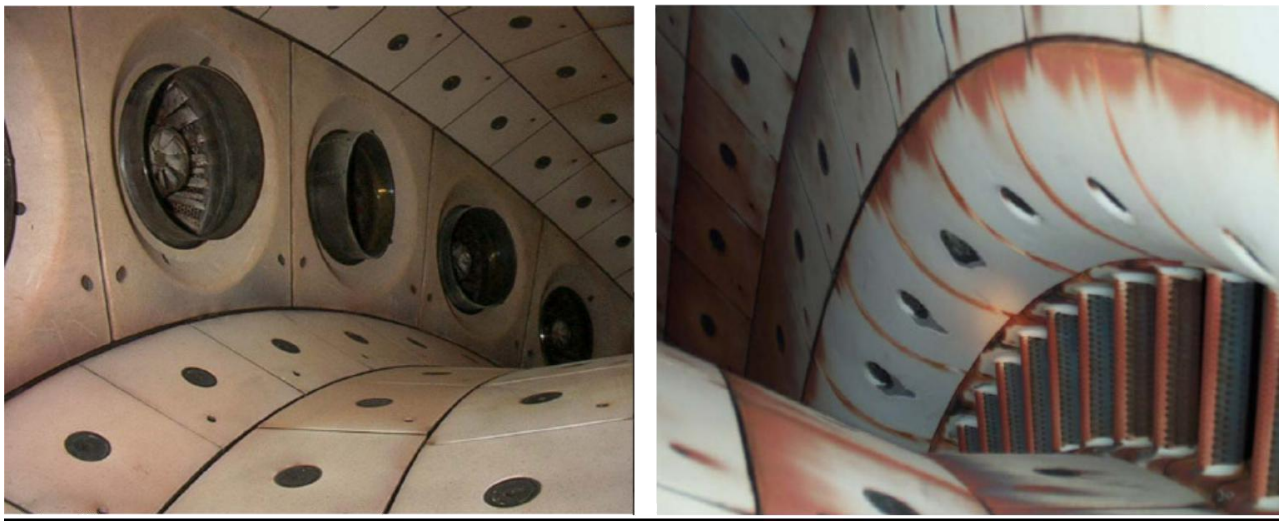
٢- غرفة إحتراق نوع حلقي Annular type



الشكل (٧٨) توربين غازي نوع GE مع غرف إحتراق نوع حلقي
GE-gas turbine with annular type combustors



الشكل (٧٩) غرفة إحتراق نوع حلقي ، يظهر فيها أنبوب اللهب (طبقة خزفية أو سيراميكية)
Annular type-Combustion Chamber, Flame tube is shown (ceramic layer)



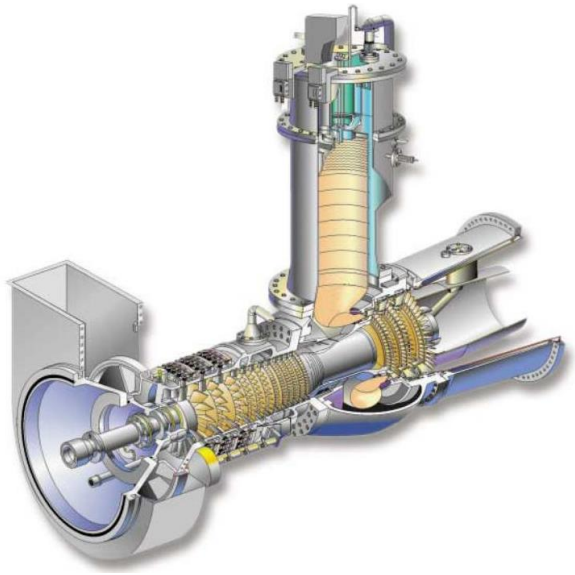
الشكل (٨٠) المرحلة الأولى First stage لتوربين غازي ذو غرف إحتراق من النوع الحلقي

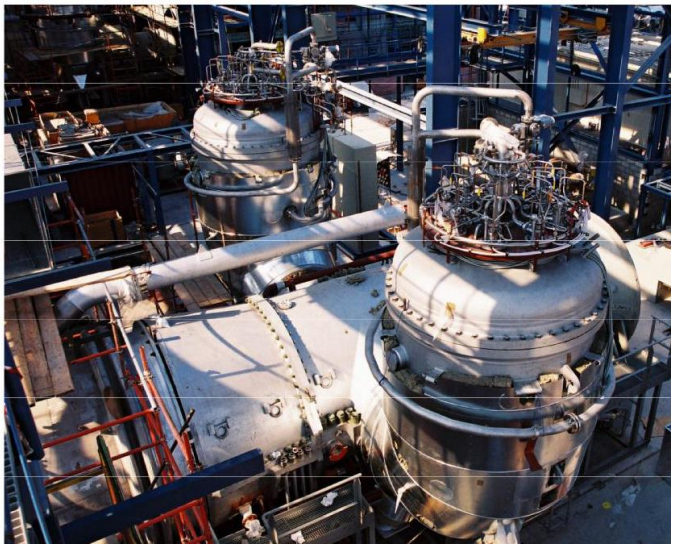
مزايا ومساوىء غرف الإحتراق من النوع الحلقي
Advantages & Disadvantages of Annular type Combustors

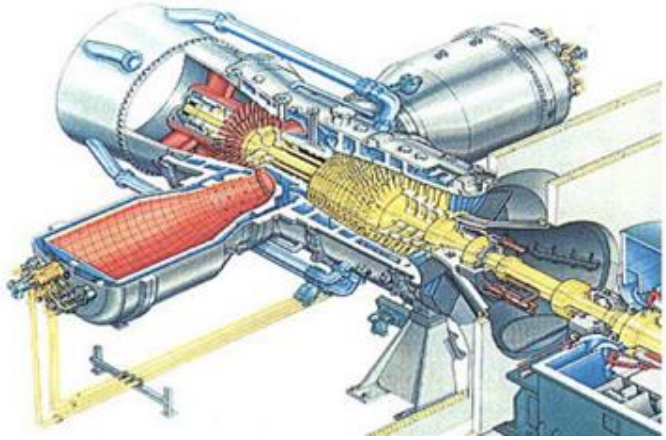
ت	المزايا	المساوىء
١	إحاطة كاملة بالتوربين الغازي	التوربين يعاني من الحرارة لتعرض ريش التوربين إلى اللهب Flame (إنتقال الحرارة عن طريق الإشعاع Heat transfer by radiation) مما يقلل من دورة حياة التوربين Life cycle أو العمر التشغيلي للتوربين Operational lifetime
٢	تقل خسائر الضغط	تكسر أية كتلة سيراميكية (خزفية) Ceramic block داخل غرفة الإحتراق سوف تصيب وترتطم مباشرة بريش التوربين Turbine blades مسببة فشل كارثي Catastrophic failure لأجزاء التوربين .
٣	تقل حجم الماكينة	إمكانية إحتراق أجزاء التوربين وتعرضها لأضرار بالغة
٤	توزيع منتظم للحرارة (درجة حرارة دخول التوربين Turbine inlet temperature)	إحتمالية كبيرة في تعرض ثقوب التبريد Cooling holes في جدار أنبوب اللهب Flame tube إلى إنسداد Blockage
٥	تقدم أفضل شكل إنسيابي Aerodynamic shape لمحرك التوربين الغازي لذلك هي الأكثر إستخداما في الطائرات والمركبات الجوية	صعوبة الصيانة

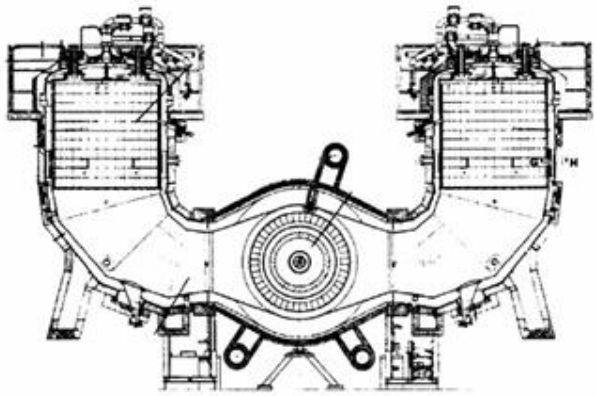
٣ – غرفة إحتراق نوع صومعي (أسطواني) Silo type (Cylindrical)

يشتمل هذا النوع على تكوينين أو شكلين أساسيين : غرفة إحتراق أحادية Single combustor وغرفة إحتراق مزدوجة Double combustor .









الشكل (٨١) أشكال مختلفة لغرف الإحتراق من النوع الصومعي

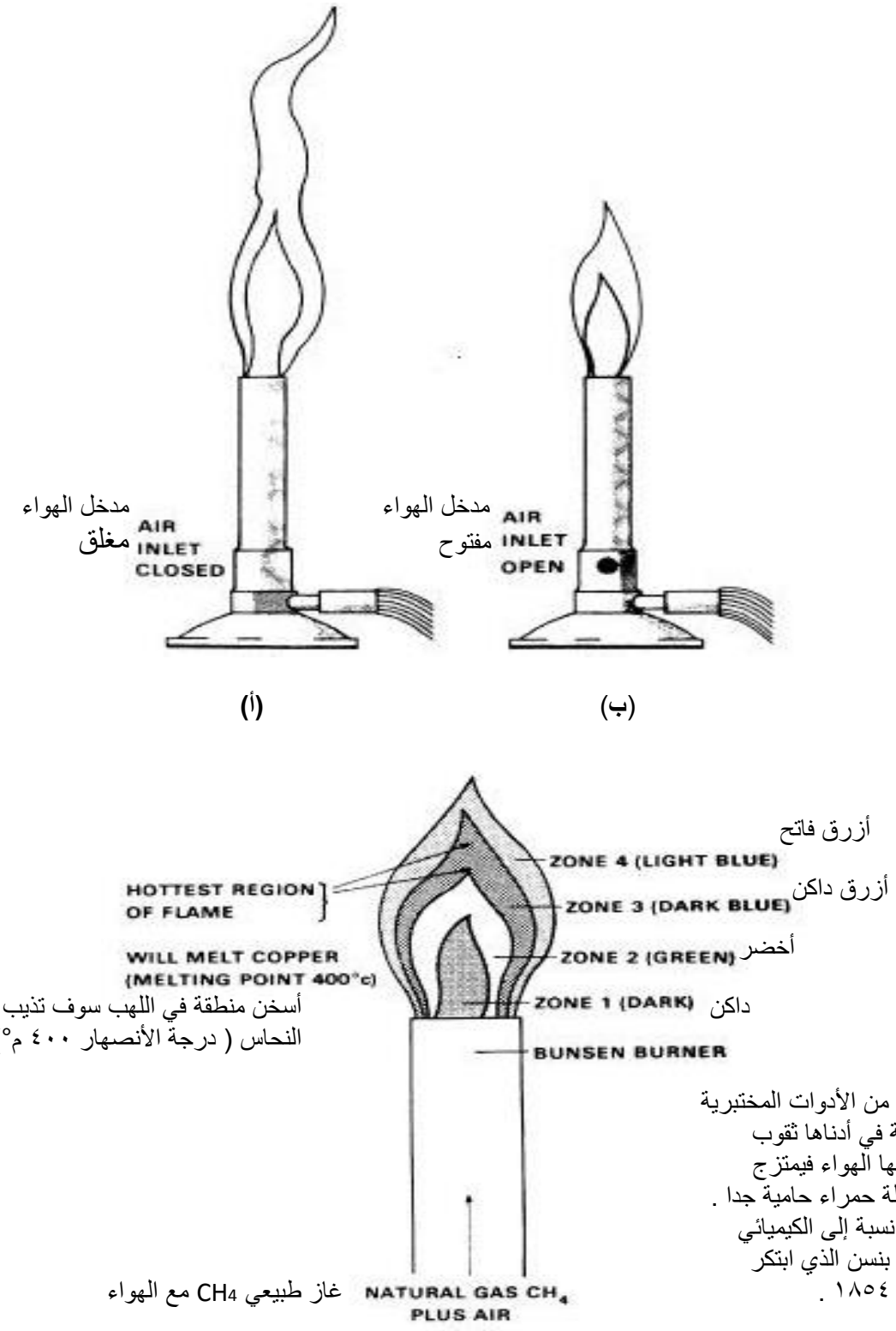
مزايا ومساوىء غرف الإحتراق من النوع الأسطواني
Advantages & Disadvantages of Silo type Combustors

ت	المزايا	المساوىء
١	أدنى خسائر ضغط	حجم كبير ينتج خسائر أكبر في إنتقال الحرارة بالإشعاع
٢	سهولة الصيانة	غير مناسبة لمحركات الطائرات والمركبات الجوية
٣	كفاءة أعلى و دورة حياة طويلة Higher efficiency &Long life	مستوى ضوضاء أعلى Higher noise level
٤	متصل بالتوربين عن طريق فلنجة Flange واحدة لتقليل إنتقال الحرارة بالتوصيل Heat transfer by conduction	تشغل حجم أكبر بكثير مقارنة بالنوع الحلقي أو العلبة
٥	يتم إجراء عملية الإحتراق بدرجة حرارة أقل (إنبعاثات أقل لأكاسيد النيتروجين NOx emissions) .	يتطلب المزيد من أنابيب الوقود Fuel piping

الأجزاء الرئيسية لغرفة الإحتراق Main parts of combustion chamber

تتكون غرفة الإحتراق بشكل رئيسي من :
١- غلاف الحارقة Combustor Casing
٢- حامل اللهب Flame holder
٣- القداحات (أجهزة الإشعال) Igniters (توفير شرارة الإشعال Ignition spark)
٤- أنبوب اللهب Flame Tube (يقلل من إنتقال الحرارة بالإشعاع ويوزع تدفق الهواء بين المناطق الأساسية والتخفيف Primary & dilution zones)
٥- المشاعل أو الحارقات Burners
٦ – صمامات و أنابيب تغذية الوقود Fuel supply valves & piping
٧ – كاشف اللهب Flame detector

يمكن وصف أهمية الخلط أو المزج الجيد بين الوقود والهواء من خلال المثال في الشكل (٨٢ - أ) :
إذا كان مدخل الهواء Air inlet في الجزء السفلي من المشعل Burner مغلقا ، فسوف يُنتج عنه لهب طويل Long flame ، النقطة (أ) . وإذا تم فتح المدخل بحيث يتم خلط الهواء والغاز بشكل كامل قبل ترك المشعل ، سيتم إنتاج لهب قصير وحاد Short & sharp flame ، النقطة (ب) . مناطق اللهب Zones of the flame ظاهرة في النقطة (ج) .



مشعل بنسن هو من الأدوات المختبرية متكونة من أنبوبة في أدناها ثقوب صغيرة يدخل إليها الهواء فيمتزج بالغاز محدثا شعلة حمراء حامية جدا . سمي بهذا الاسم نسبة إلى الكيميائي الألماني روبرت بنسن الذي ابتكر تصميمه في عام ١٨٥٤ .

الشكل (٨٢ - أ) مشعل بنسن Bunsen Burner

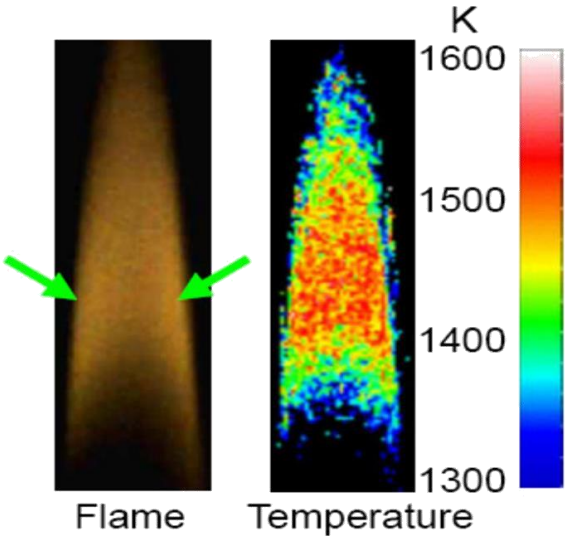
النقاط المهمة في عملية الإحتراق Important points in a combustion process

١ – لون اللهب Flame Colour :

إن الألوان المختلفة في اللهب هي بسبب الإختلاف في درجة حرارة الجزيئات أو الجسيمات Particles ، كلما ارتفعت درجة حرارة الجزيئات ، يكون لون اللهب أكثر بياضا .

Colour اللون	درجة الحرارة م° Temperature °C
Dazzling ساطع ، وهاج	١٩٠٠
White أبيض	١٢٠٠
Light yellow أصفر فاتح	١٠٨٠
Yellow أصفر	٩٩٥
Orange برتقالي	٩٤٠
Salmon برتقالي باهت	٩٠٠
Bright red أحمر ساطع	٨٤٥
Cherry كرزي فاتح	٧٤٥
Medium cherry كرزي متوسط	٦٨٠
Dark cherry كرزي داكن	٦٣٥
Dark red أحمر داكن	٥٦٥
Red just visible أحمر مرئي	٥٠٠

جدول يبين العلاقة بين لون اللهب ودرجة الحرارة
Relation between flame color & temperature



الشكل (٨٢- ب) توزيع درجة حرارة لهب الشمعة
Temperature distribution of candle flame

بالنسبة لإحتراق كمية معينة من الوقود سريع التبخر أو التطاير Volatile fuel ، فإن اللهب القصير Short flame سيعني عموما أن الإحتراق سريع وكامل ، واللهب الأطول يعني أن الإحتراق بطيء Delayed combustion والشعلة الطويلة جدا تعني أن الإحتراق سيئ Poor combustion .
هناك علاقة بين لون اللهب ودرجة حرارته . و إذا تم أيضا الأخذ بنظر الإعتبار طول اللهب ، عندئذ يمكن فهم و معرفة اللهب بشكل أفضل . (الرجوع إلى جدول القيم الحرارية Calorific vales لأنواع الوقود الشائعة) .

٢- سرعة اللهب (الشعلة) والإشتعال المبكر أو العكسي Flame Speed and Back Firing :

تخيل أنبوب يحتوي على خليط قابل للاشتعال Flammable mixture من الغاز والهواء . إذا أشتعل الخليط في أحد طرفي الأنبوب ، فإن اللهب سوف ينتقل خلال الخليط في البداية بسرعة ثابتة Constant velocity ، ثم في ظروف مناسبة سينتقل بسرعة متزايدة . هذا هو الحال بشكل خاص إذا كان هنالك إضطراب Turbulence .

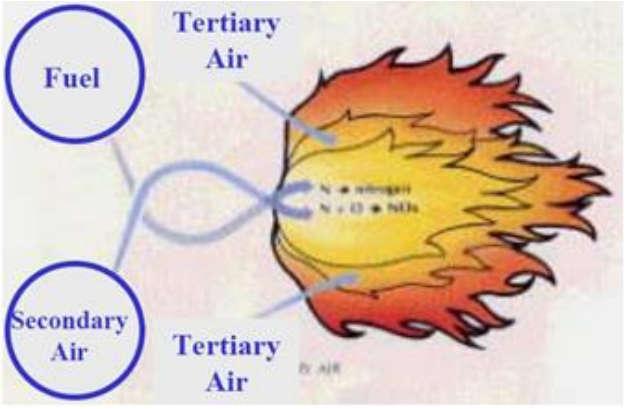
لقد تم تحديده تجريبيا أن للهيدروجين Hydrogen سرعة لهب حوالي سبعة أضعاف من كل من أول أكسيد الكربون والميثان Carbon Monoxide and Methane . إن الأهمية في تجربة ومعرفة هذه السرعات المختلفة لإنتشار أو تمدد اللهب Flame propagation هي أنها تحدد ميل اللهب للإشتعال المبكر أو العكسي (إشتعال الوقود قبل الأوان) Back fire .
إذا كانت سرعة دخول الوقود إلى الفرن Furnace مماثلة لسرعة إنتشار اللهب ، فإن نقطة الإشتعال ستبقى على مسافة محددة من المشعل Burner . ومع ذلك ، إذا تجاوزت سرعة الإنتشار العكسي أو الخلفي للهب سرعة تدفق خليط الهواء \ الوقود ، فسيحدث إشتعال عكسي (إرتداد اللهب) . الوقود الغني بالهيدروجين يميل إلى الإشتعال العكسي لأن للهبها سرعة إنتشار عالية .
لا تتغير سرعة الهواء عادة مع حمل التوربين الغازي Gas turbine load لأن الضاغط يعمل بسرعة ثابتة .
يعتمد معدل إحتراق الوقود و كفاءة عملية الإحتراق Efficiency of the burning على كل من الوقت ودرجة الحرارة و الإضطراب .

ملاحظة توضيحية : سرعة اللهب Flame speed هي معدل قياس تمدد جبهة اللهب في تفاعل الإحتراق Combustion reaction . يُفرق مختصو الإحتراق بين سرعة اللهب الرقائقي Laminar flame speed وسرعة اللهب المضطربة Turbulent flame speed . يتم قياس سرعة اللهب عادة بمعدل (متر / ثانية ، سنتمتر / ثانية m/s, cm/s) إلخ .

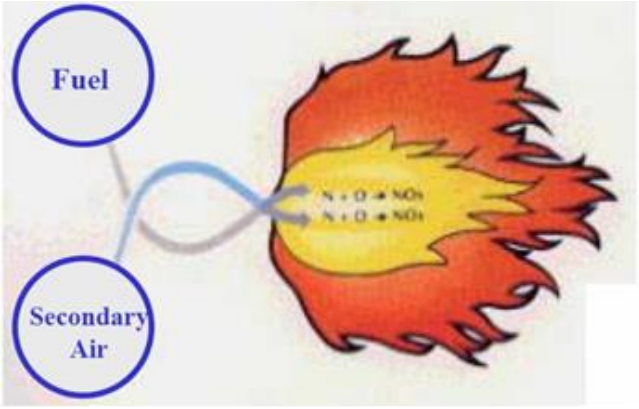
الأشكال المختلفة للشعلة أثناء الإحتراق

Different configurations of the flame during combustion process

يحدث الإحتراق الفعلي Actual burning في شكلين رئيسيين :
١ - شعلة ذات إنتشار رقائقي (طباقي ، صفائحي) Laminar diffusion flame ، حيث يتم تشكيل صفيحة من اللهب بين الوقود والهواء. يمكن رؤية هذا النوع من الإحتراق في لهب الشمعة Candle flame ، ويحدث حول قطيرة الوقود (قطرة صغيرة من الوقود) Fuel droplet . (لهب منتشر DIFFUSION FLAME) .
٢ - النوع الثاني هو اللهب الطباقي الممزوج مسبقا Pre-mixed laminar flame ، والذي يحدث عندما يتم خلط الوقود والهواء معا مسبقا قبل حرق الوقود . (PREMIX FLAME) ، لاحظ أن اللهب الممزوج مسبقا (PREMIX FLAME) يشتمل على مرحلة هواء ثالثة Tertiary air يساعد على تقليل درجة حرارة ذروة اللهب Flame peak temperature مع تقليل إنبعاثات أكاسيد النيتروجين NOx emission .



الشكل (٨٣) اللهب الممزوج مسبقا Premix Flame



الشكل (٨٤) اللهب المنتشر Diffusion Flame

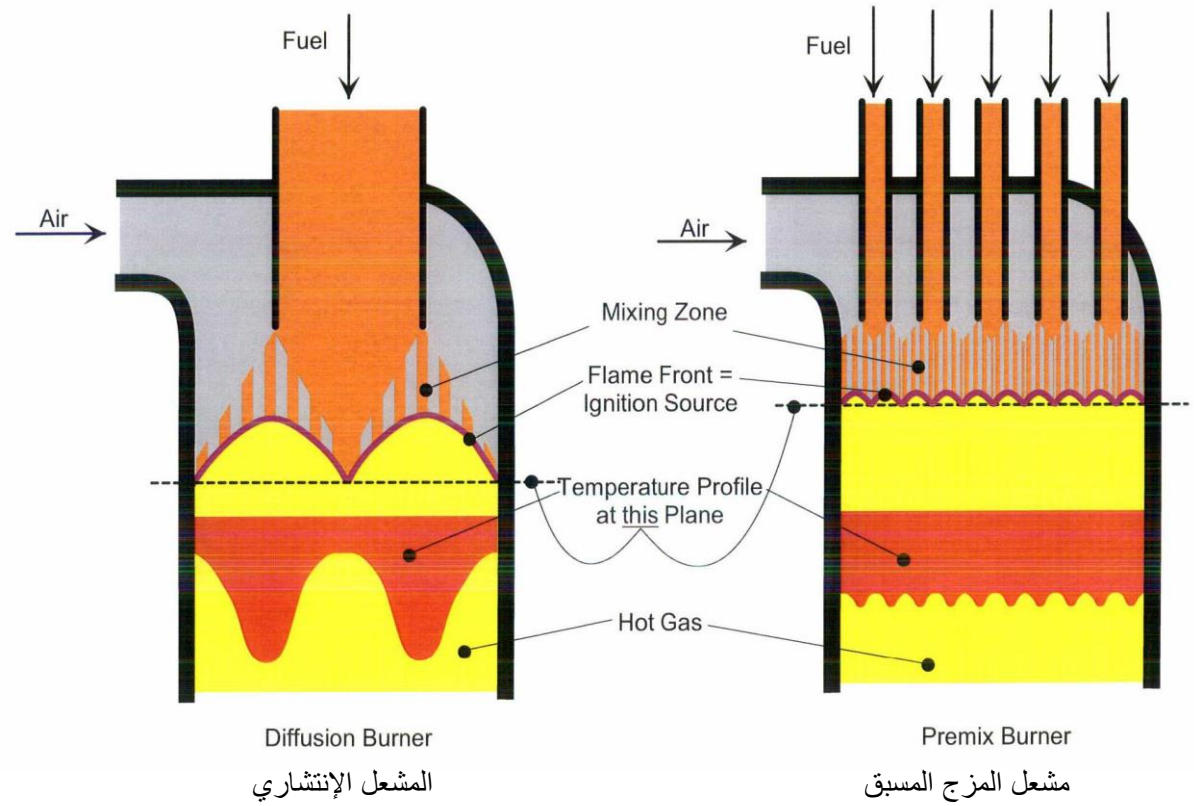
التوربينات الغازية الحديثة لها مشاعل مركبة (هجينة) Hybrid burners في غرف الإحتراق ، هذه المشاعل المركبة لها لهبان مختلفان في مشعل واحد ، اللهب الإنتشاري و اللهب الممزوج مسبقا ، كل شعلة يتم تزويدها بالوقود بواسطة أنابيب منفردة خاصة Individual pipes .

عندما يستخدم التوربين الغازي اللهب الإنتشاري ، يُقال أن التوربين الغازي تحت **وضع الإنتشار Diffusion Mode** ، وعندما يستخدم اللهب الممزوج مسبقا ، فإن التوربين الغازي يُقال إنه تحت **وضع الخلط أو المزج المسبق Premix Mode** .

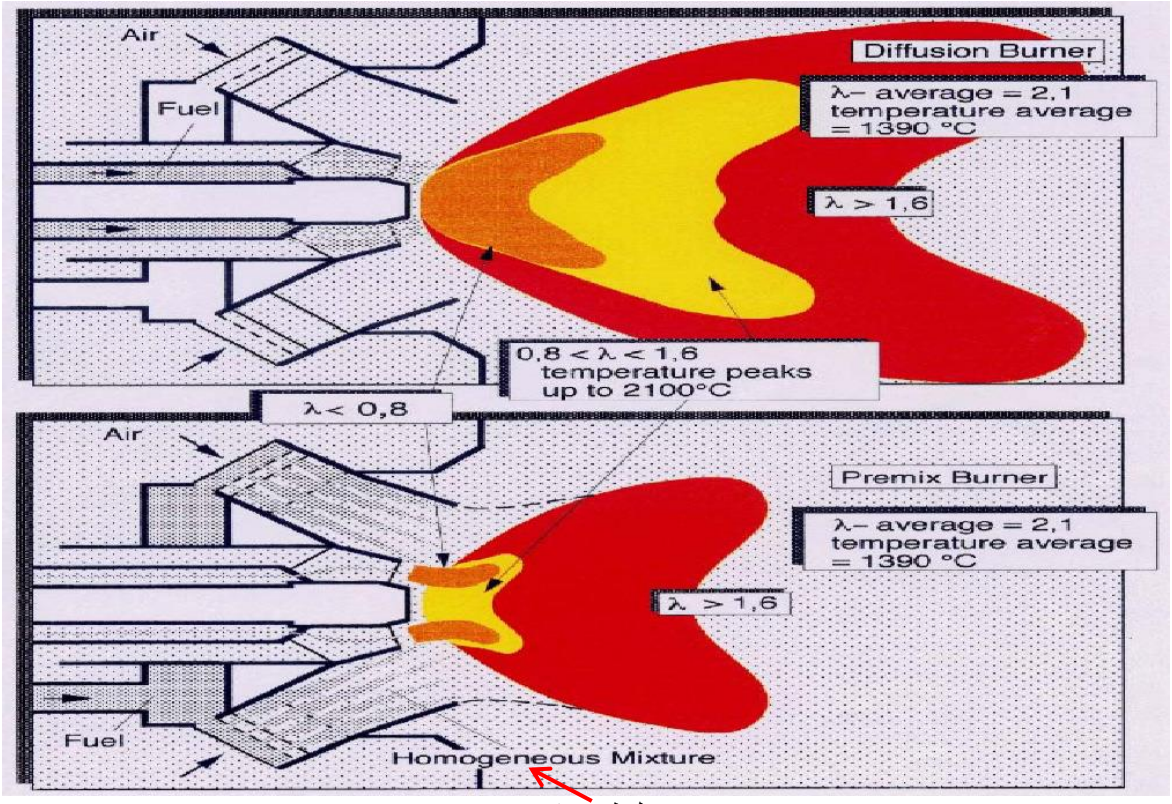
كلتا الشعلتان تستهلكان نفس كمية الوقود عند حمل معين Given load ، لكن الفرق بينهما يكمن في طريقة أو أسلوب خلط الهواء والوقود .

يختار المصممون اللهب الممزوج مسبقا باعتباره الشعلة الرئيسية للتوربين الغازي العامل كحمل أساس Gas turbine base load operation بسبب انخفاض مستوى أكاسيد النيتروجين NOx level في هذه اللهب .

الخصائص الرئيسية لهذه الشعلات موضحة في الجدول التالي :



الشكل (٨٥- أ) مقارنة بين اللهب الإنتشاري واللهب الممزوج مسبقا



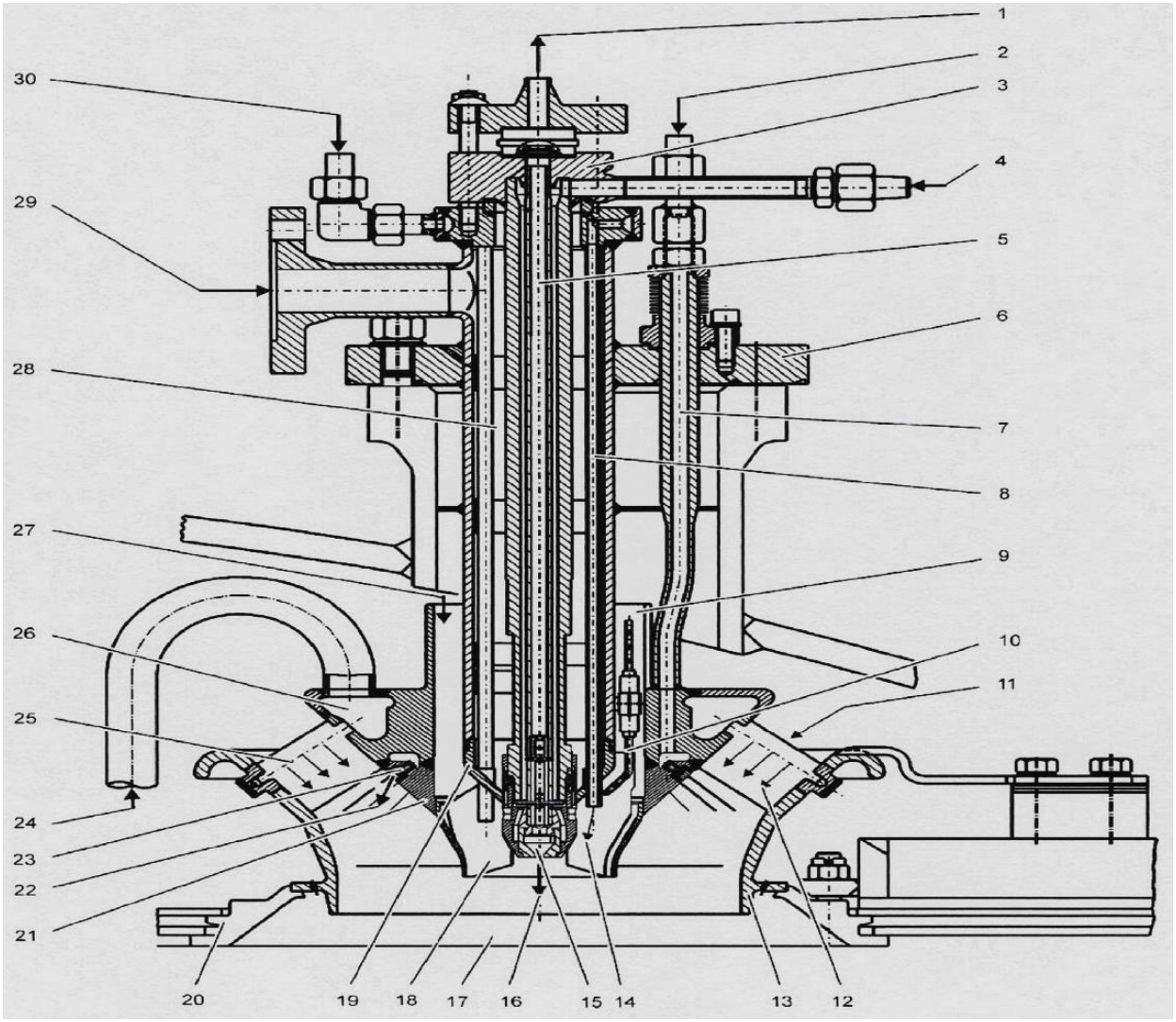
خليط متجانس

الشكل (٨٥- ب) مقارنة بين اللهب الإنتشاري واللهب الممزوج مسبقا
λ = نسبة الهواء الزائد Excess Air Ratio

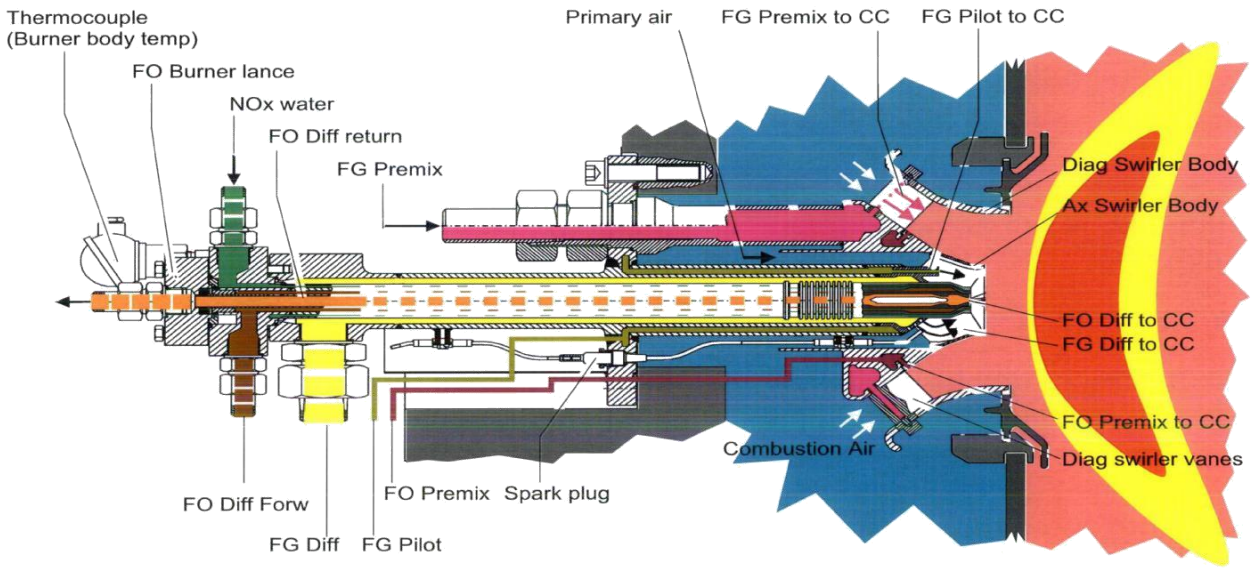
ت	اللهب الإنتشاري (العادي)	اللهب الممزوج مسبقا (البريمكس)
١	لهب قوي ومستقر Strong & stable flame يستخدم أثناء بدء تشغيل التوربين الغازي Gas turbine start up حتى (٦٠ ٪) من الحمل .	شعلة ضعيفة وغير مستقرة Weak & instable flame لأنها لا تملك (درجة حرارة ذروة Peak temperature)
٢	درجة الحرارة ليست خطية Linear .	توفر درجة الحرارة الخطية توزيع حراري ممتاز Excellent heat distribution .
٣	لهب غير مرئي Non visible flame .	الشعلة قصيرة مرئية Visible short flame .
٤	إنبعاثات أعلى بكثير لأكاسيد النيتروجين NOx emission	إنبعاثات أقل بكثير لأكاسيد النيتروجين .
٥	خلط سيء للوقود والهواء Bad air fuel mixing .	خلط ممتاز للوقود والهواء .
٦	الشعلة بعيدة عن معدن المشعل أو الحارق .	الشعلة مغلقة على معدن المشعل ، لذا يتطلب مراقبة درجة حرارة المشعل .
٧	يستخدم أثناء تغيير الوقود Fuel change over .	لا يمكن إستخدامه أثناء تغيير الوقود .
٨	بما أن لهب الانتشار لهب قوي ، فلن يكون متأثرا بطنين اللهب Flame humming (صوت ثابت ومستمر) .	يتطلب سرعة التغيير والتحويل إلى وضع الأنتشار عندما يعاني اللهب الممزوج مسبقا من تذبذب ضغط غاز الوقود بينما تتم الإستجابة لمراقبة طنين اللهب .
٩	لا حاجة إلى لهب دليل أو توجيه Pilot flame .	يتطلب لهب دليل (مساعد) لجعل الشعلة ثابتة ومستقرة .

الشكل العام للمشعل المركب (الهجين) The main configuration of the hybrid burner

المشعل أو الحارق الهجين هو عبارة عن مشعل يصمم بحيث يكون له نوعان مختلفان من اللهب وهما اللهب الإنتشاري واللهب الممزوج مسبقا ، كل لهب له ممرات أو قنوات تزويد الهواء والوقود الخاصة به داخل المشعل ، كما أن كل لهب له التدويم Swirler الخاص به (الحركة الدوامية للوقود) . معظم توربينات الغاز الحديثة (أوروبا Europe) تستخدم هذا المشعل ، والميزة الرئيسية لهذا المشعل هو أن مستوى أكاسيد النيتروجين أقل إذا تم تشغيل توربينات الغاز تحت وضع الخلط أو المزج المسبق (بريمكس) .
يميل المصممون الآخرون (الولايات الأمريكية المتحدة U.S.A) إلى إستخدام الحقن بالماء Water injection على المشاعل لتقليل درجة حرارة اللهب وبالتالي تقليل انبعاثات أكاسيد النيتروجين .



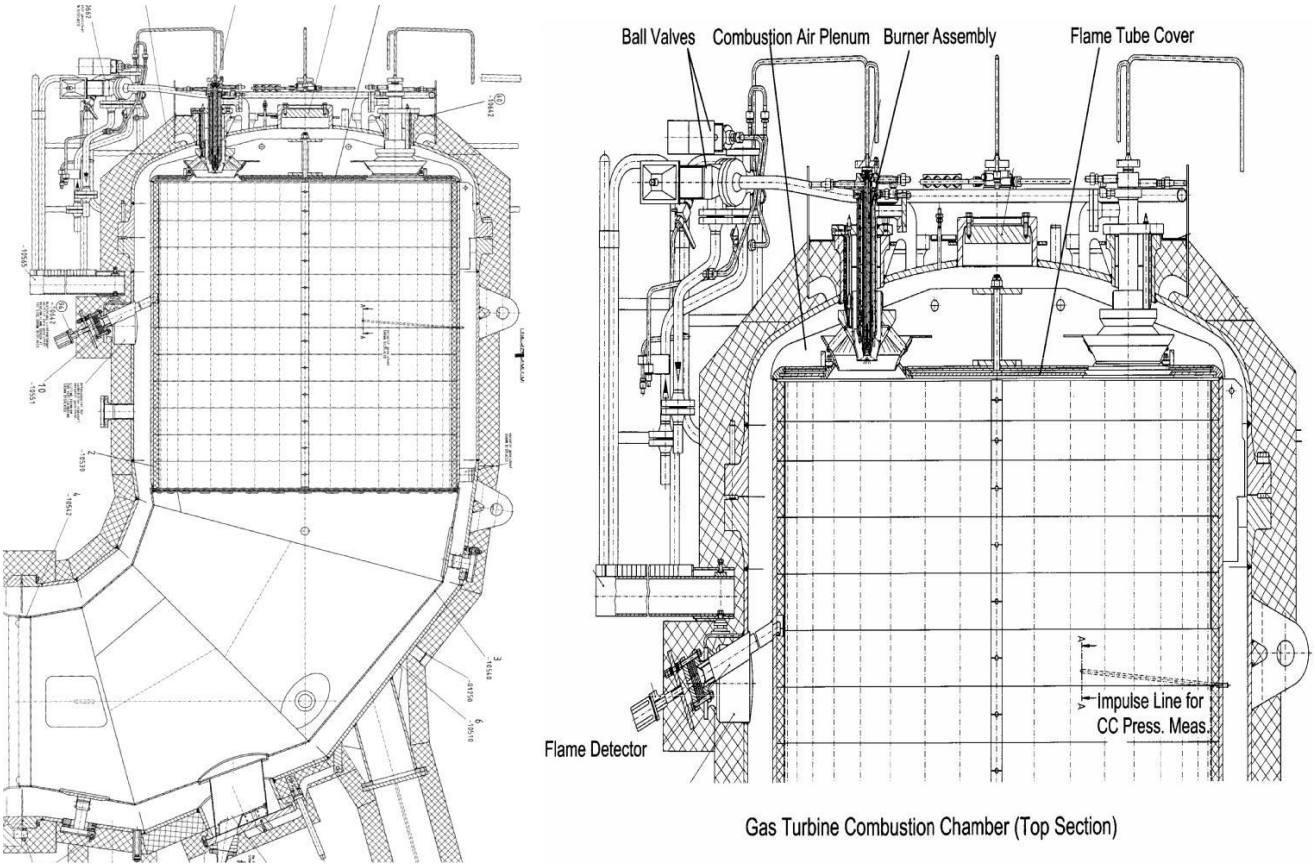
الشكل (٨٦- أ) تجميع (تركيب) المشعل الهجين (المشعل الإنتشاري – الممزوج مسبقا)
Hybrid Burner Assembly (Diffusion-Premix Burner)



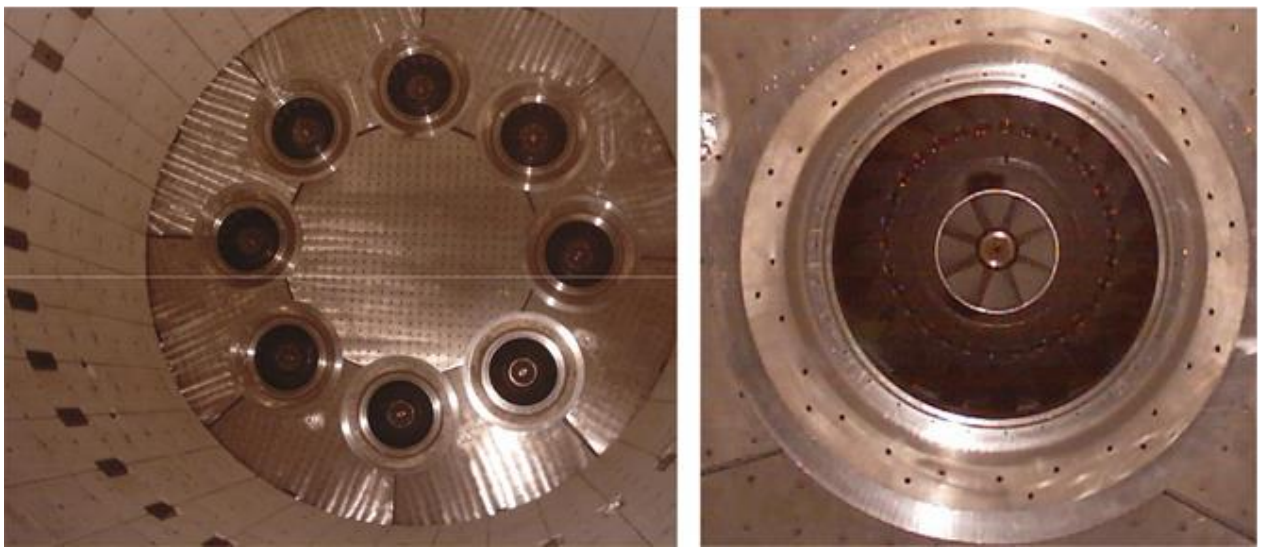
الشكل (٨٦- ب) تجميع (تركيب) المشعل الهجين (المشعل الإنتشاري – الممزوج مسبقا)
Hybrid Burner Assembly (Diffusion-Premix Burner)

١	خط رجوع زيت الوقود Fuel oil return line	١٦	مخرج زيت الوقود Fuel oil outlet
٢	مدخل زيت وقود البريمكس Premix fuel oil inlet	١٧	منطقة الإحتراق Combustion zone
٣	المشعل الإنتشاري لزيت الوقود Fuel oil diffusion burner	١٨	التدويم المحوري Axial swirler
٤	خط تجهيز زيت الوقود Fuel oil supply line	١٩	المشعل الإنتشاري للغاز Gas diffusion burner
٥	خط الرجوع Return line	٢٠	صفيحة نهاية أسطوانة اللهب Flame cylinder end plate
٦	حامل المشعل Burner support	٢١	مشعل البريمكس لزيت الوقود Premix fuel oil burner
٧	أنبوب تجهيز زيت الوقود Fuel oil supply pipe	٢٢	مخرج زيت وقود البريمكس Fuel oil outlet (premix)
٨	المشعل الغازي التجريبي (المساعد) Pilot gas burner	٢٣	منفث مشعل البريمكس Premix burner nozzle
٩	حيز حلقي للإحتراق Annular space for combustion	٢٤	مدخل غاز البريمكس Premix gas inlet
١٠	جهاز الإشعال Igniter	٢٥	ريشة التدويم القطري Diagonal swirler vane
١١	مدخل الهواء إلى داخل التدويم القطري Air inlet into the diagonal swirler	٢٦	قناة (مجرى) موزع الغاز Gas distributor duct
١٢	مخرج غاز البريمكس Premix gas outlet	٢٧	مدخل الهواء إلى داخل التدويم المحوري Air inlet into the axial swirler
١٣	التدويم (التدوير) القطري Diagonal swirler	٢٨	حيز حلقي للغاز المنتشر Annular space for diffusion gas
١٤	مخرج الهواء من المشعل الغازي التجريبي Gas outlet from the pilot gas burner	٢٩	مدخل الغاز إلى داخل المشعل الإنتشاري Gas inlet into the diffusion burner
١٥	منفث (فوهة) المشعل الإنتشاري لزيت الوقود Fuel oil diffusion burner nozzle	٣٠	مدخل الغاز إلى داخل المشعل الغازي التجريبي Gas inlet into the pilot gas burner

ملاحظة توضيحية : زيت الوقود Fuel oil هو أي وقود سائل Liquid fuel يتم حرقه في فرن أو مرجل Furnace or boiler لتوليد الحرارة أو إستخدامه في محرك لتوليد الطاقة Power .

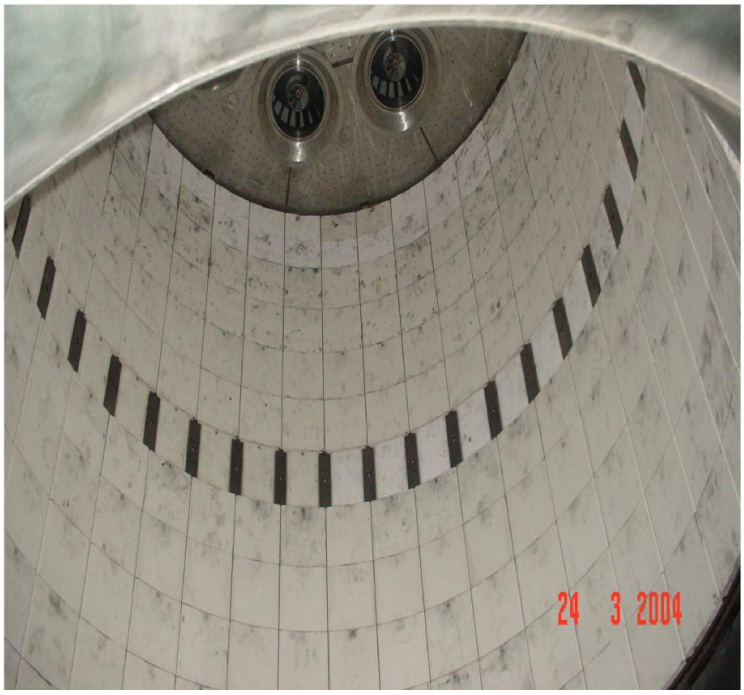


الشكل (٨٧) المشعل الهجين في غرفة إحتراق نوع صومعة
Hybrid Burner on Silo type combustor

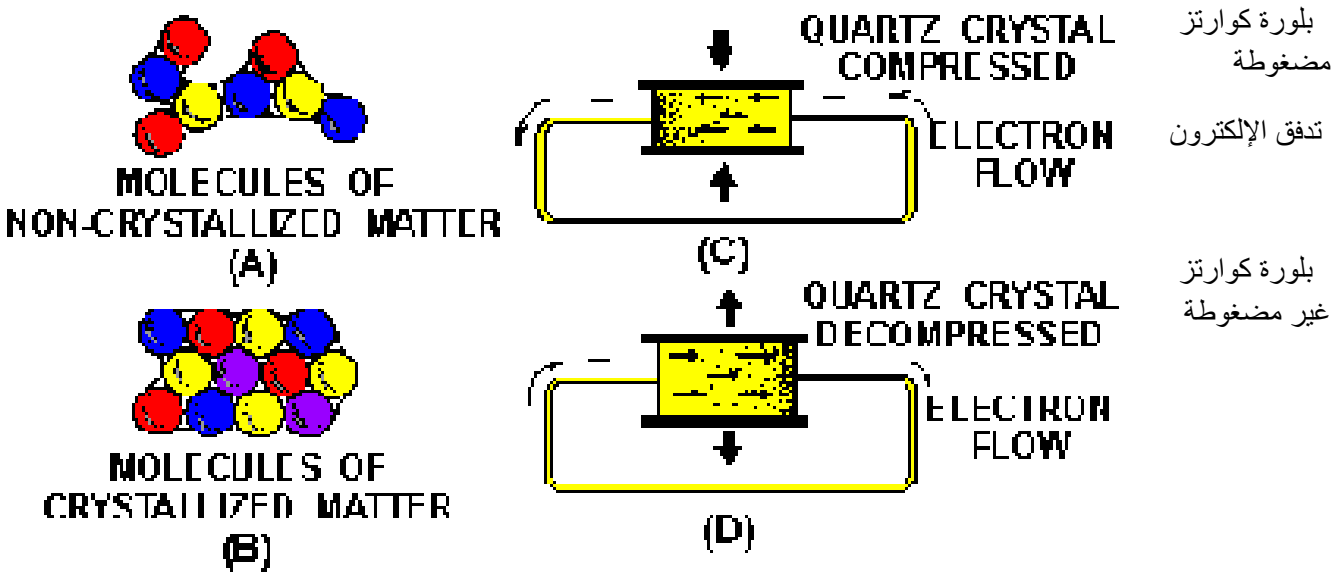


طنين أو أزيز الشعلة Flame humming

يمكن تعريف طنين الشعلة بأنه تقلبات ضغط اللهب Pressure fluctuations of the flame في غرفة الإحتراق . أثناء تغير الحمل ، سيتم تغيير تدفق الوقود والذي سيؤدي إلى تقلب أو تذبذب في حالة ووضعية اللهب وطفرة في درجة الحرارة ، وسيُنتج عن ذلك ضغط نبضي Pulsation pressure . سيكون لتغير ضغط اللهب تردد معين Certain frequency .
يجب أن يكون نطاق تردد اللهب أو الشعلة ضمن حدود التشغيل الآمنة ، إذا أزداد طنين اللهب ، عندئذ سيزداد مستوى الإهتزاز في غرفة الاحتراق ، وبالتالي فإن أنبوب اللهب Flame tube الذي يتكون من مجموعة من الكتل Blocks قد ينهار مع الوقت و تتساقط قطع الطوب أو القرميد المكسورة Broken brick pieces وتُخلط مع تيار التدفق Flow stream الداخل إلى التوربين الذي يدور بسرعة عالية ، والنتيجة هي الفشل الكارثي Catastrophic Failure للتوربين الغازي . إن رصد ومراقبة طنين اللهب مهم جدا لتجنب مثل هذه الحالات .



الشكل (٨٨) أنبوب اللهب لغرفة إحتراق نوع صومعة ، توضح الصورة على اليسار إجراء صيانة لكل لبنة (طوبة) بإستخدام ورق شفاف Transparent paper مع رسم X أسود عليه ، يتم فحص حالة الطوبة الجيدة بطريقة لا يجب أن يكون فيها أي صدع أو شق Crack داخل X الأسود وإذا كانت الشقوق ممتدة وتصل إلى X الأسود ، فيجب استبدال الطوب بآخر متماثل ومطابق Corresponding لتجنب فشلها عندما يكون التوربين الغازي في حالة التشغيل .
يتم قياس طنين اللهب بمتحسس الإهتزاز Vibration sensor الذي يعمل على مبدأ المفهوم الكهروضغطي (كهرو إجهادي) Piezoelectric . الإشارة الخارجة هي إشارة الضغط (ملي بار mbar) ، يمكن عرض مفهوم الكهروإجهادي في الشكل التالي .



الشكل (٨٩) الكهروإجهادية هي الجهد (الفولتية) الناتجة عن طريق كبس بلورات مواد معينة (ضغط)
Piezoelectricity is voltage produced by squeezing crystals of certain substances (pressure)
(A) جزيئات مادة غير بلورية Molecules of non-crystallized matter
(B) جزيئات مادة بلورية Molecules of crystallized matter

في حالة زيادة طنين اللهب إلى أكثر من (٣٠ ملي بار) ، يتم حظر زيادة حمل التوربين الغازي إلى أن يهدأ متحسس الطنين (تتم إزالته) .

ملاحظة توضيحية : Piezoelectric تعني الكهرباء الإنضغاطية أو الكهرضغطية أو البيزوكهربائية هي خاصية لبعض المواد (وخصوصا البلورات ، وبعض المواد السيراميكية ، بما فيها العظم) على توليد جهد كهربائي إستجابة لتطبيق إجهاد ميكانيكي . فعند تطبيق ضغط على المادة تتقارب فيها بعض الشحنات الكهربائية مما يولد على طرفيها جهدا كهربائيا . وبالعكس عند تعرض تلك المواد لجهد كهربائي يتولد فيها إجهاد ميكانيكي ، أي قد تقصر أو تطول . لهذا الأثر تطبيقات مفيدة مثل إنتاج واستشعار الصوت ، وتوليد جهد كهربائي عالي ، توليد تردد إلكتروني ، الموازين الدقيقة .

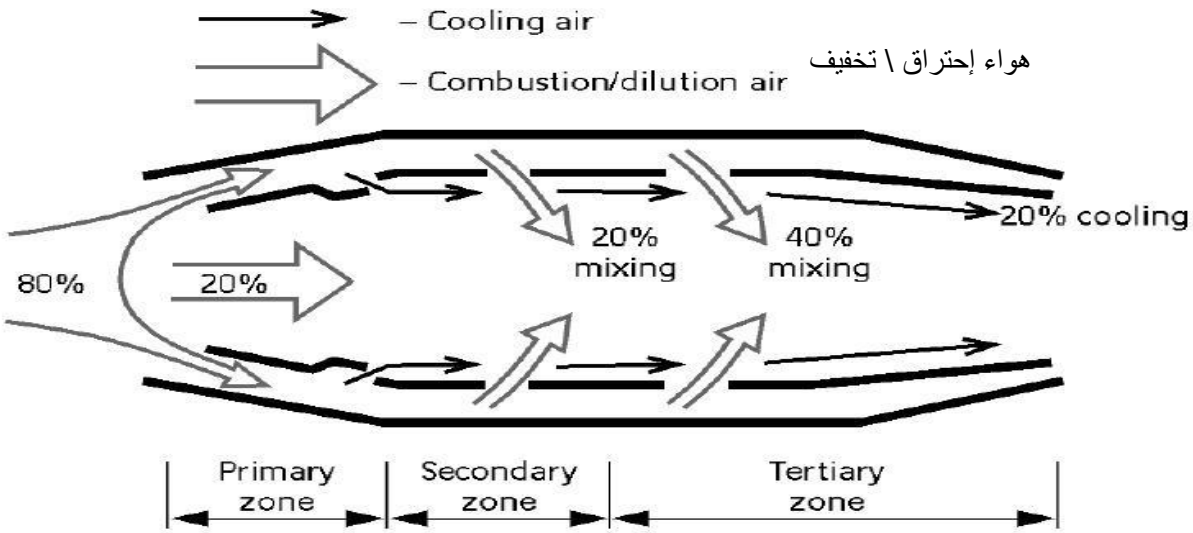
مراحل الهواء أثناء الإحتراق The stages of the air during combustion

يحدث الإحتراق في ثلاث مناطق :

(١) المنطقة الأساسية (الأولية) Primary zone ، حيث يتم إحراق معظم الوقود في حركة دوامة Vortex movement ويعاد فيها نشروتوزيع وتداور Re-circulate الوقود عدة مرات ، مما يتيح الوقت على طول المسارات الحلزونية Spiral paths لكي يكتمل الإحتراق .

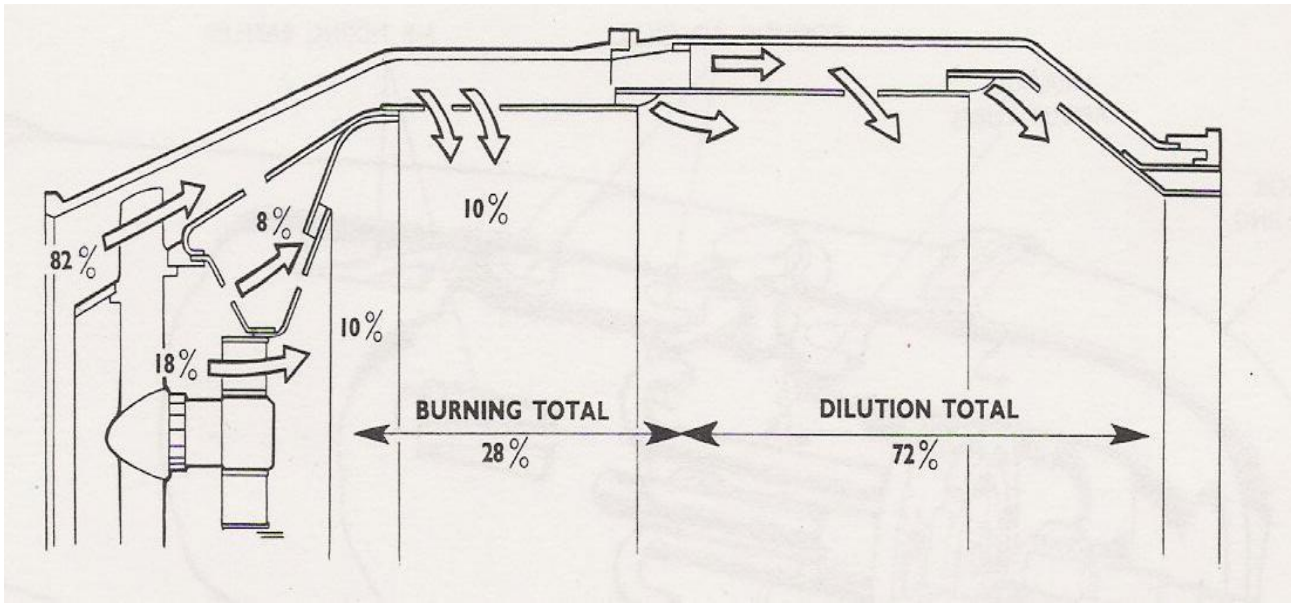
(٢) المنطقة الثانوية Secondary zone ، حيث يتم إضافة مزيد من الهواء لتوفير حالة من الأوكسجين الزائد Excess oxygen حيث يمكن حرق جميع مكونات الإحتراق الأخرى بالكامل .

(٣) المنطقة الثالثة Tertiary zone ، حيث يتم إضافة المزيد من الهواء من الضاغط لتخفيض درجة حرارة نواتج الإحتراق إلى درجة حرارة يمكن أن يتحملها التوربين . إن الوظيفة الرئيسية لهذه المنطقة هي ضمان إكتمال الخلط بحيث يتم تمرير تدفق منتظم Uniform flow إلى التوربين ، دون وجود مناطق أو مساحات ساخنة .



الشكل (٩٠) تقسيم الهواء إلى هواء إحتراق و هواء تبريد Combustion air & Cooling air

في التوربينات الغازية ، يدخل الهواء غرفة الإحتراق متنقلا بسرعة (١٥٠ متر في الثانية Meters per second) . وتبلغ سرعة إنتشار اللهب في خليط الوقود \ الهواء النموذجي حوالي (٧ أمتار في الثانية) . وبمقارنة هذه الأرقام ، يمكننا أن نرى أنه يجب علينا تقليل سرعة الهواء لتجنب إنطفاء اللهب على الفور .



الشكل (٩١) تقوم إضافة أنبوب اللهب بتوزيع تدفق الهواء بين المنطقتين الأساسية و التخفيف
Addition of flame tube distribute air flow between the primary & dilution zones

من أجل توفير الظروف الملائمة لإحتراق مستقر Stable burning ، يتم إتخاذ التدابير الرئيسية التالية :
١ - يتم إبطاء تدفق الهواء عن طريق زيادة المقطع العرضي Cross-section لغرفة الإحتراق بعد دخول الهواء مباشرة .
٢ - ينقسم تدفق الهواء إلى ثلاث مناطق (أولية ، ثانوية وثالثة) ، لتوفير هواء منظم ومتحكم به Controlled air للمساعدة في أغراض مختلفة (جزء للإحتراق وجزء للتبريد) .

طرق تقليل إنبعاث أكاسيد النيتروجين الناتجة من غرف الإحتراق في التوربينات الغازية
The various methods used to reduce NOx emission form gas turbines

تشمل طرق الحد من توليد أكاسيد النيتروجين ما يلي :
١- تقليل درجة حرارة الذروة للهب Flame peak temperature إلى أقل من (١٣٠٠ درجة مئوية) ويمكن تحقيق ذلك عن طريق إدخال هواء المنطقة الثالثة Tertiary air على اللهب (لهب البريمكس) . هذه الطريقة يفضلها صُناع التوربين الغازي قي أوروبا .
٢- تعديل أو تحوير تصميم غرفة الإحتراق بحيث يحدث جزء صغير من الإحتراق تحت كمية الهواء النظرية Theoretical amount of air حيث تكون درجة حرارة اللهب أعلى .
٣- تخفيف اللهب بإستخدام الماء أو الحقن بالبخار Steam injection على المشاعل ، هذا سيمنع (٨٠ ٪) من تشكيل أكاسيد النيتروجين الخارجة عن السيطرة Uncontrolled . هذه الطريقة يفضلها صُناع التوربين الغازي قي أمريكا ، لاحظ أن إضافة حقن البخار سيزيد من القدرة المنتجة للتوربين الغازي بنسبة (٦ ٪) .
٤ - حقن الأمونيا Ammonia (NH_3) في عادم التوربين الغازي للتفاعل مع أوكسيد النيتريك Nitric oxide (NO) بوجود عامل مساعد أو محفز Catalyst . بما أن المحفزات الصلبة لها عمر قصير ، فإنه بشكل عام يتم إستخدام عملية إزالة النترات الرطبة Wet de-nitration process الأكثر استقرارا بإستخدام الأمونيا السائلة Liquid ammonia . عن طريق خلط غازات العادم Exhaust gases مع الأمونيا ، يتم تحويل أكاسيد النيتروجين إلى نيتروجين Nitrogen وماء غير ضار . كما في المعادلة الكيمائية التالية :

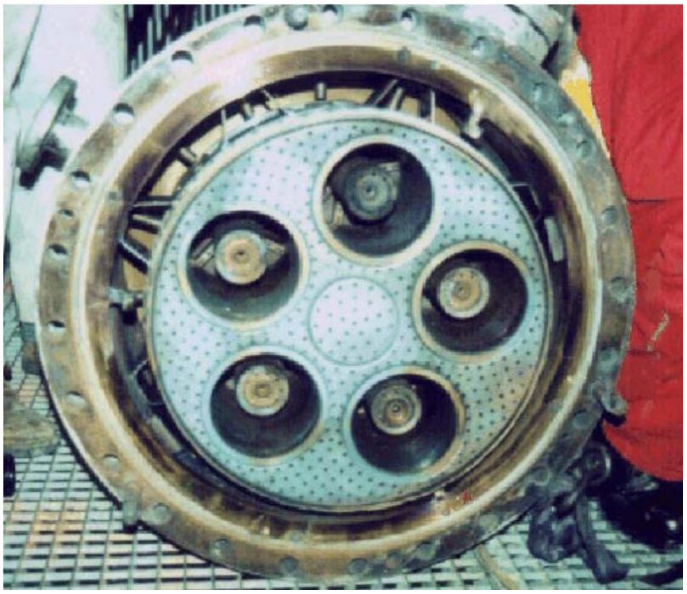
$$NOx + NH_3 + (catalyst) \rightarrow N_2 + H_2O$$

ملاحظة توضيحية : De-nitration هي عملية إزالة النترات أو غيرها من مركبات النيتروجين ، وخاصة من الماء ، النيتروجين

إن تكلفة تشغيل Running cost عملية الأمونيا السائلة عالية ، لذا فإن قياسات (NOx) قبل وبعد عملية إزالة (NOx) مهمة لغرض المراقبة والتحكم (تقليل كمية الأمونيا التي يتم حقنها) .
إن كمية أكاسيد النيتروجين المتولدة في اللهب الغني بالوقود Fuel-rich flame تكون منخفضة ، و مع إقتراب الهواء من مستوى الهواء النظري ، يزداد توليد أكاسيد النيتروجين ويصل إلى الحد الأقصى في الهواء الزائد Excess air ، ثم بإضافة الهواء الزائد لتهدئة وتبريد اللهب ، يتم تقليل إنتاج أكاسيد النيتروجين .
لاحظ أن كمية أكاسيد النيتروجين المسموح بتوليدها أو تكوينها في جميع أنحاء العالم بالآونة الأخيرة يتراوح (من ٢٨ إلى ٦٠ جزء في المليون part per million (ppm)) .

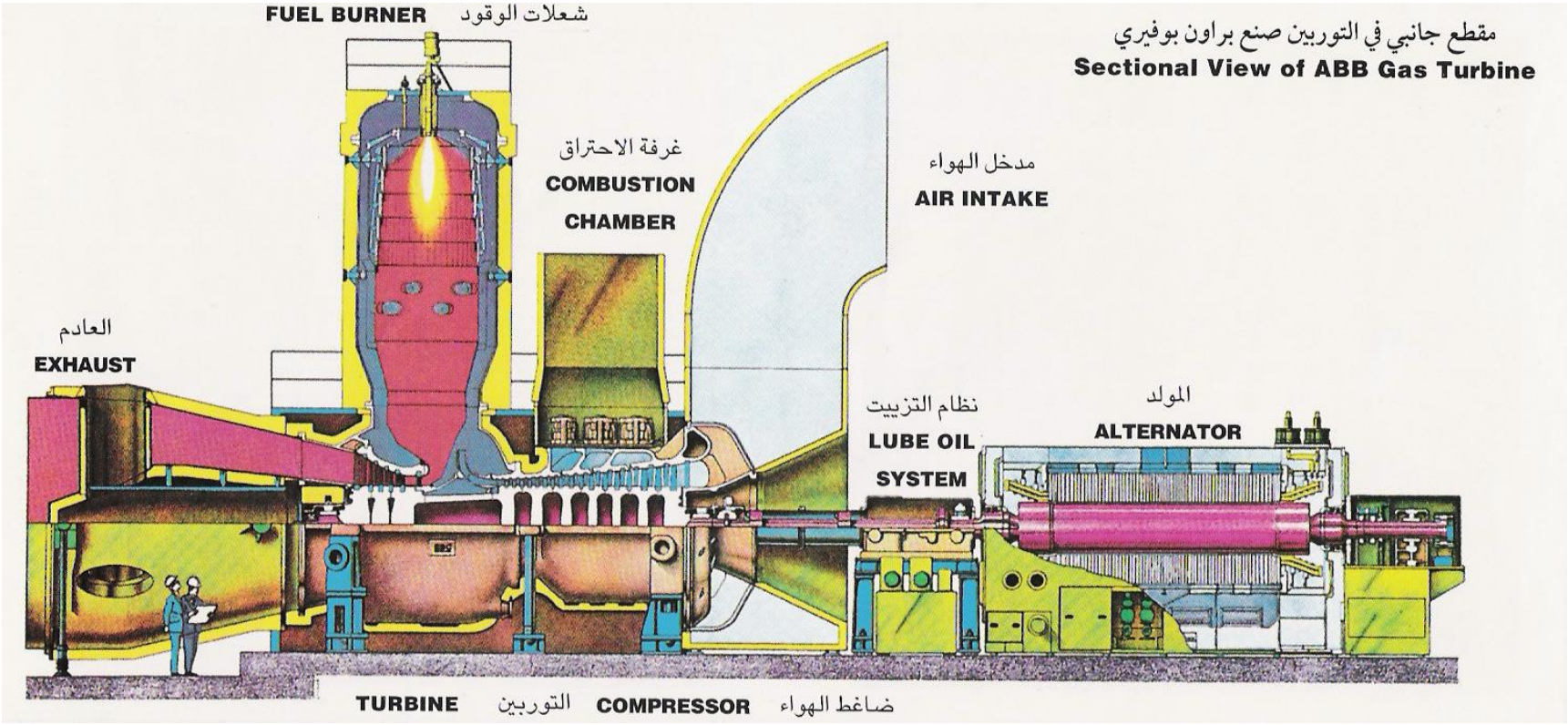
طرق تقليل إنبعاث أكاسيد الكبريت الناتجة من غرف الإحتراق في التوربينات الغازية
The various methods used to reduce SOx emission from gas turbines

تنتج أكاسيد الكبريت Sulfur oxides من حرق الكبريت Sulfur في الوقود بالأوكسجين من هواء الاحتراق ، وعادة ما يشار إليها باسم (SOx) .
هذه المواد غير مرغوب فيها للغاية لأنها مكونات رئيسية للأمطار الحامضية Acid rain ، والتي تسبب أضرارا بيئية Environmental damage ، ويمكن أن تسبب أيضا تآكل شديد في المعدات severe corrosion of equipment .
تشمل طرق تقليل توليد SOx ما يلي :
١- تقليل كمية الكبريت في الوقود هو الحل الأكثر شهرة .
٢ - التشغيل عند نسبة هواء زائد منخفضة Low excess air ratio هو الحل الأمثل لتقليل إنبعاث SOx ، لاحظ أن هذا الحل غير عملي في التوربينات الغازية ذات الدورة المركبة Combined cycle gas turbines لأن الهواء الزائد مطلوب لحرق أي وقود إضافي يضاف إلى مرجل إسترداد الحرارة Heat recovery steam generator (HRSG) (إحتراق تكميلي Supplementary firing) .
لاحظ أنه يمكن إزالة الكبريت من الوقود عن طريق بعض المعالجات ولكن لا يمكن إزالة النيتروجين من الهواء .
ملاحظة توضيحية : HRSG يعني مولد بخار إسترداد الحرارة أو المرجل الإسترداديي وهو عبارة عن مبادل حراري Heat exchanger الغرض منه إستخلاص الطاقة الحرارية من تيار غاز ساخن عادم للاستفادة من حرارته في توليد البخار لغرض إدارة توربينة بخارية Steam turbine أو إستعماله في عملية صناعية أو غير ذلك .



الشكل (٩٢) مشعل G.E مع حقن الماء G.E. burner-water Injection

الشكل (٩٣) المشعل الهجين سيمنز (مشعل إنتشاري- بريمكس) تظهر دوامات محورية وقطرية بشكل واضح
Siemens hybrid burner (Diffusion-Premix burner) Axial & diagonal swirlers are clearly shown


مقطع جانبي في التوربين صنع براون بوفيري
Sectional View of ABB Gas Turbine
FUEL BURNER شعلات الوقود
غرفة الاحتراق
COMBUSTION
CHAMBER
مدخل الهواء
AIR INTAKE
العادم
EXHAUST
نظام التزييت
LUBE OIL
SYSTEM
المولد
ALTERNATOR
TURBINE التوربين
COMPRESSOR ضاغط الهواء

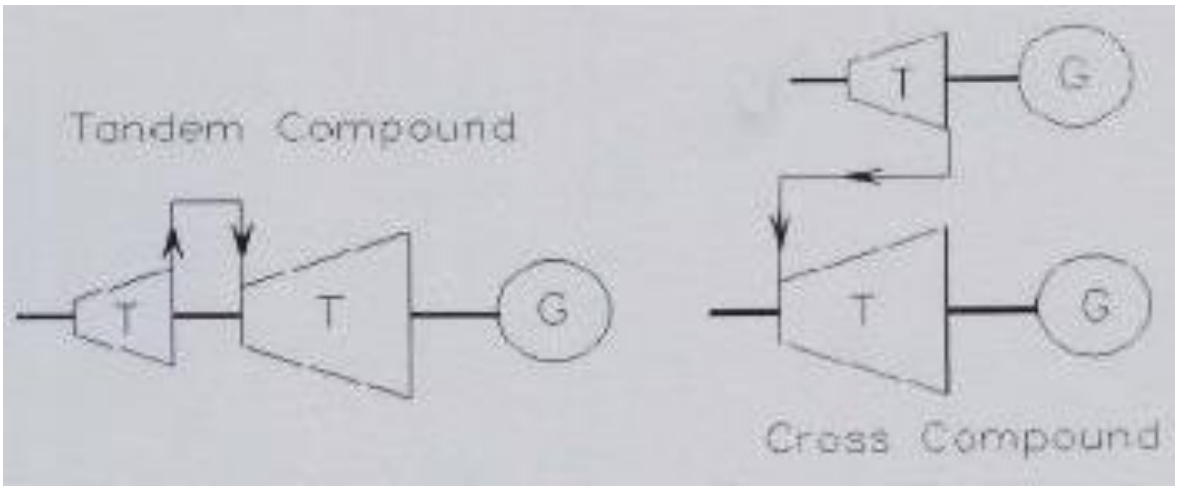
الشكل (٩٤)

التوربين الغازي – قسم التوربين Gas turbine – Turbine section

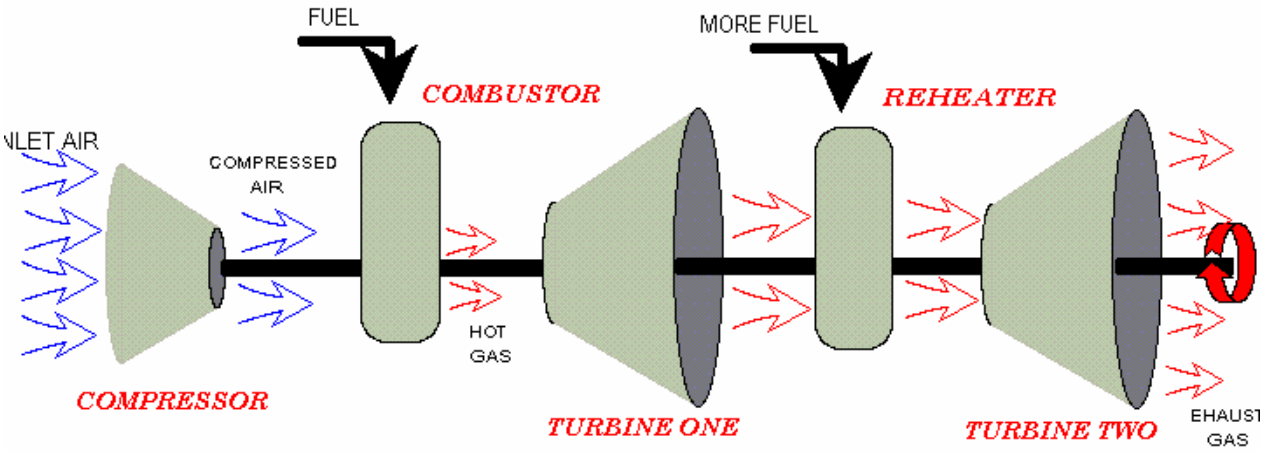
تصنيف التوربينات Turbines classification

يمكن تصنيف التوربينات على أساس :
- تأثير (عمل ، فعل Action) التدفق على ريش التوربين Turbine blades :
١- دفع Impulse . ٢- رد فعل Reaction . ٣ – دفع ورد فعل مركّب Impulse and reaction combined .
- عدد مراحل التخفيض Number of step reductions :
١- أحادية المرحلة Single stage . ٢- متعددة المراحل Multi-stage .
- إتجاه التدفق Direction of flow :
١- محوري Axial . ٢- شعاعي (نصف قطري) Radial .
- إعادة التسخين Reheat أو عدم إعادة تسخين Non reheat .
- مركب (مجمّع) ترادفي (تتابعي) Tandem compound أو مركب عرضي Cross compound (هذا التكوين أوالترتيب مخصص للتوربين البخاري steam turbine فقط) .

الشكل (٩٥) توربين غازي شعاعي ومحوري التدفق Radial & Axial flow gas turbine

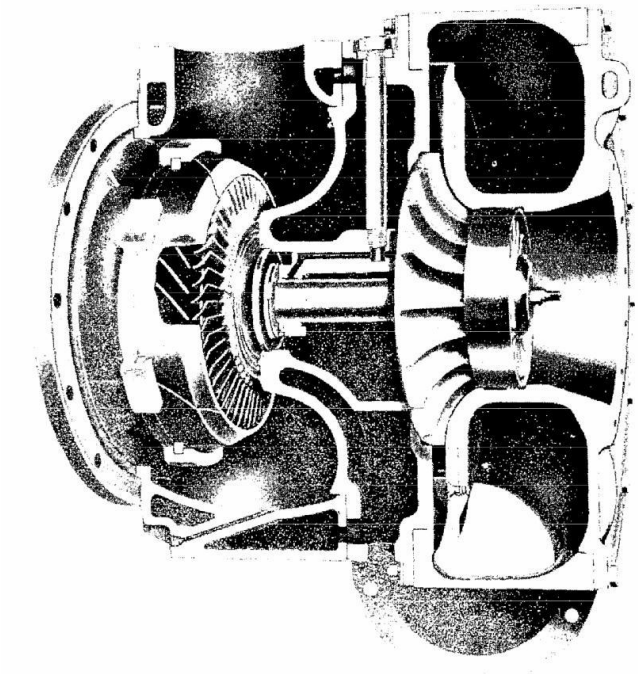


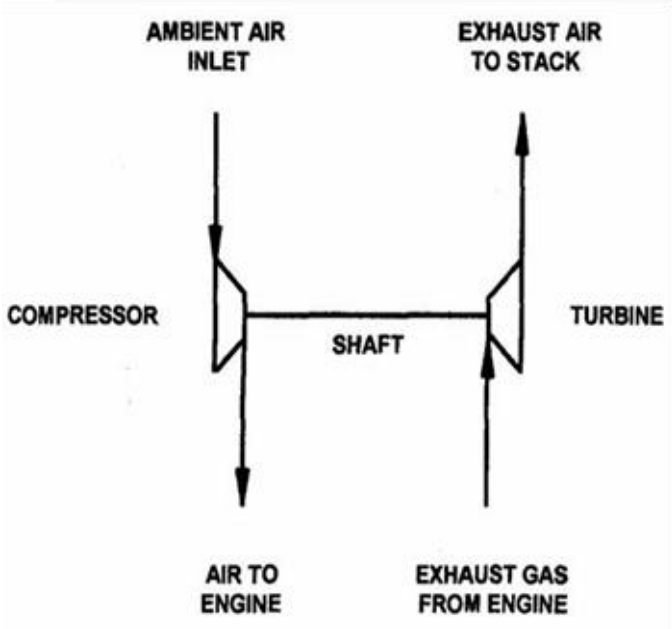
الشكل (٩٦) التركيب التتابعي والعرضي Tandem & cross compound configuration



الشكل (٩٧) توربين غازي مع إعادة التسخين Gas Turbine with reheat

تستخدم معظم محركات التوربينات الغازية توربينات التدفق المحوري Axial flow turbines . ومع ذلك ، يمكن لتوربينات التدفق الشعاعي Radial flow turbines التعامل مع تطبيقات تدفق الكتلة الصغيرة Small mass flow applications بشكل أكثر كفاءة من توربينات التدفق المحوري ويتم إستخدامها على نطاق واسع في الشاحن التوربيني Turbocharger للمحركات الترددية Reciprocating engines أو ما يسمى محركات المكبس Piston engines .





الشكل (٩٨) الشاحن التوربيني الفائق التقليدي المستخدم في المحرك الترددي
Conventional Super Charger used in reciprocating engine

ملاحظة توضيحية : Super Charger الشاحن التوربيني الفائق هو ضاغط هواء Air compressor يقوم بزيادة ضغط أو كثافة الهواء Pressure or density of air المزود إلى محرك الإحتراق الداخلي Internal combustion engine . يقوم هذا الفعل بزيادة الأوكسجين في شوط السحب Intake cycle للمحرك ، مما يزيد من كفاءة حرق الوقود ويحترق وقود أكثر فيزداد الشغل Work المبذول وبالتالي تزداد قدرة المحركEngine power . إن الفرق بين الشاحن التوربيني Turbocharger و الشاحن التوربيني الفائق Super charger هو ان السوبرشارجر يدور عادة ميكانيكيا Mechanically driven بواسطة سير Belt أو ترس Gear متصل بالعمود المرفقي Crankshaft بينما التربوشارجر يدور بغازات عادم المحرك Engine's exhaust gas .

إن محركات التربوشارجر عادة أكثر فعالية من محركات السوبر شارجر ولكنها أقل استجابة منها . يتواجد التربوشارجر عادة في محركات الشاحنات ، السيارات ، القطارات وأيضا محركات معدات البناء .

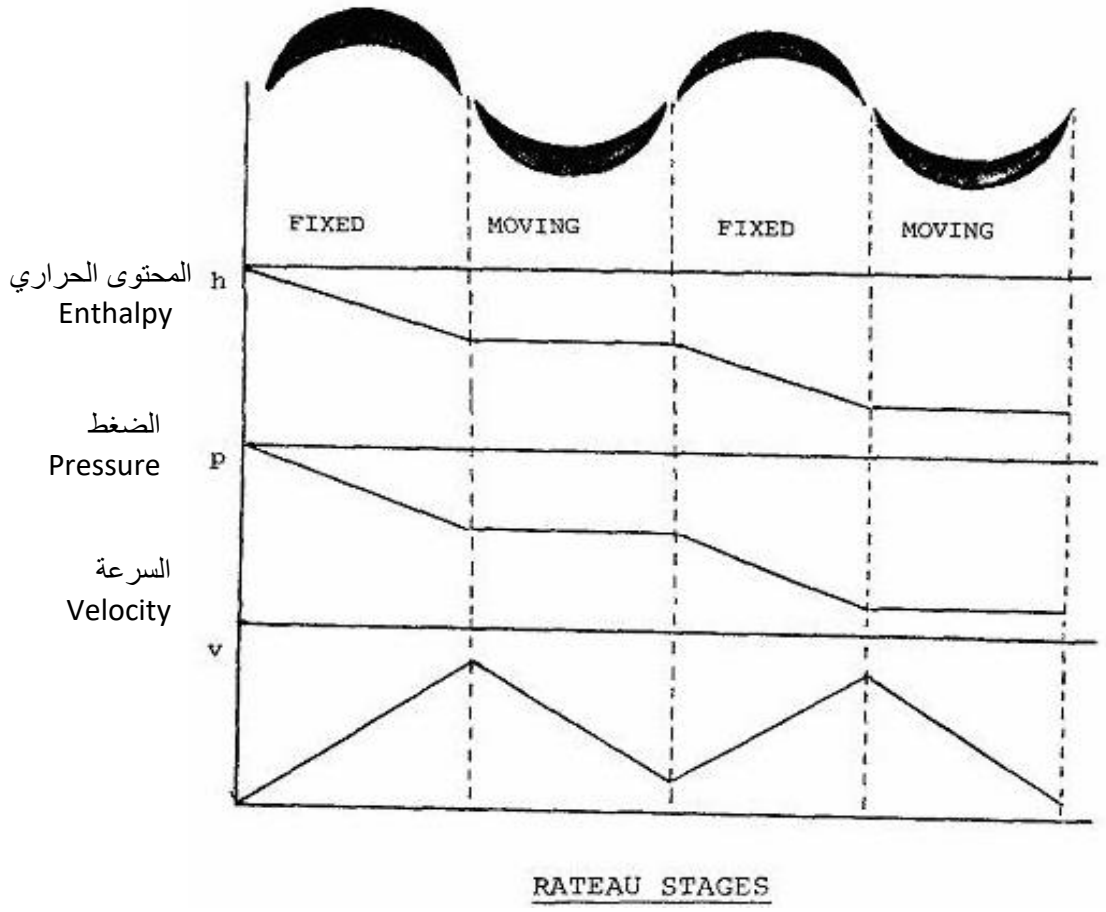
أساسيات التوربين الدفعي وتوربين رد الفعل Principals of Impulse & reaction Turbine

أنواع مراحل التوربين Turbine stage types :

هناك نوعان أساسيان من مراحل التوربين وهما مرحلة رد الفعل ومرحلة الدفع . والفرق الأساسي بين هذين النوعين من المراحل هو الجزء من المرحلة الذي يتم فيه تحويل الطاقة الحرارية Heat energy إلى طاقة حركية بخارية Steam kinetic energy . في مرحلة الدفع ، يحدث هذا التحويل فقط في الريش الثابتة Fixed blades . بينما في مرحلة رد الفعل ، يحدث التحويل في كل من الريش الثابتة والريش المتحركة Moving blades .

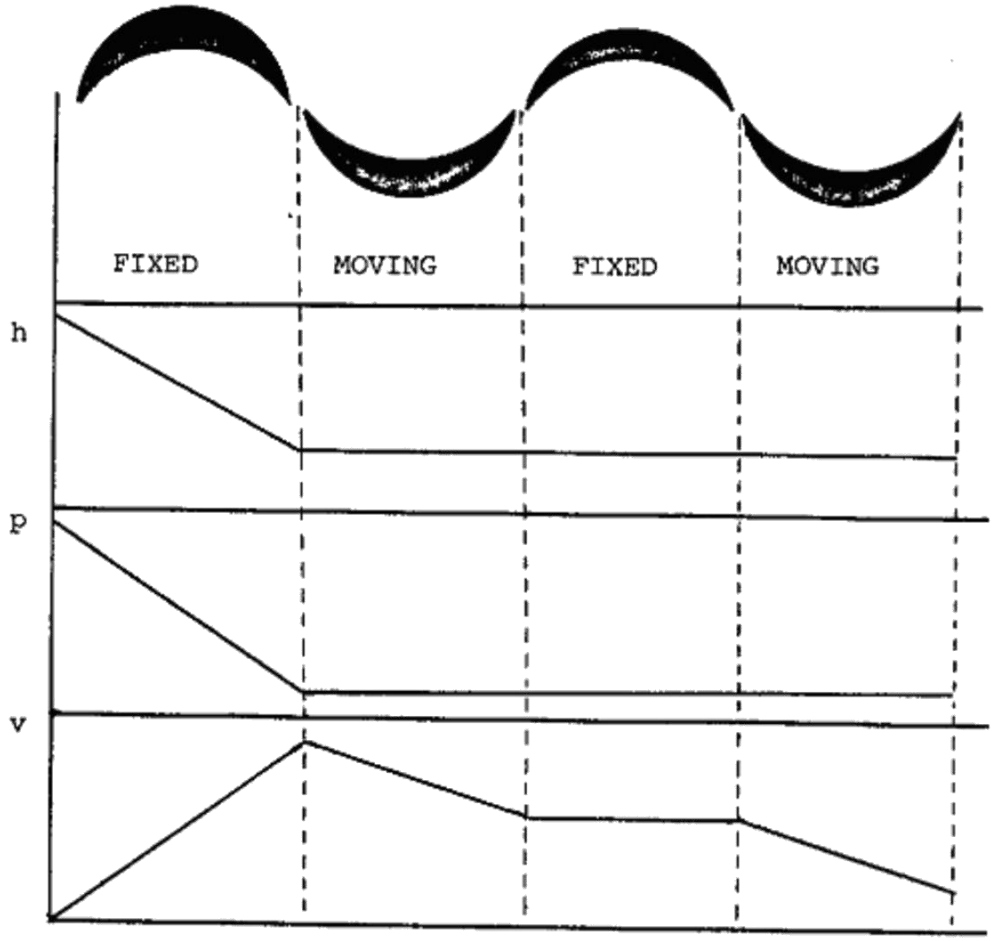
مرحلة الدفع Impulse stage :

عند مرور البخار خلال فوهات الريشة الثابتة Fixed blade nozzles لمرحلة الدفع ، يتم تقليل المحتوى الحراري (الإنثالبي) Enthalpy أو الطاقة الحرارية للبخار وزيادة السرعة Velocity بشكل كبير . ثم يتم توجيه هذا البخار عالي السرعة بواسطة الريش الثابتة إلى الريش المتحركة . يغير البخار إتجاهه في الريش المتحركة ويضفي (يمنح) دفعة (قوة x الوقت Force x Time) على الريش المتحركة .



الشكل (٩٩) مراحل توربين Rateau

هذا النوع من مرحلة الدفع (فوهة ثابتة Fixed nozzle ، ريشة متحركة) يُعرّف بمرحلة Rateau stage . ينخفض الضغط و المحتوى الحراري عبر الفوهة حيث يتم تحويل الطاقة الحرارية إلى طاقة حركية للبخار (السرعة) . وتنخفض سرعة البخار عبر الريش المتحركة ، مع إنتقال الطاقة الحركية إلى الريش المتحركة . ستلاحظ غياب هبوط بالضغط Pressure drop عبر الريشة المتحركة .



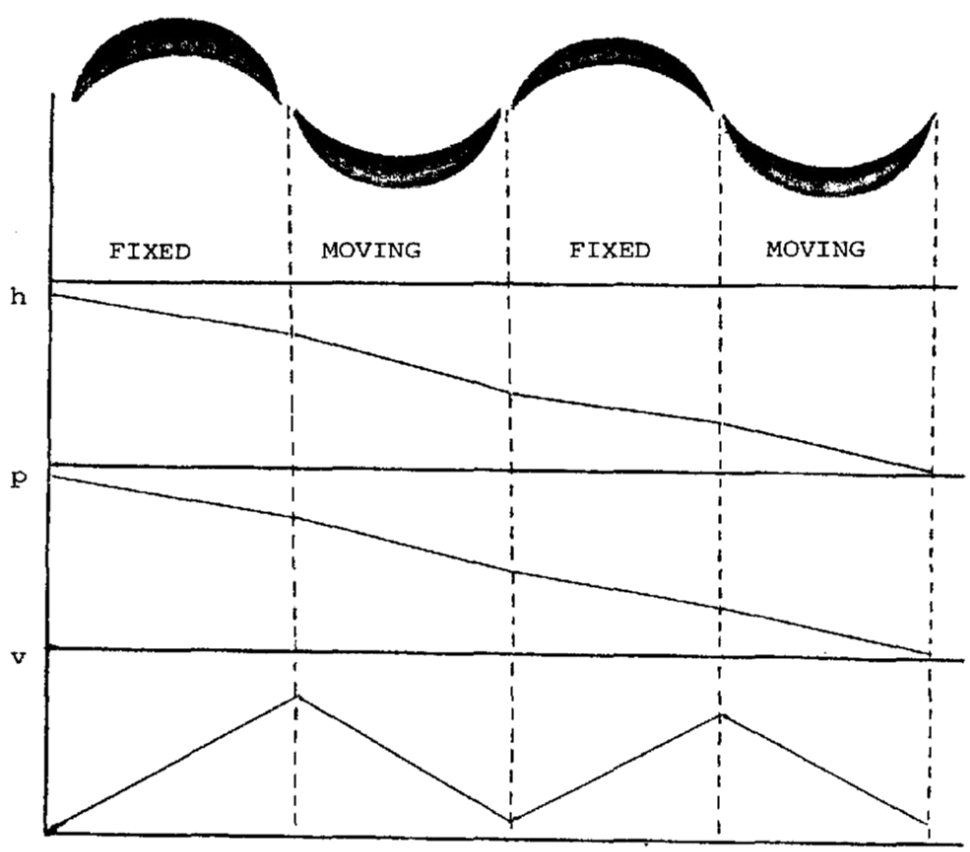
TWO STAGE CURTISS WHEEL

الشكل (١٠٠) توربين Curtiss

المجموعة الثانية من الريش الثابتة ليست فوهات ولا تعمل إلا على إعادة توجيه البخار إلى المجموعة الثانية من الريش المتحركة . نظرا لأن الريش الثابتة الثانية تعمل فقط على إعادة توجيه البخار ، فلا يوجد تغير في سرعة البخار عبر هذه الريش . التوربين الموضح في الشكل أعلاه هو توربين من مرحلتين . تسمى هاتين المرحلتين معا بدولاب Curtiss wheel . ستلاحظ أنه في دولاب Curtiss ، كما هو الحال في مرحلة Rateau ، لا يوجد هبوط بالضغط عبر الريش المتحركة .

مرحلة رد الفعل Reaction stage :

تعمل فوهات الريشة الثابتة في توربين رد الفعل على تحويل الطاقة الحرارية إلى طاقة حركية بخارية بنفس طريقة مرحلة Rateau . يضفي أو يمنح البخار عالي السرعة دفعة للريش المتحركة .
تختلف مرحلة رد الفعل عن مرحلة Rateau في أن الريش المتحركة تكون على شكل فوهة بحيث يتم تحويل الطاقة الحرارية إلى طاقة حركية في الريش المتحركة إضافة إلى الريش الثابتة . يفرض هذا التحويل بالريش المتحركة بعيدا عن البخار المتمدد Expanding steam بتأثير رد فعل مماثل لرد فعل الصاروخ Rocket مع غازات العادم المنبعثة Escaping exhaust gasses .



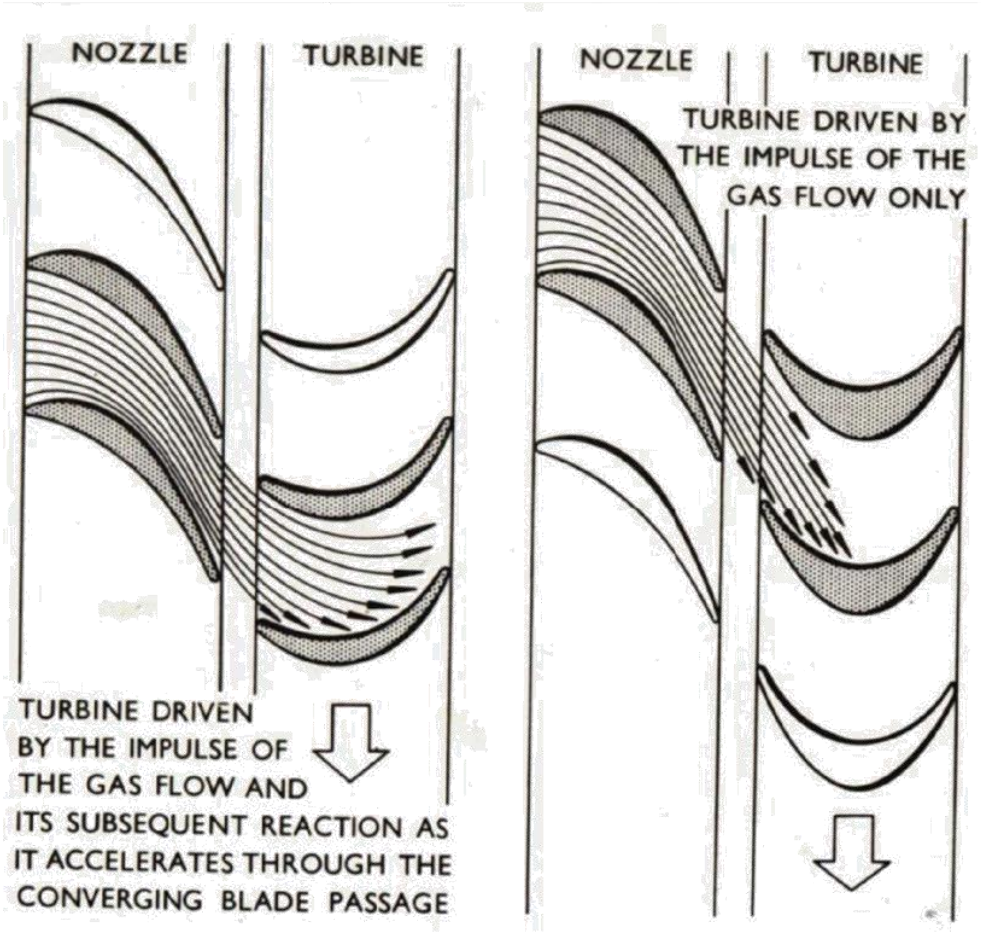
REACTION STAGES

الشكل (١٠١) مراحل رد الفعل

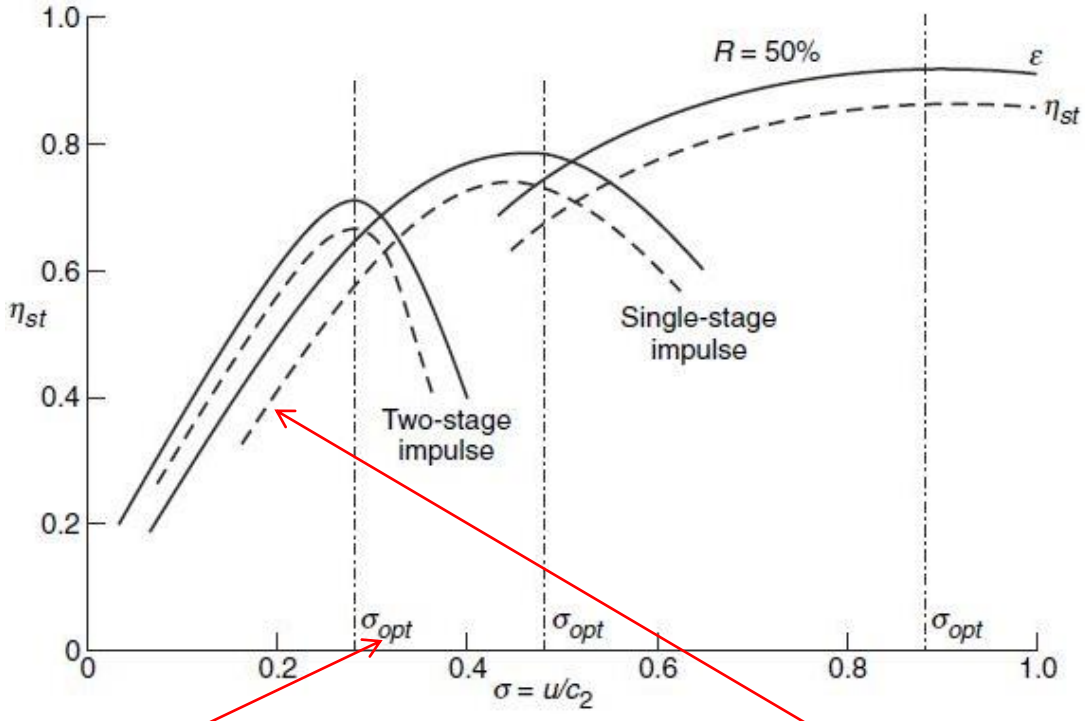
ويبين الشكل أعلاه الضغط و المحتوى الحراري وتغير السرعة عبر توربين رد فعل من مرحلتين . يتم تحويل الطاقة الحرارية إلى طاقة حركية في كل من الريش الثابتة والمتحركة . الريش المتحركة تتحرك إستجابة لتأثير كل من الدفع ورد الفعل Impulse and reaction effect . ستلاحظ أن هبوط الضغط يحدث عبر الريش المتحركة .

إن التمييز بين مراحل الدفع ورد الفعل هو من الناحية النظرية Theory أكثر وضوحا منه في الجانب التطبيقي Practice . يتم تصنيف مراحل التوربين عن طريق **درجة رد فعلها أو نسبة رد الفعل (D.O.R) Degree of reaction or reaction ratio** أو نسبة إنخفاض المحتوى الحراري (أو الضغط) عبر الريش المتحركة إلى انخفاض المحتوى الحراري (أو الضغط) عبر المرحلة بأكملها . قد تتفاوت درجة رد الفعل من (٠٪ - ١٠٠٪) ، عندما يكون **(D.O.R)** صفرا فإن التوربين يكون تماما من النوع الدفعي (النبضي) . بالنسبة للتوربينات الدفعية ليس من غير المألوف على الإطلاق الحصول على كمية صغيرة من رد الفعل لتحسين كفاءاتها Efficiency . عموما إذا كانت درجة رد الفعل لا تزيد عن (٥ - ١٠٪) ، فإن المرحلة تسمى مرحلة الدفع ، وإلا فإنها تسمى مرحلة رد الفعل .

ملاحظة توضيحية : درجة رد الفعل Degree of reaction هي النسبة بين المحتوي الحراري (الإنثالبي) الساكن للمحور Rotor static enthalpy إلى المحتوي الحراري الكلي للمرحلة التوربينية حيث أن المرحلة تتكون من (العضو الثابت + االمحور المتحرك). وتعتبر درجة رد الفعل عامل مهم في تصميم التوربينات والضواغط والآلات التوربينية عموما حيث تحدد كفاءة الآلة . تتراوح القيمة المثالية لدرجة رد الفعل بين (٥٠ ٪ و٦٠٪) معتمدة علي قيمة نصف القطر المتوسط .



الشكل (١٠٢) مقارنة بين توربينات الدفع ورد الفعل
Impulse & Reaction turbines comparison



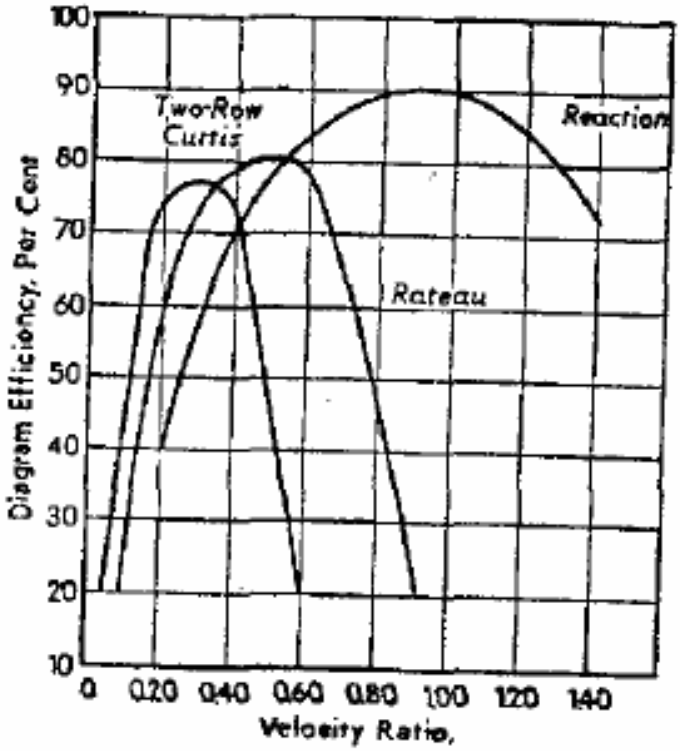
القيم المثلى لنسبة السرعة

Optimum values of the velocity ratio

Range of off-design

الشكل (١٠٣) نسبة السرعة - كفاءة المرحلة لمختلف التوربينات

Velocity ratio - stage efficiency for various turbines



الإعتبارات أو الثوابت التصميمية الأساسية المستخدمة عند تصميم التوربين
Main design considerations that used in turbine design

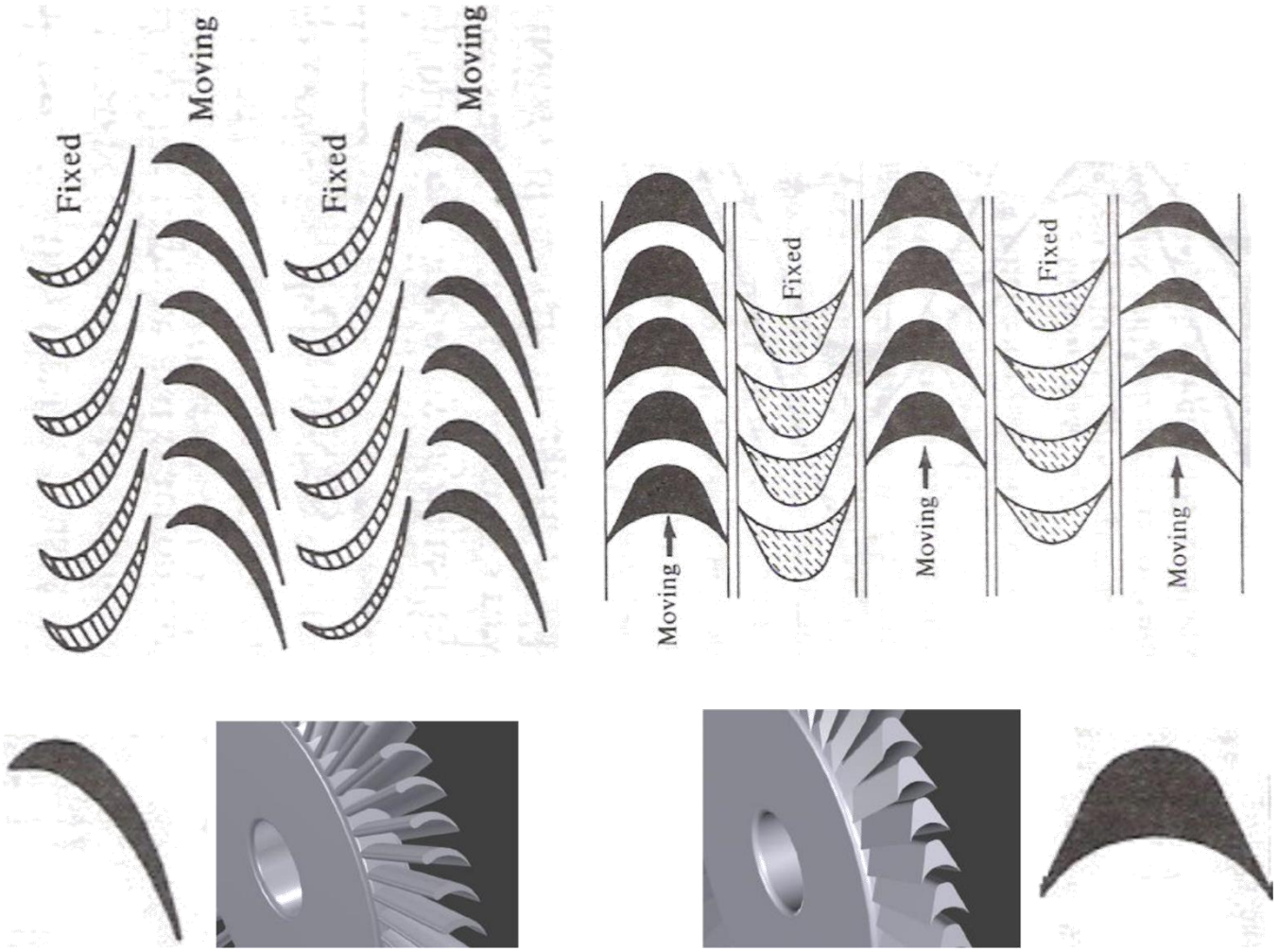
١- درجة رد الفعل Degree of Reaction (D.O.R) :
وهي نسبة = (إنخفاض المحتوى الحراري عبر الريشة المتحركة) \ (إنخفاض المحتوى الحراري عبر المرحلة)
- إذا D.O.R = ٠ % ، فإن التوربين من النوع الدفعي الصافي Pure impulse
- إذا D.O.R = ١٠% ، فإن التوربين من النوع الدفعي مع رد فعل قليل
- إذا D.O.R = > ١٠% ، فإن التوربين من نوع رد الفعل Reaction
لاحظ أن الدفع الصافي يحدث عند جذر الريشة Root of the blade وكلما أبتعدنا أكثر على طول الريشة ، ستزداد درجة رد الفعل .
٢- نسبة السرعة Velocity Ratio (VR) :
هي = (سرعة الريشة Blade speed \ سرعة التدفق Flow speed)
التوربينات الدفعية لديها أعلى كفاءة عند (VR = 0.5) و توربينات رد الفعل عند (VR = 0.9) . لاحظ أن (VR) ستزداد عندما يصبح دولاب الريشة أكبر ، ولهذا السبب تستخدم ريش رد الفعل Reaction blades في توربينات الضغط المنخفض Low pressure turbines (مثل التوربينات البخارية steam turbines) لأنها تكتسب أعلى كفاءة لها عند نسبة سرعة أعلى .

الإختلافات الرئيسية بين التوربينات الدفعية وتوربينات رد الفعل
Main differences between impulse & reaction turbines

ت	توربين الدفع	توربين رد الفعل
١	له سرعة أعلى بكثير لكون إنخفاض الضغط لكل مرحلة عالي .	سرعة أقل لكون إنخفاض الضغط في المرحلة قليل
٢	القدرة المتولدة Power output أعلى (لنفس عدد المراحل) .	إنخفاض انتاج القدرة (لنفس عدد المراحل) .
٣	كفاءة أقل لأن الشغل Work يُنجز فقط في الريشة الثابتة .	كفاءة أعلى لأن الشغل يُنجز في الريش الثابتة والمتحركة .
٤	تسرب طرف رأس الريشة Blade tip leakage أقل بكثير لكون الريشة المتحركة لا تقلل من ضغط التدفق Flow pressure (شفرة متحركة ذات عامل تسرب Leakage factor منخفض) .	يعاني من تسرب طرف رأس الريشة لكون الريشة المتحركة تتنج هبوط بالضغط (شفرة متحركة ذات عامل تسرب كبير) لذلك يجب أن يكون التصميم دقيقا للغاية للحفاظ على هبوط الضغط في كل مرحلة إلى الحد الأدنى .
٥	إن الريشة المتحركة تنتج قوة دفع محورية Axial thrust أقل كونها لا تقلل من ضغط التدفق .	إن الريشة المتحركة تنتج قوة دفع محورية كبيرة كونها تقلل من ضغط التدفق .
٦	يُستخدم كمرحلة أولى في التوربين البخاري ذو الضغط العالي High pressure steam turbine لغرض : تحقيق إنخفاض أكبر في الضغط لتقليل خسائر التسرب في المرحلة الأولى ، وكذلك للحد من قوة الدفع وتقليل عدد مراحل رد الفعل المطلوبة في توربين الضغط العالي .	يعتمد على التوربين الدفعي كمرحلة أولى لتعزيز التصميم العام للتوربين Overall turbine design .

٧	هناك حاجة إلى عدد أقل من المراحل لحمل محدد .	هناك حاجة إلى عدد أكبر من المراحل لحمل محدد
٨	مانع تسرب متاهي (معقد) Labyrinth gland sealing صغير (ضغط عالي) .	مانع تسرب متاهي أكبر (ضغط منخفض) .
٩	له سرعة تدفق أعلى ، وخسائر إحتكاك Friction losses عالية .	له سرعة تدفق منحفضة ، وخسائر إحتكاك قليلة .
١٠	يقلل هبوط الضغط المنخفض في الريش المتحركة التسرب وأدوات منع التسرب Sealing devices حول الريش المتحركة للتوربين .	يزيد هبوط الضغط العالي في الريش المتحركة التسرب وأدوات منع التسرب حول الريش المتحركة للتوربين .

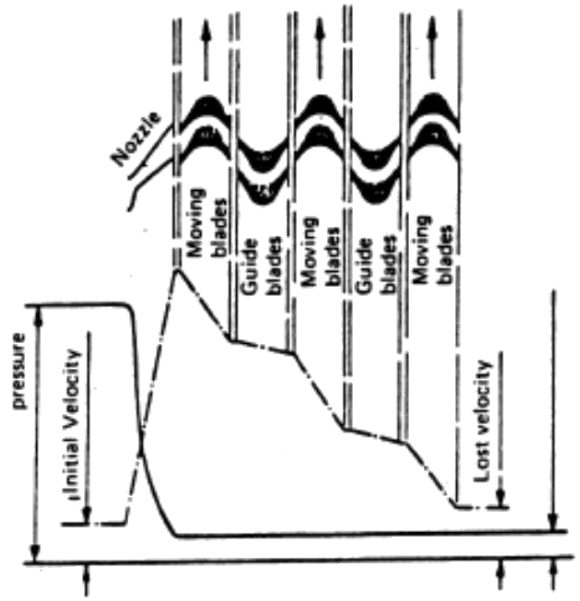
ملاحظة توضيحية : Labyrinth seal مانع تسرب متاهي هو نوع من موانع التسرب الميكانيكية Mechanical seal الذي يوفر مسارا متعرجا للمساعدة في منع التسرب . يوجد مثال لمثل هذا المانع في بعض الأحيان داخل محمل المحور Rotor bearing للمساعدة في منع تسرب زيت التشحيم Oil lubricating للمحمل .



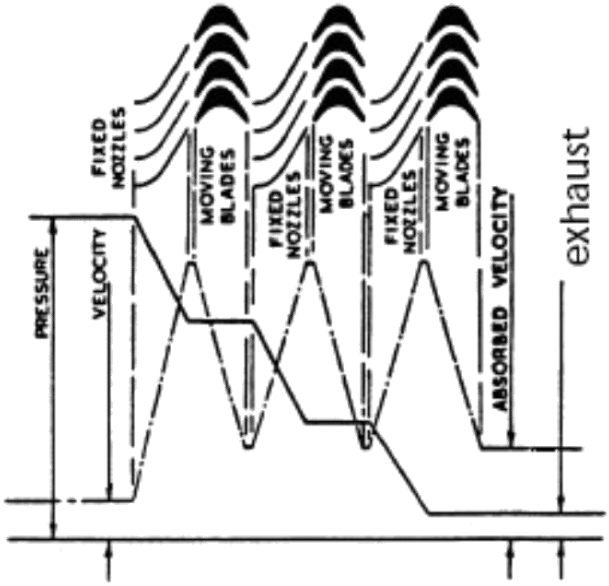
الشكل (١٠٤) المقاطع الجانبية وهندسة ريش التوربينات الدفعية و رد الفعل
Impulse & Reaction turbines blade geometry & profiles

التكوينات المختلفة للتوربين الدفعي
The different configurations of impulse turbine

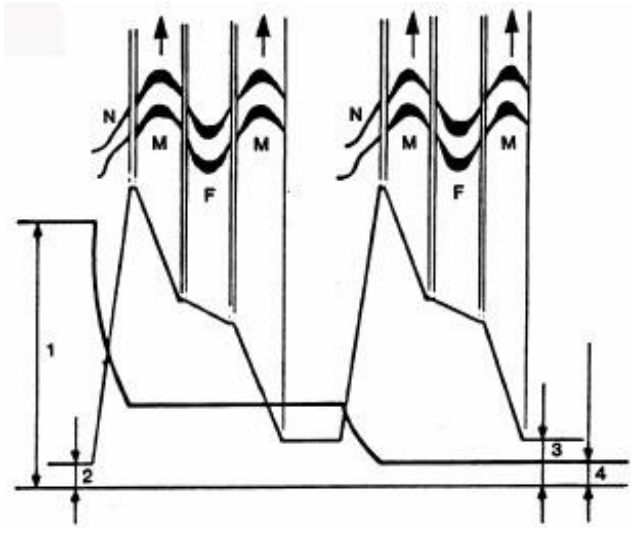
يشتمل التوربين الدفعي على ثلاث تكوينات أو أشكال رئيسية وهي :
أ - تركيب الضغط Pressure Compound . الطريقة التي يتم بها الضغط في التوربينات البخارية للتخفيض في عدد من المراحل وليس في فوهة واحدة .
ب- تركيب السرعة Velocity compound .
ج- تركيب السرعة والضغط Velocity & pressure compound .
تظهر التكوينات (التراكيب) المختلفة للتوربين الدفعي في الأشكال أدناه :



الشكل (١٠٥) تركيب السرعة Velocity Compound



الشكل (١٠٦) مراحل دفع تركيب الضغط
Pressure Compound impulse stages

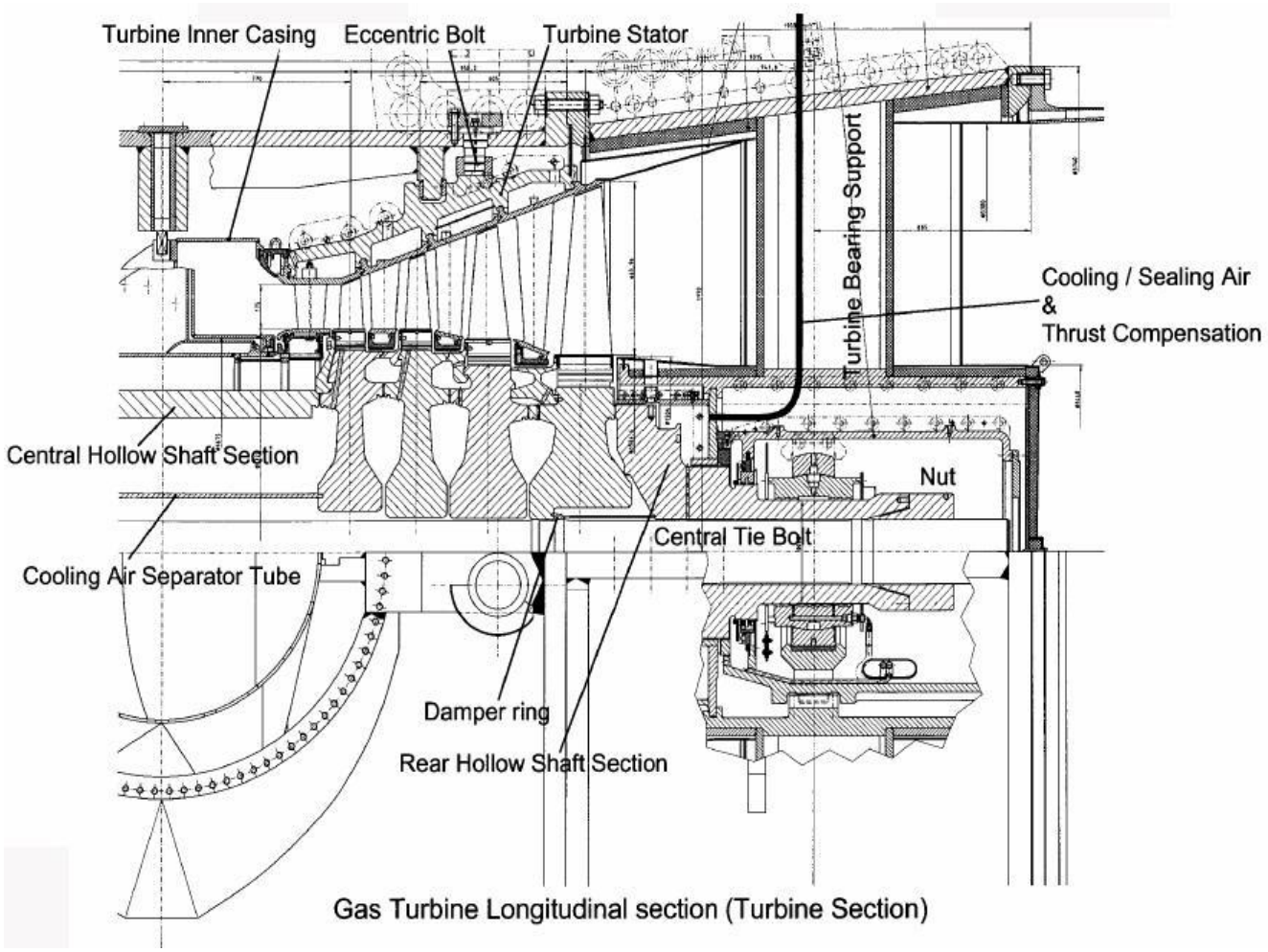


الشكل (١٠٧) تركيب السرعة والضغط
Velocity & pressure compound

١ = ضغط المدخل Inlet pressure
٢ = السرعة الأولية Initial velocity
٣ = السرعة الضائعة (المخرج) Lost velocity
٤ = العادم Exhaust
N = فوهة Nozzle
M = ريشة متحركة Moving blade
F = ريشة توجيه ثابتة Fixed guide blade

بشكل عام ، يستخدم معظم المصممين تكوين أو تركيب مشترك دفعي ورد فعل Combined Impulse & Reaction configuration ، وتستخدم معظم التوربينات الغازية توربينات رد الفعل مع مرحلة أولى ثابتة تكون دفعية .

تصميم التوربين الغازي Gas turbine design

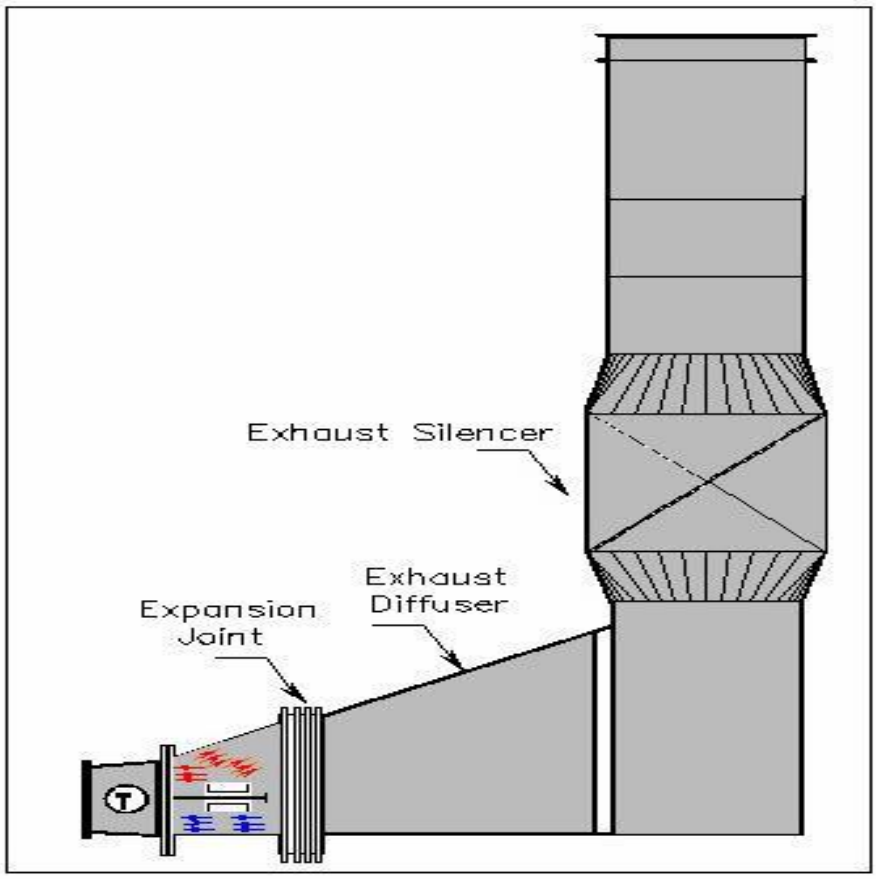


الشكل (١٠٨) التوربين الغازي سيمنز Gas Turbine SIEMENS - V94.2

يحيط بالجزء الثابت للتوربين Turbine stator غطاء Shroud كدرع واقي وهناك فجوة بينهما لتقليل نقل الحرارة بالتوصيل Conduction heat transfer .

تحتوي أقراص محور التوربين Turbine rotor discs على فتحات صغيرة لهواء التبريد Cooling air المستخلص من الضاغط Compressor في مراحل مختلفة ، بحيث تتلقى كل مرحلة من مراحل التوربين درجة حرارة هواء تبريد مناسبة . يُستخدم هواء التبريد هذا لتبريد الريش المتحركة . كما يتم تبريد ريش الجزء الثابت من التوربين من مستخلصات الضاغط Compressor extractions .

لا توجد ثقوب مراقبة أو رؤية Peep holes في قسم التوربين Turbine section حيث يمكن قياس خلوصية Clearance طرف أو رأس الريشة Blade tip من جانب الحارق Combustor أو جانب العادم Exhaust (بالنسبة لتوربين غازي يستخدم حارق من نوع الصومعة Silo type combustor فقط) .
إن إتجاه قوة دفع التوربين Turbine thrust يكون عكس إتجاه قوة دفع الضاغط و قيمتها أعلى .
يتم وضع محمل (مسند) التوربين الغازي Gas turbine bearing أسفل التيار الساخن Hot stream لتقليل مستوى الحرارة (أنظر الشكل أدناه) ، كما أن محمل التوربين محمي من التيار الساخن بواسطة مانع تسرب هوائي Seal air من إستخلاص الضاغط ، وهذا الهواء يوفر أيضا تبريد لمحمل التوربين الغازي و إما يخرج من ثقوب المحمل ليختلط مع العادم أو أنه يختلط بزيت التزييت lube oil الذي يعود إلى خزان الزيت Oil tank .
يتم إدخال زيت التزييت بتدفق أعلى منه في المحامل الأخرى وذلك لتوفير التبريد لمحمل التوربين ولتجنب درجة الحرارة المرتفعة من البخار الساخن الذي يمر عبر المحمل .

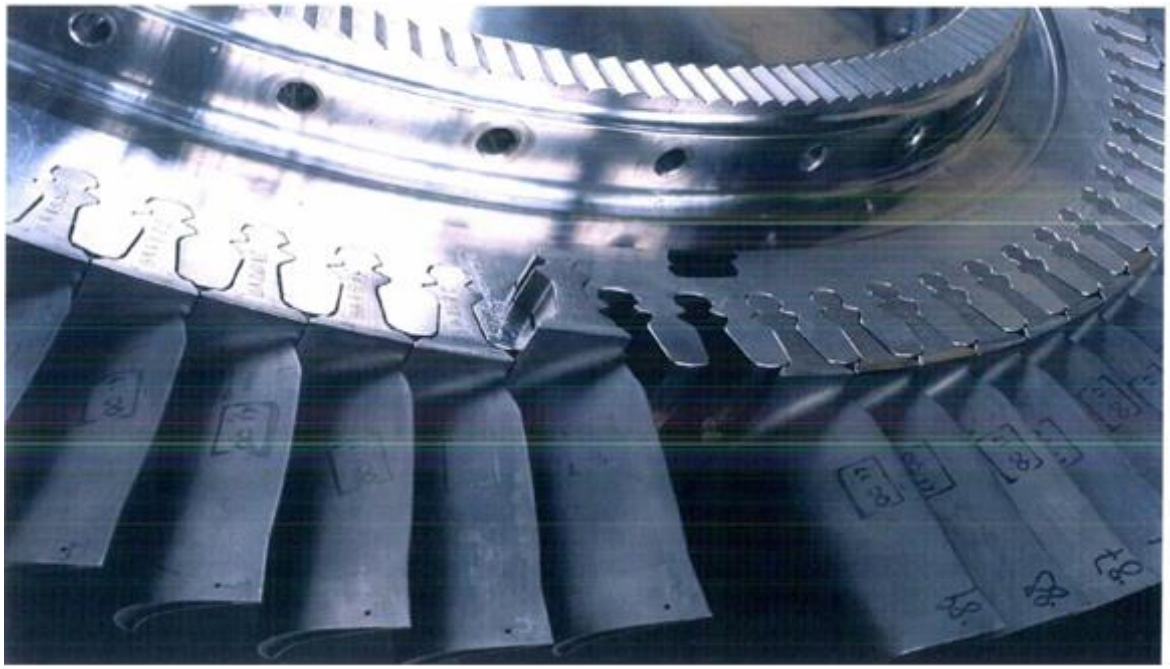


الشكل (١٠٩) الغازات الساخنة Hot gases تترك التوربين عن طريق الناشر Diffuser و يتم وضع محمل التوربين الغازي أسفل التيار أو المجرى الساخن Hot stream

يُصنع الجزء الثابت للتوربين من خليط من السبائك Alloys والحديد الزهر (الصب) Cast iron . ويُصنع الغلاف الداخلي للتوربين Turbine inner casing من خليط من السبائك وبشكل أساسي من النيكل والكروم . Nickel & Chromium .

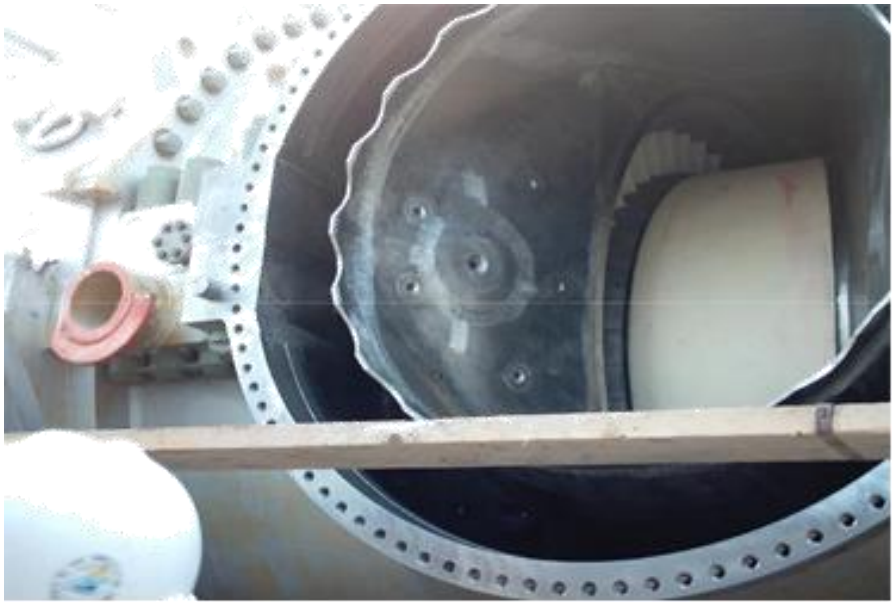
أما ريش التوربين فتُصنع من السبائك باهظة الثمن التي تتحمل إرتفاع درجات الحرارة . إن توربين الطائرة بوينج -٧٥٧ (Boeing -757) تكون ريشها مصنوعة من التركيبات التالية :
التيتانيوم Titanium (٣٨ ٪) والنيكل (٣٧ ٪) ، والكروم (١٢ ٪) ، والكوبالت Cobalt (٦ ٪) ، والألمنيوم Aluminum (٥ ٪) ، والسبائك الأخرى (٢ ٪) .
لاحظ أن الطائرة يجب أن تكون خفيفة قدر الإمكان لتقليل وزنها Weight ، وهذا هو السبب في أن محتوى (نسبة) التيتانيوم في ريشة توربين الطائرة بكون مرتفع للغاية . تُصنع ريش التوربينات الغازية الأرضية الحديثة Modern land base gas turbine بشكل أساسي من النيكل والكروم والكوبالت جنبا إلى جنب مع السبائك الأخرى .
يتم تبريد كل من الريش المتحركة والثابتة للتوربين عن طريق الهواء ، يدخل الهواء إلى داخل الريشة المتحركة وفي الجذر أيضا هناك هواء مُستخلص يوفر ممانعة Sealing لدخول الغازات الحارة إلى الجزء المجوف Hollow section من المحور (موانع تسرب المرحلة البينية Inter stage seals) . إن هواء منع التسرب Sealing air يوفر أيضا التبريد اللازم لأقراص محور التوربين Turbine rotor disks .
عادة تكون الريش الثابتة الأولى والثانية من التوربين الغازي مغلفة (مطلية) بالسيراميك Ceramic لتقليل الإجهادات الحرارية Thermal stresses .
كل زيادة في درجة حرارة مدخل التوربين سوف تُزيد من قدرة التوربين Turbine power بنسبة (١,٧٪) والكفاءة الحرارية Thermal efficiency بنسبة (٠,٥٪) .

الشكل (١١٠) الحلقات الكاربونية لريش ومحامل التوربين مركبة في الجزء الثابت من التوربين
Gas turbine blades &bearing carbon rings fitted in stator



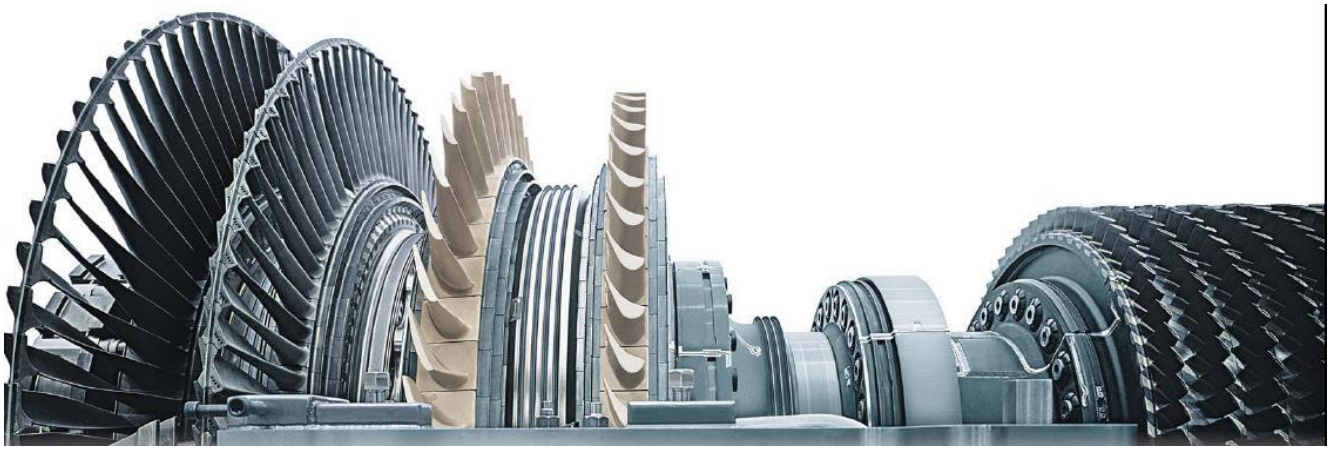
الشكل (١١١) قرص محور التوربين ووصلة ربط هيرث
Turbine Rotor Disk & Hirth coupling

ملاحظة توضيحية : Hirth coupling أو Hirth joint هو نوع من الإتصال الميكانيكي Mechanical connection الذي يحمل اسم المطور Albert Hirth . يتم إستخدامه لربط قطعتين من محور معا ويتميز بأسنان مدببة تتشابك (تتعشق) معا في نهاية كل قطعة .



الشكل (١١٢) المرحلة الأولى من غرفة إحتراق نوع الصومعة
First stage of silo type combustor

الشكل (١١٣) المرحلة الأولى من الريش المتحركة للتوربين الغازي
Gas turbine first stage moving blade



الشكل (١١٤) توربين غازي نوع (GE) ، يظهر فيه المحور والريش المتحركة والتي تكون أولى المرحلتين مطلية بالسيراميك

ملاحظة توضيحية : التركيب Compounding في التوربينات البخارية هو الطريقة التي يتم فيها إستخلاص الطاقة Energy من البخار في عدد من المراحل Stages بدلا من مرحلة واحدة في التوربين . يحتوي التوربين البخاري المركب على مراحل متعددة ، أي أنه يحتوي على المزيد من صفوف الريش Rows of blades ، في سلسلة ، متصلة بالعمود أو مثبتة في الغلاف ، بحيث يتم إمتصاص ضغط البخار أو سرعة النفث بواسطة التوربين في عدد مراحل .
في جميع التوربينات ، تتناسب سرعة الريشة بشكل مباشر مع سرعة البخار المار فوق الريشة فالبخار الخارج من المرجل Boiler له محتوى حراري Enthalpy عالي يعني طاقة عالية . عندما يصطدم هذا البخار بمحور أحادي المرحلة Single stage ، سيفشل المحور الدوار نتيجة الطاقة الحركية العالية أي إذا تم تمدد البخار من ضغط المرجل إلى ضغط المكثف Condenser pressure في مرحلة واحدة ، فإن سرعته ستكون عالية جدا.
ومن ثم ، يمكن أن تصل سرعة المحورالدوار (التي ترتبط به الريش) إلى حوالي (٣٠،٠٠٠ دورة في الدقيقة) ، وهي سرعة عالية جدا للإستخدامات العملية بسبب الإهتزاز الشديد High vibration ، علاوة على ذلك في هذه السرعات العالية تكون قوى الطرد المركزي هائلة ، والتي يمكن أن تلحق الضرر ببنية التوربين Turbine structure . لذلك من أجل الإستفادة من كل الطاقة الحركية دون فشل المحور الدوار ، يتم إستخدام المزيد من صفوف الريش Rows of blades (التي تزيد من وزن المحور الدوار - زيادة الوزن يؤدي إلى سرعة أقل) .
يتميز تركيب السرعة Velocity Compounding بريشة ثابتة بين صفين من الريش لتغيير اتجاه تفريغ أو تصريف البخار من الصف الأول إلى الصف التالي ، بينما في تركيب الضغط Pressure compounding يتم إستخدام فوهات ثابتة بدلا من الريش الثابتة .

تقنيات تبريد ريش التوربين الغازي

GAS TURBINE –BLADE COOLING TECHNIQUES

تعتمد درجة حرارة مدخل التوربين على :

أ - مادة الريش Material of the blades .

ب - الوقود Fuel .

ج - تقنية التبريد Cooling technique .

أكثر الأجزاء أو المكونات التي تعاني من درجات الحرارة المرتفعة والأجهادات العالية High stresses والهجوم الكيميائي Chemical attack هي المرحلة الأولى من الريش الثابتة للتوربين Turbine fixed blades (عادة ما تكون مطلية بطبقة من السيراميك Ceramic لتوفير حماية إضافية) .

إن الأسباب الرئيسية للإجهاد الحراري العالي High thermal stress على الريش المتحركة للتوربين Turbine moving blades هي :

أ - سرعة دوران عالية .

ب - التوزيع غير المتساوي لدرجات الحرارة على المقاطع العرضية للريش المختلفة .

ج - قوى الغاز الساكنة والنبضية (المتذبذبة) Static & pulsating gas forces التي قد تؤدي إلى إرتفاع خطيرفي الإجهادات الإهتزازية Vibration stresses .

د - التغييرات في درجة الحرارة التي تحدث أثناء بدء التشغيل والإطفاء والتوقف المفاجيء Start up & shutdown .

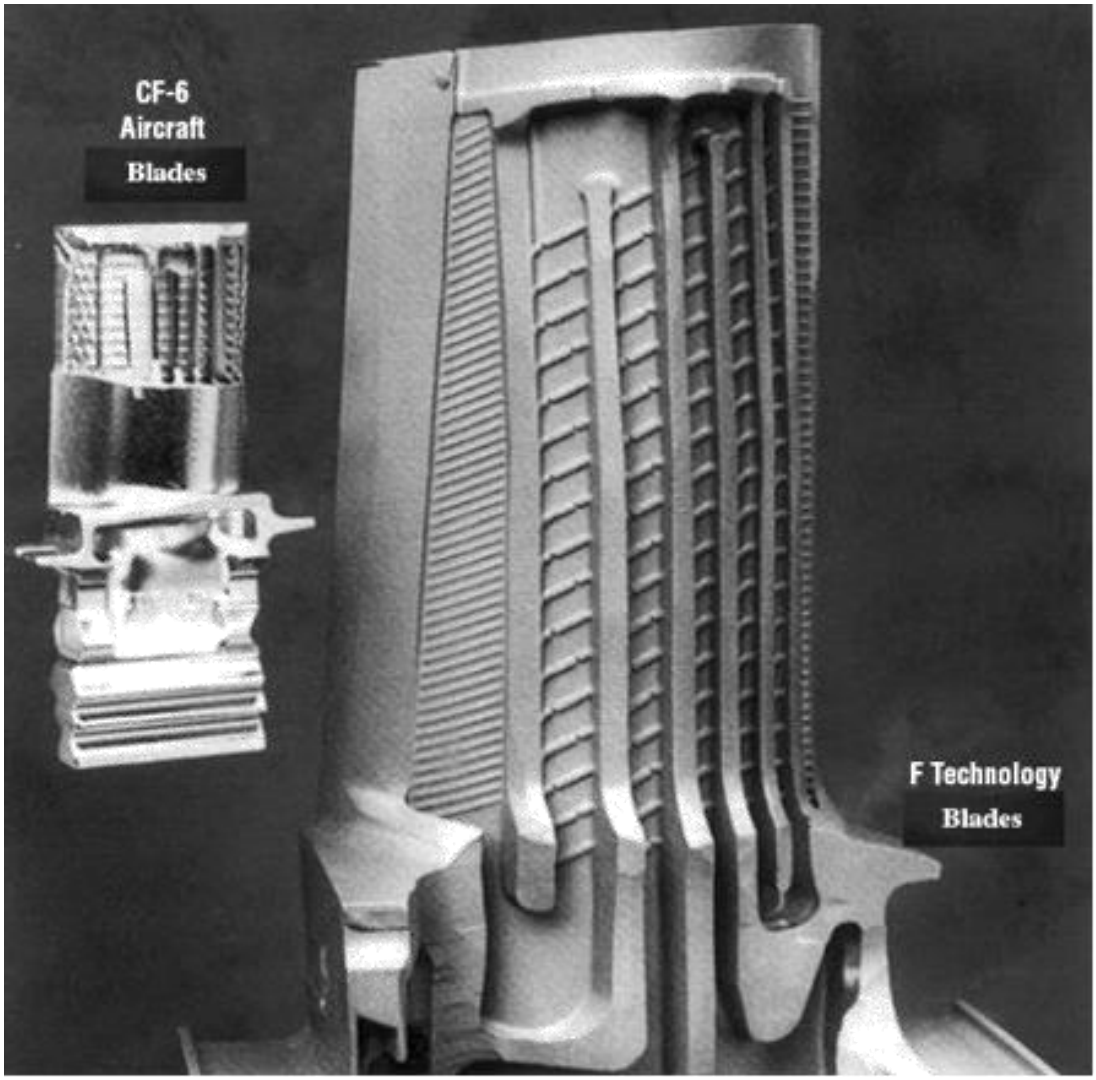
هـ - تغييرات الحمل الطبيعي وغير الطبيعي التي تؤثر على درجة حرارة مدخل التوربين (بخلاف التوربين البخاري Steam turbine الذي يحتوي على ظروف مدخل ثابتة لأحمال مختلفة) .

تكون ريش التوربين مجوفة Hollow بحيث يمكن دوران وإنتشار مائع التبريد Coolant بحرية من خلالها .

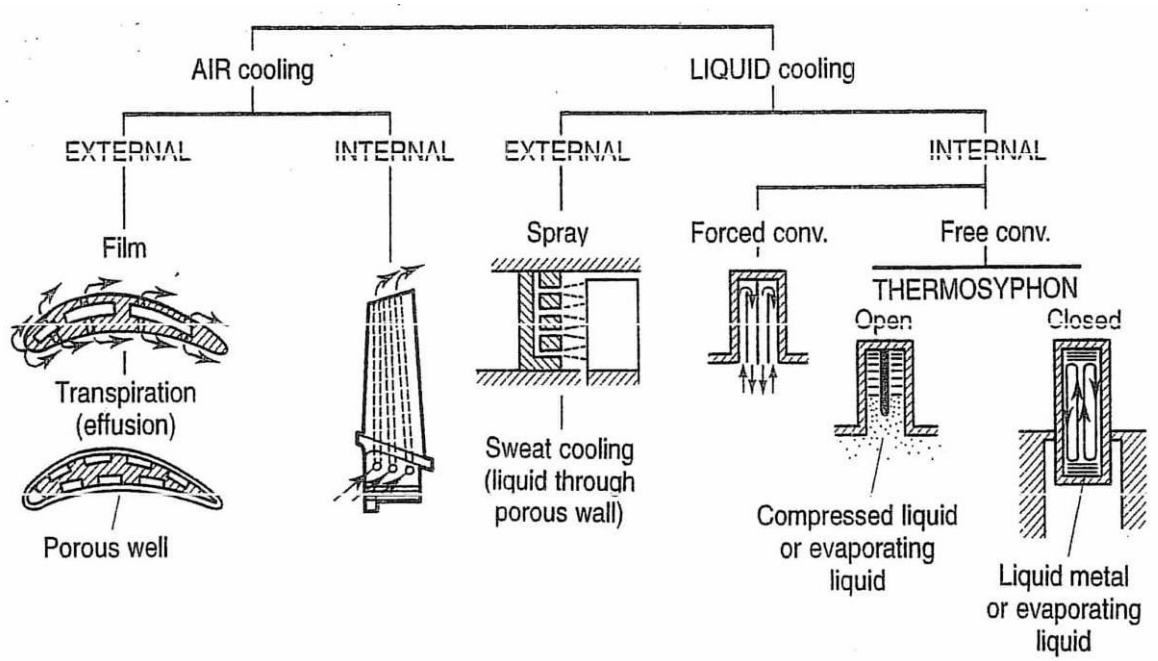
يسمى جذر الريشة Blade root (الحافة الأمامية أو الموجهة Leading edge) ويسمى طرف رأس أو قمة الريشة Blade tip (الحافة الخلفية أو المتابعة Trailing edge) .

يجب تبريد ريش التوربين لحمايتها من الإنصهار Melting بسبب إرتفاع درجة حرارة مدخل التوربين ، في التصاميم الحديثة أرتفعت درجة حرارة مدخل التوربين إلى (١٣٧٠ درجة مئوية) . هناك نوعان من التقنيات الرئيسية المستخدمة لتبريد ريش التوربين وهما التبريد بالهواء Air Cooling والتبريد بالماء (البخار) Water Cooling .

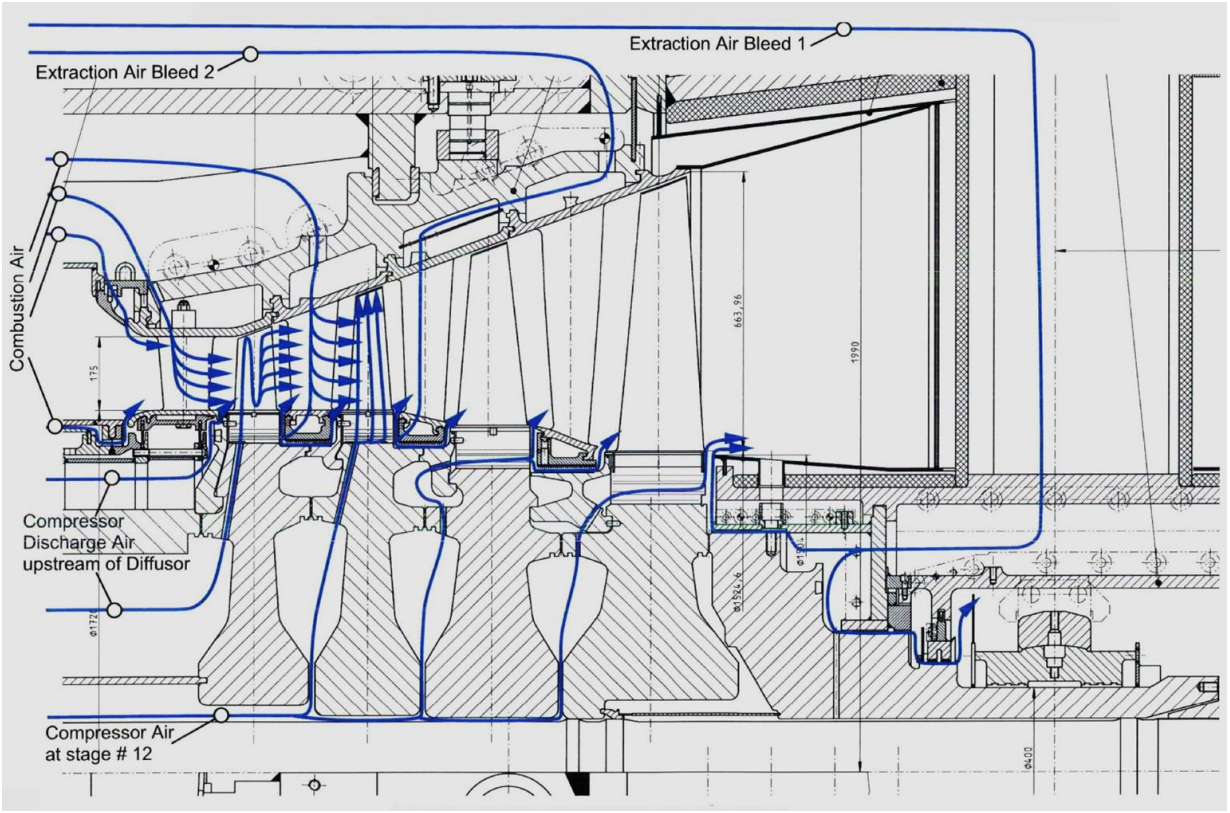
إن نطاق تقنية التبريد بالهواء يصل إلى درجة حرارة مدخل توربين (١١٥٠ درجة مئوية) ولتقنية التبريد بالماء حتى درجة حرارة مدخل توربين (١٣١٥ درجة مئوية) . في بعض التصاميم المركبة Hybrid designs يتم إستخدام كلا الأسلوبين حيث يتم إستخدام الماء لأول مرحلة ريش ثابتة من التوربين ويتم استخدام الهواء للريش الأخرى .



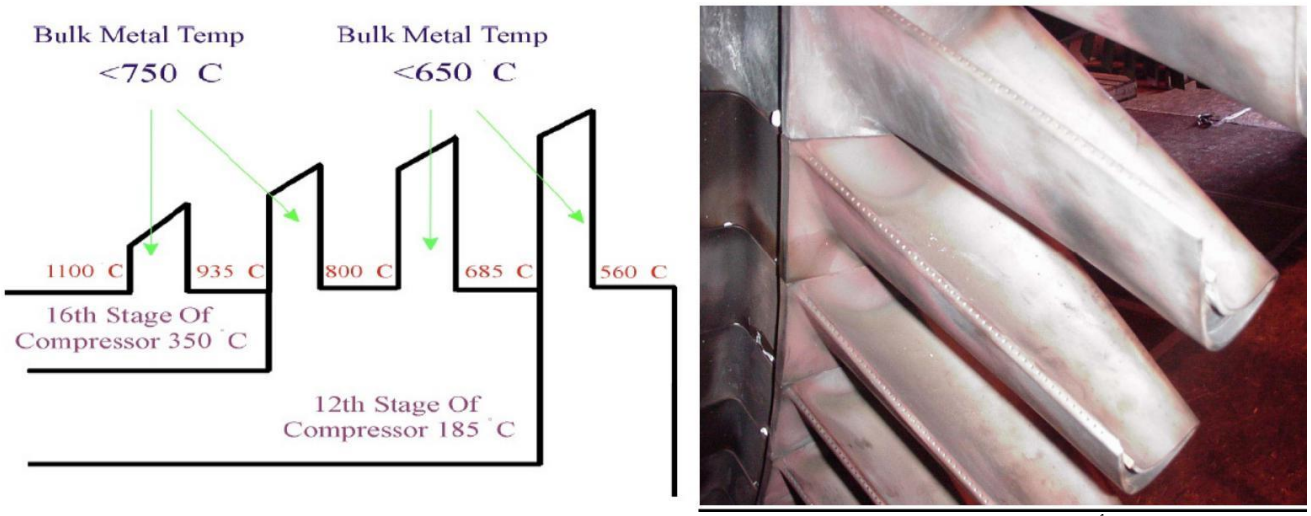
الشكل رقم (١١٥) ممرات أو قنوات التبريد Cooling passages لريشة محور التوربين



الشكل (١١٦) طرق تبريد ريش التوربين

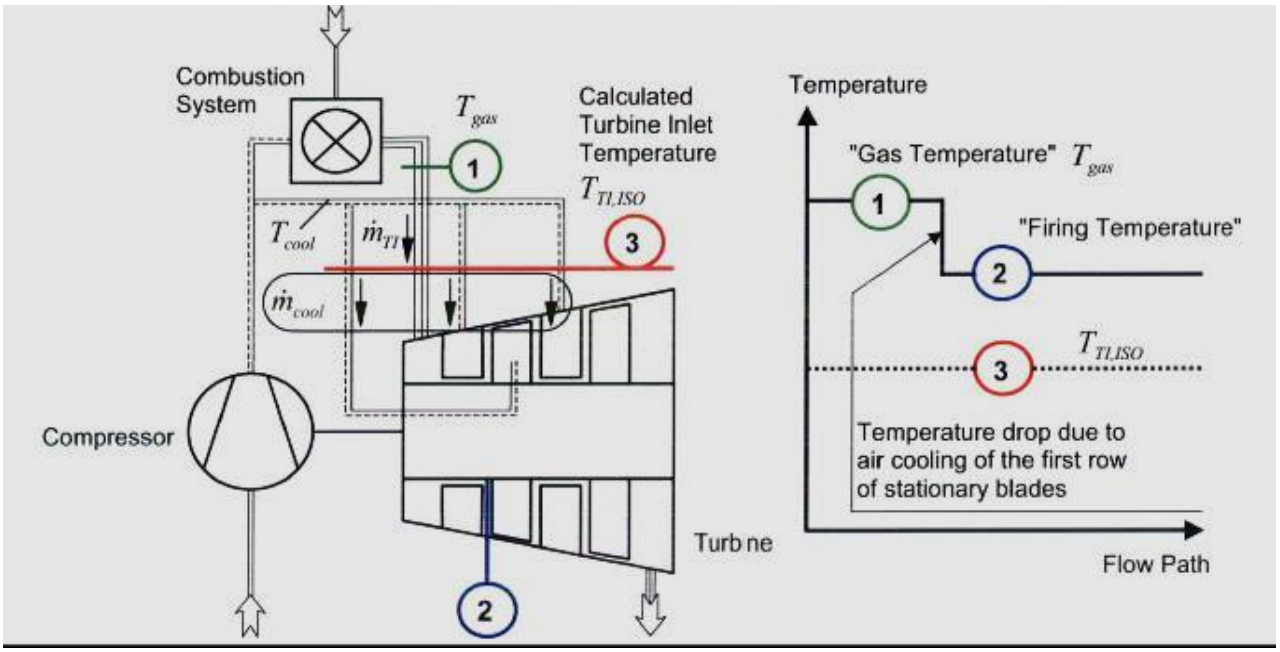


الشكل (١١٧) يظهر بوضوح تدفق هواء التبريد في مقطع التوربين و إلى محامل Bearings التوربين الغازي



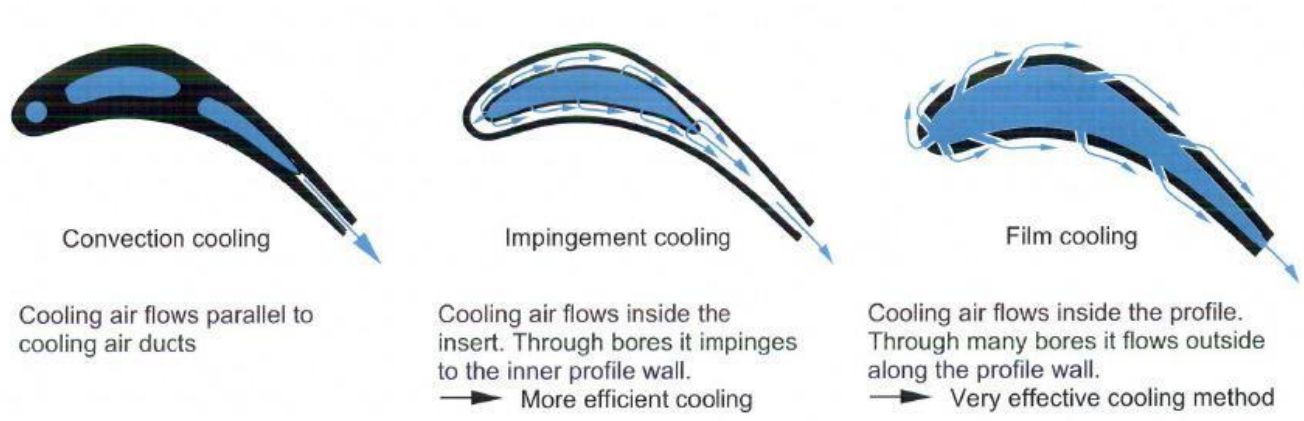
الشكل (١١٨) يجب أن تكون درجة حرارة الهواء المستخلص Air extraction متناسبة مع درجة حرارة الغاز على طول التوربين

لاحظ أنه يجب تحديد درجة حرارة مدخل التوربين وفقا لشروط الآيزو ISO حيث يتم تبريد الريش الثابتة في المرحلة الأولى من الداخل عن طريق الهواء ومن ثم سيكون هناك انخفاض في درجة الحرارة للغازات الساخنة عند المدخل .



الشكل (١١٩) تعريف درجة حرارة مدخل التوربين طبقاً للمواصفة ISO-2314

طرق تبريد الريشة :



الشكل (١٢٠) أنواع أو أنماط تبريد الريشة

هناك أربعة أنواع رئيسية من طرق التبريد ، وقد تحتوي بعض الريش على طريقتين أو ثلاث طرق مشتركة ، وهذه الطرق هي :

١ - التبريد بالحمل الحراري Convection Cooling

التقنية الأكثر شيوعا المستخدمة في التوربين الغازي حيث يلجأ الهواء المتدفق لجذر الريشة وينتقل عبر ممرات متعددة قبل أن يترك الريشة عند طرفها الرأسي (يتدفق الهواء دائما بالتوازي مع محور المقطع العرضي للريشة) .

٢- التبريد التصادمي Impingement Cooling

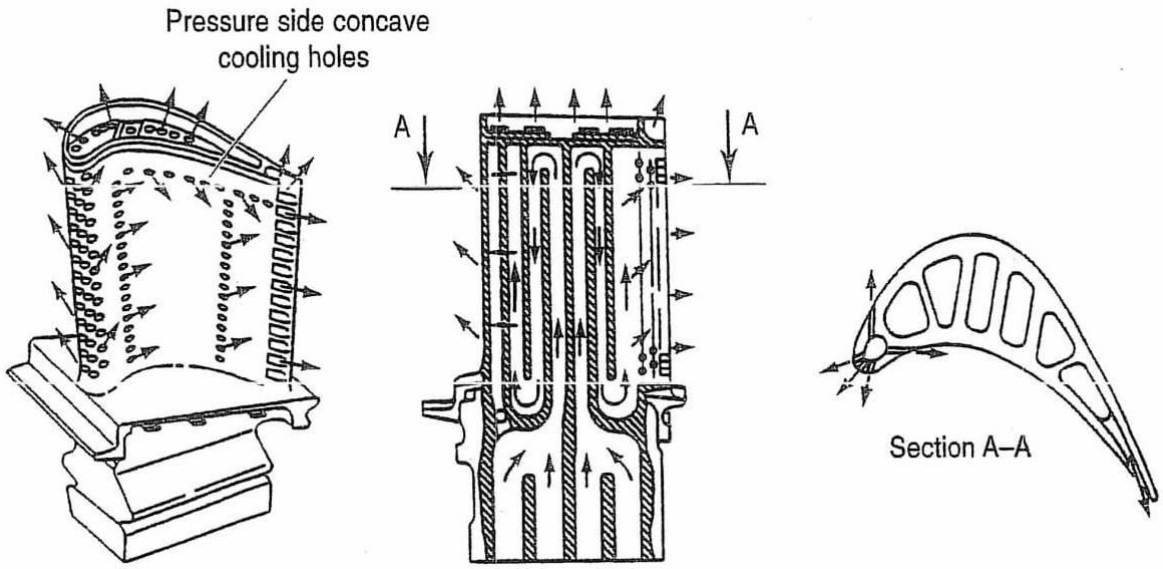
هو شكل من أشكال التبريد بالحمل الحراري ولكن هنا يتم إطلاق الهواء على سطح الريشة بسرعة عالية (يتدفق الهواء بشكل متوازي ومتعامد مع محور المقطع العرضي للريشة) . يمكن أن تقتصر هذه التقنية على الأجزاء المطلوبة من الريشة ، على سبيل المثال يحتاج جذر الريشة إلى تبريد أكثر من وسط أو طرف الريشة . يصطدم هواء التبريد عند جذر الريشة لتحسين عملية التبريد في هذا الجزء .

٣- التبريد الغشائي Film Cooling

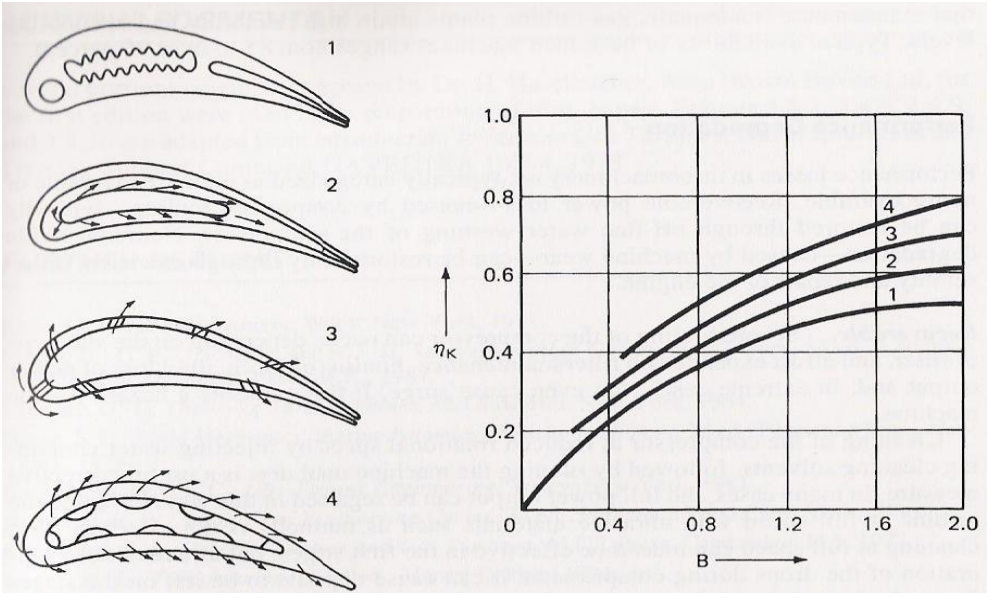
إنها طريقة تبريد فعالة للغاية حيث يتدفق هواء التبريد من الجذر ويخرج عند الطرف الرأسي وعند الثقوب حول سطح الريشة ، سيحيط هذا الهواء الريشة بطبقة رقيقة تضمن أقصى كفاءة تبريد للريشة maximum blade cooling efficiency .

٤- التبريد النضوحي Transpiration Cooling

في هذه الطريقة نوع من التشابه للتبريد الغشائي ، حيث يتم تبريد الريشة عن طريق تمرير هواء التبريد عبر الجدار المسامي Porous wall المتكون (المتشكل) على الريشة . يتدفق الهواء على هذه المسامات ويخرج من الريشة بعد تبريدها . عيوب هذه الطريقة هي أنها تتطلب تدفق هواء تبريد كبير ، إضافة إلى تلف الريش المسامية بسهولة .

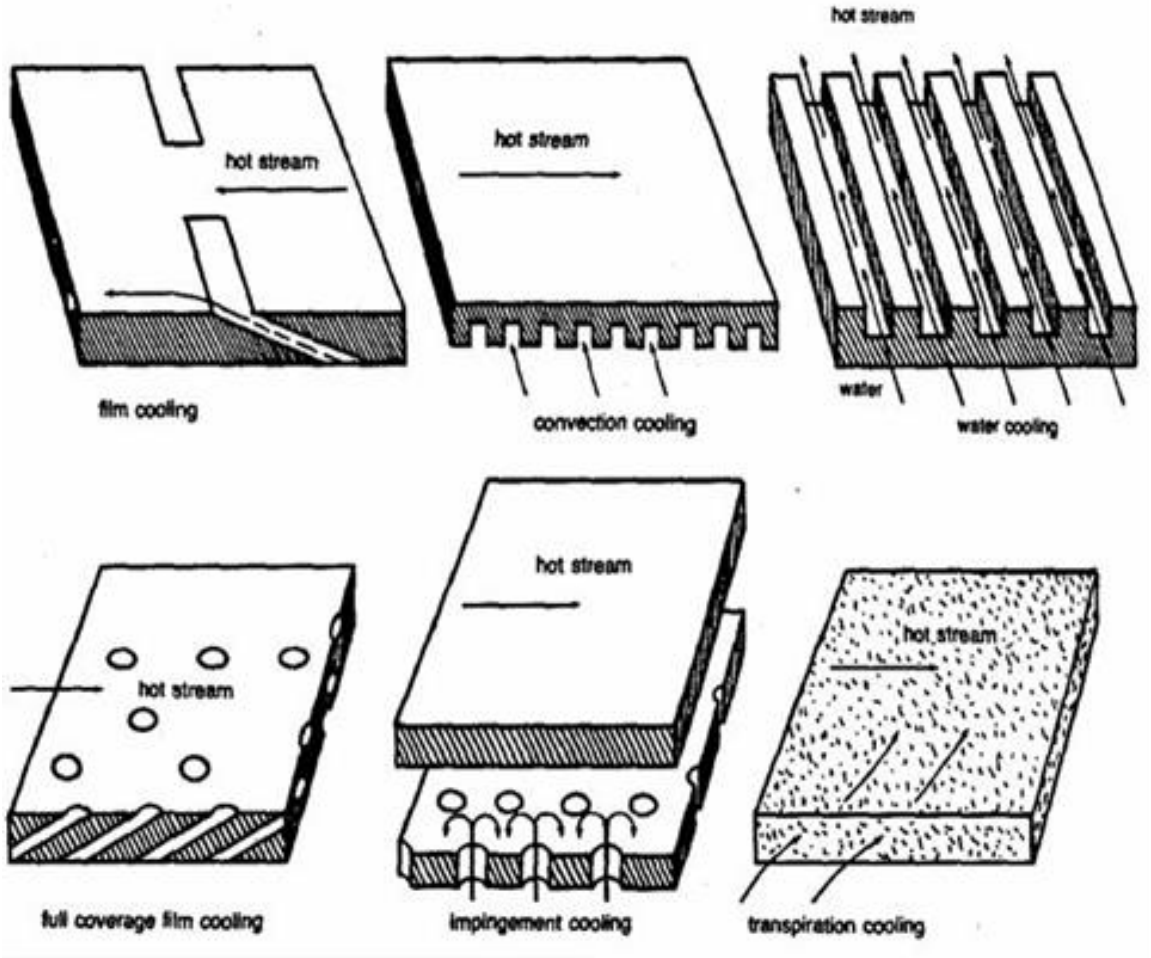


الشكل (١٢١) هواء التبريد يتحرك حول سلسلة أو مجموعة من الممرات قبل الخروج



الشكل (١٢٢) كفاءة التبريد (ηk) مقابل فعالية التبريد لطرق التبريد المختلفة للريشة

قد تمثل الكمية المطلوبة من هواء التبريد (٥٪) من إجمالي إنتاج الضاغط Compressor للوحدات الصغيرة و (١٦٪) للوحدات الكبيرة لغرض تبريد ريش التوربينات الغازية . هذا الهواء ليس متاحا بالطبع للإحتراق ، وبالتالي يمثل فقدان للطاقة . قد يتطلب أن يكون ضغط هواء التبريد مختلفا ليتناسب مع الضغط في مناطق التوربين المختلفة .



الشكل (١٢٣) أنواع تبريد الريش

٥ - التبريد بالماء Water Cooling

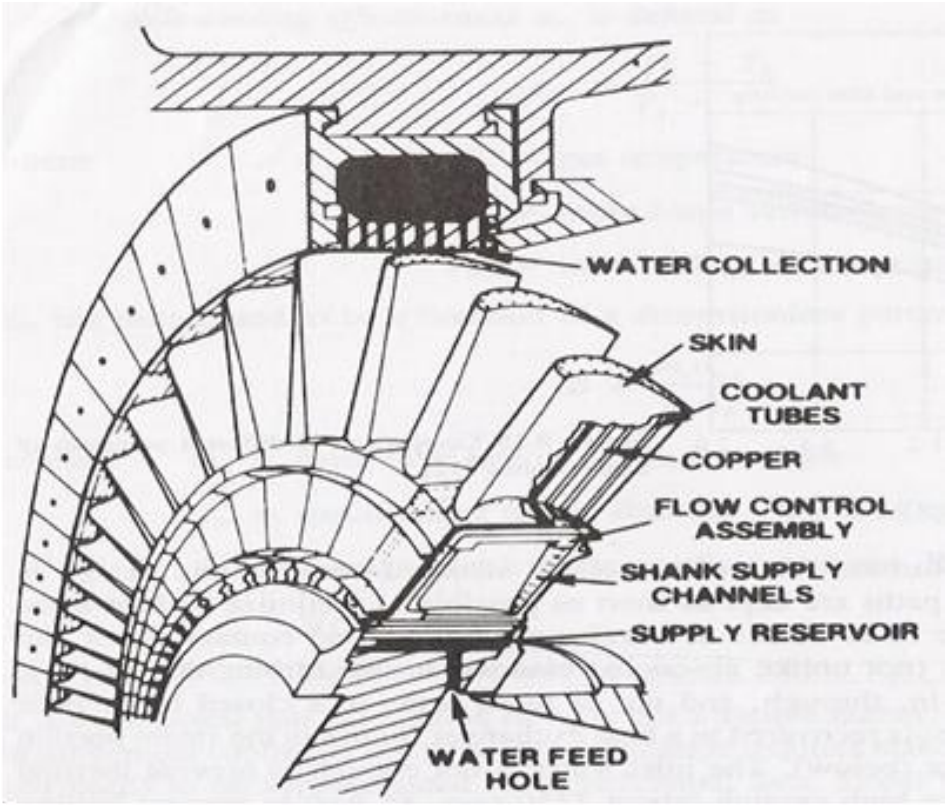
تستخدم تقنية التبريد بالماء عند درجة حرارة مدخل توربين عالية ، حيث تتجاوز درجة حرارة الغاز (١١٥٠ درجة مئوية) ، إن النسبة المئوية للهواء المستخرج أو المستخلص (الهواء الذي يمر حول By pass غرفة الإحتراق) لتبريد أجزاء التوربين تزداد إلى قيمة غير مقبولة ويفضل إستخدام مياه التبريد (كل ١ ٪ من إستخراج الهواء من الضاغط سيقلل طاقة أو قدرة التوربين بنسبة ٢ ٪) ، يُستبعد إستخراج الهواء في تقنية التبريد بالماء .

لقد ثُبت من خلال نتائج الاختبار في كلا التقنيتين أن درجة حرارة الريشة تكون أقل من (٩٠٠ درجة مئوية) في حالة التبريد بالهواء بينما تكون درجة حرارة الريشة تماما أقل من (٤٥٠ درجة مئوية) في التبريد بالماء .

يجب تسخين ماء التبريد بدرجة كافية قبل إدخاله إلى ريش التوربين لتجنب الصدمة الحرارية Thermal Shock (تضرر وربما إنكسار الجسم الصلب نتيجة لتغير مفاجئ في درجة حرارته) . تتميز الريش الثابتة عادة بدورة ماء تبريد مغلقة Closed cooling water loop ، بينما تبرد الشفرة المتحركة بدورة ماء تبريد مفتوحة Open cooling water loop . في هذه الحالة يدخل الماء من جذر الريشة ويُسمح له بالغليان ثم يُطرح كبخار من طرف رأس الريشة بواسطة قوة الطرد المركزي Centrifugal force .

تمتلك المياه سعة حرارية وقدرة على نقل الحرارة Heat capacity & Heat transfer capability أعلى بكثير من الهواء ولكنها لا تستخدم بشكل شائع بسبب التعقيد الإضافي للتصميم . هذه التقنية مناسبة فقط للتوربينات الأرضية الكبيرة التي تحتوي على درجة حرارة مدخل توربين عالية وفي هذه الآلات أو الماكنات يتم إستخدام الماء لتبريد المرحلة الأولى من الريش الثابتة بينما يتم تبريد المراحل الأخرى عن طريق إستخلاص الهواء ، إن الهدف الرئيسي من هذه التصاميم المركبة هو الحد من إستخلاص الهواء من تدفق الضاغط الذي قد يصل إلى ١٦٪ من إجمالي التدفق (كل ١٪ من الهواء المستخلص من الضاغط سوف يقلل من طاقة التوربين بنسبة ٢٪) .

المياه غير المتبخرة Unvaporized water تُنقل شعاعيا (نصف قطريا) Radialy بواسطة قوة الطرد المركزي ويمكن تجميعها في مجمعات مياه Water Collectors التي يتم تركيبها على الغلاف الداخلي للتوربين من الخارج ، وكما في الشكل أدناه .



الشكل (١٢٤) الريش المتحركة المبردة بالماء مع مجمع المياه في المحيط

مقارنة بين تبريد ريش التوربين بالهواء والتبريد بالماء

ت	تبريد التوربين عن طريق إستخلاص الهواء	تبريد التوربين بالماء
١	الهواء المستخلص الذي يتجاوز غرفة الإحتراق يُقلل من إجمالي التدفق الذي يدخل التوربين والذي يمثل خسارة في كفاءة التوربين Turbine Efficiency (٥ - ٦٪ من تصريف الضاغط للوحدات متوسطة المدى و يصل إلى ١٦٪ للوحدات الكبيرة) .	لا حاجة لإستخراج أو إستخلاص الهواء من الضاغط .
٢	تصميم أسهل و تكلفة أوطأ .	تصميم أكثر تعقيدا وتكلفة أعلى .
٣	مع نظام تبريد بالهواء من النوع المفتوح ، خلط الهواء مع تيار ساخن سيخفض درجة حرارة الغازات الساخنة في كل مرحلة Stage والتي ستقلل من الشغل Work الذي أنجزه كل مرحلة	مع نظام تبريد بالماء من النوع المفتوح ، خلط الماء مع تيار ساخن سيخفض درجة حرارة الغازات الساخنة في كل مرحلة ولكن بما أن الماء سوف يتبخر إلى بخار الذي يملك تمدد Expansion أكبر من الهواء ، سيكون هناك قدرة إضافية منتجة Power out put عن التوربين الذي سيوازن ويعوض الإنخفاض في درجة حرارة الغاز الساخن .
٤	درجة حرارة الهواء المستخلص يجب أن تكون متناسبة مع درجة الحرارة المطلوبة لتبريد المرحلة تجنبا للصدمة الحرارية Thermal Shock .	يجب تسخين الماء قبل دخوله إلى الريشة لتجنب الصدمة الحرارية .
٥	تقنية شائعة لتبريد ريش التوربين الغازي .	تقنية غير شائعة .

ملاحظة : أن التقنية المركبة (المختلطة) Hybrid technique التي تتضمن كل من التبريد بالماء وبالهواء تتم بواسطة التوربينات الغازية نوع GE .

كيف يتم قياس فعالية تبريد الريشة ؟

يتم التعبير عن كفاءة تبريد الريشة من خلال نسبة الإنخفاض الفعلي Actual drop ratio في درجة الحرارة التي تم تحقيقها إلى الإنخفاض النظري الأقصى Maximum theoretical drop المتحقق في درجة الحرارة

فعالية التبريد Cooling effectiveness (εb) $\varepsilon b = (Tg - Tb) / (Tg - Ta)$

حيث Tg = درجة حرارة الغاز الساخن Hot gas temperature

Ta = درجة حرارة مدخل هواء التبريد Cooling air inlet temperature

Tb = متوسط درجة حرارة سطح الريشة Mean blade surface temperature

تعريف التآكل والتعرية لريش التوربين الغازي

definition of Corrosion & Erosion for gas turbine blades

تعاني ريش التوربين من التآكل Corrosion و التعرية Erosion بدرجة الحرارة العالية .

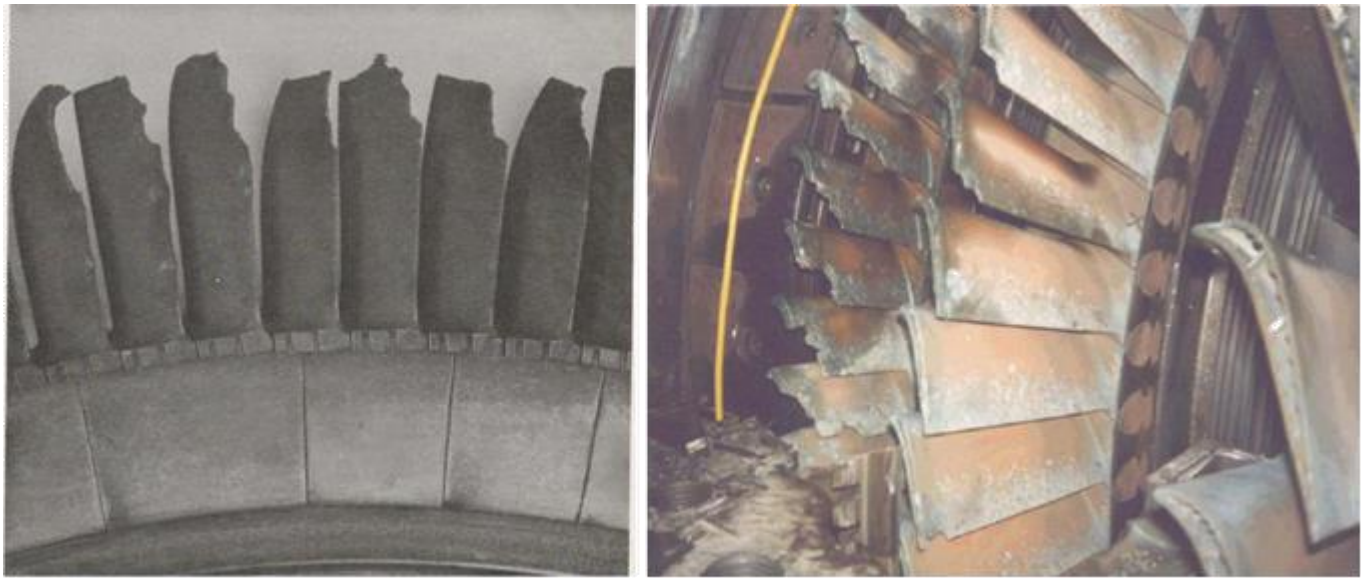
التعرية : فقدان مادة الريشة بسبب الكشط أو البري الذي يحدثه مائع متحرك .

التآكل : إزالة أو (نزع) مادة الريشة بسبب التفاعل الكيميائي .

عادة ما يتم طلاء المراحل الثلاث الأولى بمواد خاصة لتجنب التآكل .

الجزء في التوربين الذي يعاني بشكل كبير من الإجهادات و درجة الحرارة العالية هي المرحلة الأولى من الريش الثابتة First stage fixed blade ، هذه الريش تكون مطلية بالسيراميك Ceramic لتقليل الإجهادات الحرارية Thermal Stresses ، وكما في الشكل أدناه .

الشكل (١٢٥) المرحلة الأولى من الريش الثابتة للتوربين الغازي تعاني من التآكل والتعرية



الشكل (١٢٦) ريش توربين غازي متعرضة للتسخين المفرط Overheated

إن السبب الرئيسي للتآكل الحار للتوربين مرتبط بمحتويات الوقود وبضوح أكثر الملوثات والشوائب Contaminations الموجودة في الوقود ، وكذلك التلوث Pollution الموجود في الهواء الذي يدخل الضاغط Compressor .

والعامل الرئيسي في هذا النوع من الهجمات المسببة للتآكل هو كبريتات الصوديوم Sodium sulphate ، الناتجة عن مزيج من الكبريت Sulphur والصوديوم الموجود في الوقود .

عادة ما تكون نقطة أو درجة إنصهار Melting point كبريتات الصوديوم عالية بما فيه الكفاية بحيث لا تترسب على أسطح الريشة . ومع ذلك ، فإن وجود كميات قليلة من المواد الثانوية ، مثل خامس أكسيد الفاناديوم Vanadium pentoxide ، يقلل من درجة انصهار كبريتات الصوديوم دون (أقل من) درجة حرارة سطح الريشة مع ترسبات ناتجة على الريشة . بمجرد أن تترسب الكبريتات وتمتزج مع مواد الريشة ، تهاجم سطح الريش وتشكل الكبريتيدات المعدنية Metallic sulphides وهي أنواع شديدة العدائية لتآكل العديد من المعادن مثل الفولاذ والفولاذ المقاوم للصدأ والنحاس Steel, Stainless steel, and Copper .
ولأن نسبة الهواء \ الوقود عالية جدا في التوربينات الغازية ، هناك كمية أوكسجين Oxygen إضافية متوفرة في منطقة الريشة لأكسدة Oxidize هذه الكبريتيدات (الهواء يحتوي على ٢١ ٪ من الأوكسجين من حيث الحجم و في عادم التوربين Turbine exhaust يمثل الهواء ١٥ ٪ من الغازات الساخنة من حيث الحجم) . ثم يتحرر الكبريت لمهاجمة الطبقة التالية من سطح الريشة .

كبريتات أخرى ، مثل الليثيوم وكبريتات البوتاسيوم Lithium and Potassium sulphate الموجودة في الوقود ، سيكون لها نفس التأثير على ريشة التوربين وستتكرر نفس العملية أعلاه .

يمكن لحوالي (٥٠٠ غرام) من الرواسب (الشوائب) Deposits المتكونة والمتوزعة على الريشة ، تقليل كفاءة التوربين Turbine efficiency بنسبة (١٪) .

وإن الأضرار (التشوه والتلف) التي تحدث بمظهر الريشة تؤدي إلى تغيير هندسة مسار التدفق Geometry of flow path وبالتالي تقليل كفاءة الوحدة .

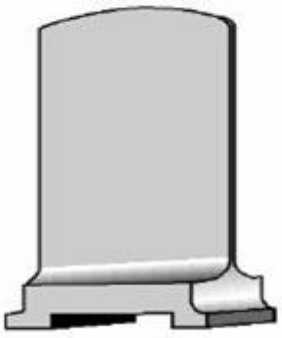
هناك طرق مختلفة للتحكم في التآكل الناتج عن تلوث الوقود ، وتشمل هذه الطرق :

١- القضاء على المواد المسببة للتآكل من الوقود والهواء :

بعض المواد الضارة في الوقود ، مثل كبريتات الصوديوم ، قابلة للذوبان في الماء ويمكن غسلها بالماء . ثم يتم إزالة مياه الغسيل ، مع الشوائب المنحلة Dissolved out impurities ، عن طريق الطرد المركزي Centrifuging . الشوائب مثل الفاناديوم ومركبات المعادن الثقيلة ليست قابلة للذوبان في الماء مقارنة بالزيت ولا يمكن القضاء عليها بهذه الطريقة . يمكن تصفية هواء الاحتراق Combustion air لإزالة الجسيمات الصلبة Solid particles .

والهواء أيضا يحتوي على بعض المواد الضارة ، حتى لو تم تمرير الهواء من خلال مرشحات سحب الهواء ، فلا يمكن إزالة الغازات الضارة عن طريق المرشحات (الفلاتر) Filters .

٢ - حماية الريش ذاتيا من هجوم التآكل من خلال تشكيل أو تركيب مادة الريش من خليط من سبائك قوية Strong alloys أو عن طريق الطلاء Coating .



ريشة توربين جديدة

New Turbine Blade

ريشة توربين متآكلة وتالفة

الشكل (١٢٧) حالات الريشة

ن

Corrosion Damaged Blade

٣ - بإستخدام مثبطات التآكل Corrosion Inhibitors في الوقود :

تتوفر مضافات الوقود Fuel additives التي تساعد في منع التآكل الحار عبر الكبريتات . واحد من هذه المضافات هو المغنيسيوم Magnesium . ففي وجود هذا المعدن ، يتم تشكيل كبريتات المغنيسيوم Magnesium sulphate بدلا من كبريتات الصوديوم . تظل كبريتات المغنيسيوم صلبة عند درجات الحرارة الموجودة في الأجزاء الأكثر حرارة من التوربين الغازي ، وبالتالي لا يحدث الترسبات السائلة والهجوم المسبب للتآكل .

٤ - بإستخدام ريش خزفية (سيراميكية) Ceramic (أو محور توربيني خزفي كامل) :

لا تزال هذه الطريقة تجريبية في كل من التوربين الغازي (لتقليل درجة حرارة الريشة) والمحركات الترددية Reciprocating engines (لتقليل فقدان الحرارة إلى البيئة المحيطة surrounding) .

أنواع الأحمال التي تتعرض لها ريش التوربين الدوارة

١- حمل التدفق Flow load الذي يحاول ثني أو لوي Bend الريشة .
٢- قوة الطرد المركزي Centrifugal force التي تحاول سحب الريشة إلى الخارج في التوتر أو الشد Tension .
٣- أحمال الاهتزاز Vibration loads لأن الريشة تخضع لضغط التدفق على نطاق (مسافة) الريشة (نظرا لوجود فرق بالضغط في الريشة ، يحدث أقصى ضغط عند الجذر والحد الأدنى عند الطرف الرأسي Tip وبالتالي ينتج عنه اهتزاز الريشة) .