

كتاب ديناميكا حرارية الجزء الثاني



تأليف:

د. أسامة محمد المرضي سليمان خيال

قسم الهندسة الميكانيكية

كلية الهندسة والتقنية

جامعة وادي النيل

عطبرة، السودان

الطبعة الأولى ديسمبر 1995م

الطبعة الثانية يناير 2019م

شكر وعرّفان

الشكر والعرّفان لله والتبريكات والصلوات على رسوله وخادمه محمد وعلى آله وصحابته وجميع من تبعه ونَقَّي أثره إلى يوم القيامة.

يود الكاتب ان يتقدم بالشكر أجذله لكل من ساهم بجهده وفكره ووقته في إخراج هذا الكتاب بالصورة المطلوبة ، ويخص بذلك الزملاء/ الأساتذة بقسم الهندسة الميكانيكية بجامعة وادي النيل . عطبرة ، وأيضاً الإخوة/ الأساتذة بقسم الهندسة الميكانيكية بجامعة البحر الأحمر . بورتسودان. الشكر والتقدير والعرّفان للبروفيسور/ محمود يس عثمان الذي ساهم بقدر كبير في مراجعة وإعادة مراجعة محتويات الكتاب.

اهدي هذا الكتاب بصفة أساسية لطلاب دبلوم وبكالوريوس الهندسة في جميع التخصصات خاصة طلاب قسم الهندسة الميكانيكية ، حيث يستعرض هذا الكتاب الكثير من التطبيقات في مجال الديناميكا الحرارية وتطبيقاتها.

وأعبر عن شكري وامتناني إلى المهندس/ أسامة محمود محمد علي بمركز دائية لخدمات الحاسوب والطباعة بمدينة عطبرة، الذي أنفق العديد من الساعات في طباعة ، مراجعة وتعديل وإعادة طباعة هذا الكتاب أكثر من مرة. والشكر موصول أيضاً للمهندس/ عوض علي بكري الذي شارك في تنسيق هذا العمل.

أخيراً ، أرجو من الله سبحانه وتعالى أن يتقبل هذا العمل المتواضع والذي أمل أن يكون ذا فائدة للقارئ.

مقدمة

إنَّ مؤلّف هذا الكتاب وإيماناً منه بالدور العظيم والمُقدَّر للأستاذ الجامعي في إثراء حركة التأليف والتعريف والترجمة للمراجع والكتب الهندسية يأمل أن يفي هذا الكتاب بمتطلبات برامج البكالوريوس والدبلوم لطلاب الهندسة الميكانيكية ، هندسة الإنتاج او التصنيع ، الهندسة الكهربائية والهندسة المدنية حيث يُعطى مناهج نظرية ومختبرية في الديناميكا الحرارية وتطبيقاتها. يتفق هذا الكتاب لغوياً مع القاموس الهندسي الموحد السوداني ، ويُعد الكتاب مرجعاً في مجاله حيث يمكن أن يستفيد منه الطالب والمهندس والباحث. هذا الكتاب مقتبس من مُذكرات مؤلفه في تدريسه لهذا المقرر لفترة لا تقل عن خمس وعشرون عاماً.

يهدف هذا الكتاب لتأكيد أهمية دراسة الديناميكا الحرارية في حياتنا المعاصرة في تطبيقات هندسية عديدة من بينها الاحتراق في محركات الاحتراق الداخلي، ضواغط الهواء الترددية، ومحطات القدرة البخارية والغازية.

يشتمل هذا الكتاب على أربعة فصول. يستعرض الفصل الأول الاحتراض ومعادلاته في محركات الاحتراق الداخلي حيث يتم تحويل المواد المتفاعلة ونواتج الاحتراق للكتلة وبالجم حسب نوع الوقود المستخدم.

يشتمل الفصل الثاني على دراسة متكاملة لماكينات الإزاحة الموجبة حيث يتضمن هذا الفصل شروط الحصول على أدنى شغل، تحديد كفاءة ثابت درجة الحرارة، الكفاءة الحجمية، والانضغاط متعدد المرحلة.

أما الفصل الثالث فيشتمل على دراسة محطات القدرة البخارية من وجهات نظر دورة كارنو، دورة رانكن وتعديلاتها ومن خلال الدراسة يتم تحديد الكفاءة الحرارية، نسبة الضغط، كفاءات ثابت القصور الحراري للتوربين والضاطع، والاستهلاك النوعي للبخر.

يتناول الفصل الرابع والأخير الدورة الأساسية للتوربينة الغازية من حيث مكوناتها والمخطط البياني لدرجة الحرارة ضد القصور الحراري؛ تعديلات الدورة الأساسية للتوربين الغازي التي تشمل على إضافة مبرد بيني لتبريد الهواء بين مرحلتي الضاغط، سخان أو غرفة احتراق ثانية لزيادة الحرارة المكتسبة في الدورة، ومبادل حراري للاستفادة من طاقة المحتوى الحراري العالية المغادرة للتوربين. إنَّ الكاتب يأمل أن يساهم هذا الكتاب في إثراء المكتبة الجامعية داخل السودان وخارجه في هذا المجال من المعرفة ويأمل من القارئ ضرورة إرسال تغذية راجعة إن كانت هناك ثَمَّة أخطاء حتى يستطيع الكاتب تصويبها في الطبعة التالية للكتاب.

والله الموفق

المؤلف

يناير 2019م

المحتويات

الصفحة	الموضوع
i	شكر وعرفان
ii	مقدمة
iv	المحتويات
	الفصل الأول : الإحتراق
1	1.1 الكيمياء الأساسية
1	1.2 الجزيئات
2	1.3 الكتلة الذرية النسبية للمادة
3	1.4 الوقودات
6	1.5 معادلات الاحتراق
10	1.6 نسبة هواء إلى وقود متكافئة أو صحيحة كيميائياً
11	1.7 تحليل غاز العادم
11	1.8 أمثلة محلولة في الإحتراق
24	1.9 التحليل العملي لنواتج الإحتراق
25	1.10 أمثلة محلولة في تحليل نواتج الإحتراق
	الفصل الثاني : ماكينات الإزاحة الموجبة
28	2.1 مدخل
30	2.2 الماكينات الترددية
36	2.3 شروط الحصول على أدنى شغل
37	2.4 كفاءة ثابت درجة الحرارة
39	2.5 الضواغط الترددية بتضمين الخلووص
44	2.6 الكفاءة الحجمية
49	2.7 الإنضغاط متعدّد المرحلة
	الفصل الثالث : محطات القدرة البخارية
56	3.1 دورة كارنو

57	3.2 دورة رانكن
68	3.3 تعديلات دورة رانكن
76	3.4 مسائل
	الفصل الرابع : التوربينات الغازية
79	4.1 مدخل
80	4.2 الدورة العملية للتوربينة الغازية
84	4.3 أمثلة محلولة في الدورة الأساسية للتوربينة الغازية
93	4.4 تعديلات الدورة الأساسية للتوربينة الغازية
105	4.5 أمثلة محلولة في التوربينات الغازية
113	4.6 مسائل إضافية في التوربينات الغازية
	الكتب والمراجع
121	الكتب والمراجع العربية
121	الكتب والمراجع الإنجليزية
125	نبذة عن المؤلف

الفصل الأول

الإحتراق (Combustion)

1.1 الكيمياء الأساسية: (Basic Chemistry)

من المهم فهم تركيب وإستخدام الصيغ الكيميائية قبل الدخول إلي الإحتراق ويشمل هذا المبادئ الأولية التي قابلناها في الأعوام الماضية للدراسة. لكننا يمكن أن نعطي توضيحاً مختصراً.

الذرات (Atoms): هي الجزء الأصغر في تركيب العناصر الكيميائية التي تلعب دوراً رئيسياً في التغير الكيميائي. إذا إنشطرت الذرة كما في التفاعل النووي (nuclear reaction) فإنها لا تحافظ على خواصها الكيميائية الأصلية.

1.2 الجزيئات (Molecules):

نادراً ما توجد العناصر في الطبيعة كذرات مفردة. بعض العناصر توجد ذراتها كأزواج وكل زوج يشكل جزيء (e.g. الأكسجين)، وتكون ذرات كل جزيء متماسكة مع بعضها البعض بواسطة رابطة بينية قوية. فعزل جزيء الأكسجين يصبح مرهقاً ولكنه ممكناً. تتكون جزيئات بعض المواد بتزاوج ذرات لعناصر متباينة. وكمثال لذلك، الماء (الذي يكون كيميائياً مشابهاً للثلج أو البخار) له جزيء يتكون من ذرتين من الهيدروجين وذرة واحدة من الأكسجين.

لذرات العناصر المختلفة كتل مختلفة وهذه تكون هامة في حالة التحليل الكمي (quantitative analysis). بما أن الكتل الحقيقية للذرات أو الجزيئات تكون متناهية في الدقة (Infinitesimally small) فيتم إستخدام نسب الكتل.

تُعطي هذه النسب بالكتل الذرية النسبية مأخوذة على المقياس الذي يعرّف الكتلة الذرية لنظائر الكربون (12) على أنها 12.

1.3 الكتلة الذرية النسبية للمادة (Relative Atomic Mass):

هي كتلة كيان مفرد من المادة منسوباً إلى كيان مفرد من الكربون -12. يُعطي الجدول (1.1) أدناه الكتل الذرية النسبية لبعض العناصر.

جدول (1.1) الكتل الذرية النسبية لبعض العناصر

العنصر Element	Oxygen	Hydrogen	Carbon	Sulphur	Nitrogen
الرمز الذري	O	H	C	S	N
الكتلة الذرية النسبية	16	1	12	32	14
المجموعة الجزيئية	O ₂	H ₂	C	S	N ₂
الكتلة الجزيئية النسبية (مقرّبة)	32	2	12	32	28
القيم المضبوطة	31.999	2.016	12	32.030	28.013

تعتمد الكتل الجزيئية النسبية على الكتل النسبية للذرات التي تُشكّل الجزيء. في الصيغة الكيميائية فإن ذرة واحدة لعنصر يتم تمثيلها برمز العنصر. i.e. ذرة الهيدروجين تكتب H. أما إذا وُجدت المادة كجزيء يحتوي على ذرتين تكتب H₂. وجزيئين للهيدروجين يتم تمثيلها كالاتي 2H₂, etc. يبين الجدول (1.2) حساب الكتلة الجزيئية النسبية من الكتل الذرية النسبية للعناصر.

جدول (1.2) المركبات وكتلتها الجزيئية النسبية

المركب	الصيغة	الكتلة الجزيئية النسبية
ماء، بخار	H ₂ O	2×1+1×16=18
أول أكسيد الكربون	CO	1 × 12 + 1 × 16 = 28
ثاني أكسيد الكربون	CO ₂	1 × 12 + 2 × 16=44
ثاني أكسيد الكبريت	SO ₂	1 × 32 + 2 × 16 = 64
الميثان	CH ₄	1 × 12 + 4 × 1=16
الإيثان	C ₂ H ₆	2 × 12 + 6 × 1= 30
البروبان	C ₃ H ₈	3 × 12 + 8 × 1 = 44
البيوتان	C ₄ H ₁₀	4 × 12 + 10 × 1 = 58
الإيثلين	C ₂ H ₄	2 × 12+4 × 1 = 28
البروبلين	C ₃ H ₆	3×12+6 × 1 =42
البنتين	C ₅ H ₁₂	5 × 12 + 12 × 1 = 72
البنزين	C ₆ H ₆	6×12 + 6×1=78
التولين (toluene)	C ₇ H ₈	7 × 12 + 8×1=92
الاوكتان	C ₈ H ₁₈	8 × 12 + 18×1 =114

1.4 الوقودات: (Fuels)

عناصر الوقود الهامة هي الكربون والهيدروجين، حيث يتكون معظم الوقود من هذه

العناصر إضافة إلى كميات صغيرة من الكبريت (sulphur). يمكن أن يحتوي الوقود على

بعض الأكسجين وكمية صغيرة من المواد الغير قابلة للاحتراق (Incombustibles) e.g)

بخار الماء، النيتروجين أو الرماد).

الفحم هو الوقود الصلب الهام ويتم تقسيم الأنواع المختلفة إلى مجموعات طبقاً

لخواصها الكيميائية والفيزيائية.

التحليل الكيميائي الدقيق للكتلة للعناصر الهامة في الوقود يسمى بالتحليل النهائي أو الأقصى (المطلق) (ultimate analysis). والعناصر التي غالباً ما تدخل في تركيب الوقود هي الكربون، الهيدروجين، النيتروجين والكبريت. يتم توضيح المجموعات الأساسية في الجدول (1.3) أدناه.

جدول (1.3) تحليل الوقود الأساسية

المادة الطيارة المئوية في وقود جاف %	التحليل الأقصى المئوي بالكتلة في وقود جاف %					محتوي الرطوبة المئوي بالكتلة %	الوقود
	Carbon	Hydrogen	Oxygen	Nitrogen	Ash		
4	90.27	3	2.32	1.44	2.97	1	Anthracite Bituminous
25	81.93	4.87	5.98	2.32	4.90	2	Coal
50	56.52	5.72	31.89	1.62	4.25	15	Lignite
65	43.70	6.42	44.36	1.52	4.00	20	Peat

تكون التحاليل متشابهة ولكنها يمكن أن تختلف من عينة لأخرى خلال المجموعة. هنالك تحليل آخر للفحم يسمى بالتحليل الملازم (Proximate analysis) حيث يعطي النسب المئوية للرطوبة، المادة الطيارة، المادة الصلبة القابلة للإحتراق (تسمى بالكربون المثبت) والرماد.

يوجد الكربون المثبت كبقايا لخصم النسب المئوية للكميات الأخرى. تشمل المادة الطيارة الماء المشتق من التفكيك الكيميائي للفحم (chemical decomposition) والغازات القابلة للاحتراق (e.g. هيدروجين، ميثان، إيثان etc) والقطران Tar (i.e. خليط مركب من

الهيدروكربونات وبعض المركبات العضوية). معظم الوقودات السائلة هي الهيدروكربونات التي توجد في طور السائل عند الأحوال الجوية العادية. زيوت البترول (petrol oils) هي خلائط مركبة لمئات من أنواع مختلفة من الوقود ولكن المعلومة الضرورية للمهندس هي التناسب النسبي للكربون والهيدروجين وغيره كما معطي بالتحليل الأقصى (المطلق). يُعطي الجدول (1.4) أدناه التحاليل المطلقة لبعض الوقودات السائلة.

الوقود الغازي هو الأبسط كيميائياً في المجموعات الثلاث. بعض الوقودات الغازية توجد في الطبيعة عند الأحوال الجوية (e.g. الميثان CH_4 هو البرافين (Paraffin)). يتم تصنيع الوقودات الغازية الأخرى بالمعالجات المختلفة للفحم. أول أكسيد الكربون هو وقود غازي هام يتكون من خلائط غازية أخرى وهو أيضاً نتاج للاحتراق غير الكامل للكربون.

جدول (1.4) تحليلات الوقودات السائلة

الوقود	الكربون	الهيدروجين	الكبريت	الرماد
100 octane petrol	85.1	14.9	0.01	–
Motor petrol	85.5	14.4	0.1	–
Benzene	91.7	8.0	0.3	–
Kerosene (paraffin)	86.3	13.6	0.1	–
Diesel Oil	86.3	12.8	0.9	–
Light fuel oil	86.2	12.4	1.4	–
Heavy fuel oil	86.1	11.8	2.1	–
Residual fuel oil	88.3	9.5	1.2	1.0

1.5 معادلات الاحتراق: (Combustion Equations)

تدخل الكتل المتناسبة من الهواء والوقود إلى غرفة الاحتراق حيث يتم التفاعل الكيميائي وتخرج نواتج الاحتراق خلال ماسورة العادم إلى الخارج. حسب قانون بقاء الكتلة فإن الكتلة تظل ثابتة (i.e. الكتلة الكلية للنواتج تساوي الكتلة الكلية للمواد المتفاعلة)، وتختلف المواد المتفاعلة كيميائياً عن النواتج حيث تغادر النواتج عند درجة حرارة عالية. يظل العدد الكلي للذرات لكل عنصر في الاحتراق ثابتاً ولكن يُعاد ترتيب الذرات في مجموعات تمتلك خواص كيميائية مختلفة. يتم التعبير عن هذه المعلومة بالمعادلة الكيميائية التي توضّح:

a/ المواد المتفاعلة والمواد الناتجة من التفاعل.

b/ الكميات النسبية للمواد المتفاعلة والمواد الناتجة.

يجب أن يكون جانبي المعادلة متناسقاً، بحيث أنّ كل جانب يمتلك نفس الرقم من الذرات لكل عنصر مشترك.

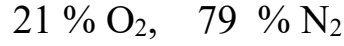
توضّح المعادلة عدد الجزيئات لكل مادة متفاعلة وناتجة. يتناسب المول مع عدد الجزيئات وعليه فإنّ الأرقام الجزيئية النسبية للمادة المتفاعلة تُعطي التحليل المولي أو الحجمي للمكونات الغازية.

كما ذكر آنفاً فإنّ الأكسجين الذي يتم إمداده للاحتراق يأتي من الهواء الجوي ومن الضروري أن تُستخدم تحاليل دقيقة ومتناسقة للهواء بالكتلة وبالحجم.

غالباً ما نأخذ مكونات الهواء في حسابات الاحتراق بالكتلة كالآتي:

$$23.3\% \text{ O}_2, \quad 76.7\% \text{ N}_2$$

وبالحجم كالاتي:



يتم تضمين الآثار الصغيرة للغازات الأخرى في الهواء الجاف في النيتروجين الذي يُسمى أحياناً بالنيتروجين الجوي.

إعتبر المعادلة التالية للهيدروجين



وهذا يعني أن:

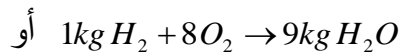
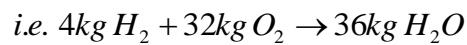
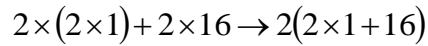
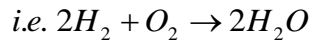
a/ يتفاعل الهيدروجين مع الأكسجين ليعطي البخار أو الماء.

b/ يتفاعل جزيئين من الهيدروجين مع جزيء من الأكسجين ليعطي جزيئين من البخار أو الماء.

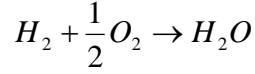
i.e. 2 حجم من H_2 + 1 حجم من O_2 ← 2 حجم من H_2O .

H_2O يمكن أن يكون سائلاً أو بخاراً اعتماداً على ما إذا تم تبريد الناتج بصورة كافية حتى يتكثف.

ويمكن الحصول على التناسب بالكتلة باستخدام الكتل الذرية النسبية.



نفس التناسب يمكن الحصول عليه بكتابة المعادلة (1) بالصورة التالية:



يمكن ملاحظة التالي من المعادلة (1)،

الحجم الكلي للمواد المتفاعلة = 2 حجم من H_2 + 1 حجم من O_2 = 3 حجوم

الحجم الكلي للمادة الناتجة = 2 حجم.

عليه يكون هنالك إنكماش حجمي عند الإحتراق.

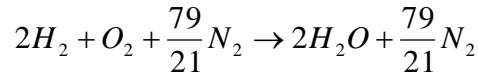
بما أنّ الأكسجين يكون مصاحباً بالنتروجين عند إمداد الهواء للاحتراق، فيجب تضمين

النتروجين في المعادلة.

وبما أنّ النتروجين يكون خاملاً خلال التفاعل الكيميائي فسيظهر على جانبي المعادلة. لكل

مول من الأكسجين هنالك 79/21 مول من النتروجين.

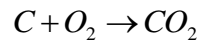
عليه تصبح المعادلة (1) كالتالي:



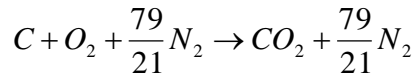
يمكن إيجاد معادلات مشابهة لاحتراق الكربون.

a/ الاحتراق الكامل للكربون ليتحول إلي ثاني أكسيد الكربون:

(Complete Combustion of Carbon)



وبتضمين النتروجين ،



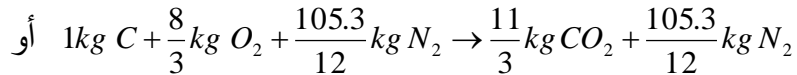
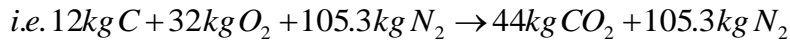
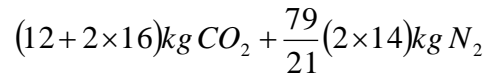
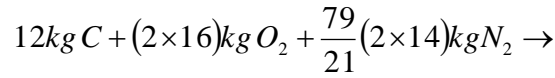
باعتبار حجوم المواد المتفاعلة والمواد الناتجة ،

صفر حجم من C + 1 حجم من O₂ + $\frac{79}{21}$ حجم من N₂ ← 1 حجم من CO₂ + $\frac{79}{21}$

حجم من N₂.

لقد تمَّ اعتبار حجم الكربون يساوي صفرًا لأنَّ الحجم الصلب يمكن تجاهله مقارنةً بحجم الغاز.

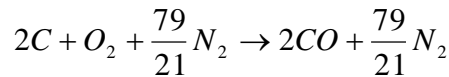
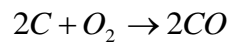
التحليل بالكتلة ،



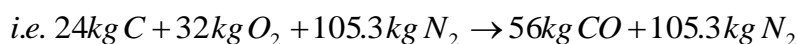
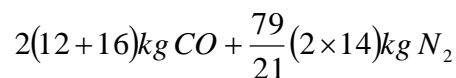
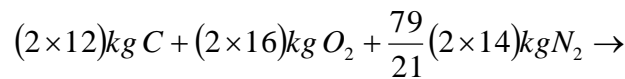
b/ الاحتراق غير الكامل للكربون: (Incomplete Combustion of Carbon)

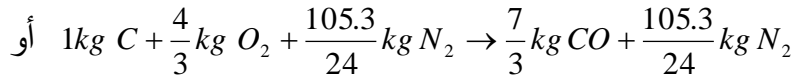
هذا يحدث عندما لا يكون هنالك إمداد كافٍ من الأوكسجين لإحراق الكربون تماماً.

ويتضمن النيتروجين،

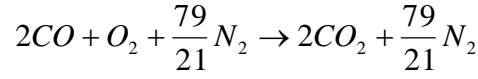


التحليل بالكتلة،

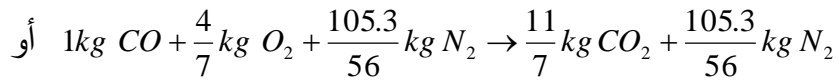
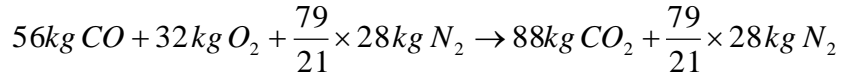




وإذا تمَّ إمداد كميات إضافية من الأكسجين فإن الاحتراق سيستمر حتى يكتمل تماماً.



وبالكتلة،



1.6 نسبة هواء إلي وقود متكافئة أو صحيحة كيميائياً:

(Stoichiometric, or Chemically Correct, Air Fuel Ratio)

الخليط المتكافئ (Stoichiometric Mixture) للهواء والوقود هو الخليط الذي يحتوي

على أكسجين كاف فقط للاحتراق الكامل للوقود.

الخليط الذي يحتوي على كميات زائدة من الهواء يُسمى بالخليط الضعيف (weak mixture)،

والخليط الذي يحتوي على كميات ناقصة من الهواء يُسمى بالخليط الغني (rich mixture)

النسبة المئوية للهواء الزائد يمكن إعطاؤها بالمعادلة التالية:

$$\text{النسبة المئوية للهواء الزائد} =$$

(نسبة الـ A/F الفعلية - نسبة الـ A/F المتكافئة) / (نسبة الـ A/F المتكافئة) (2)

للوقود الغازي فإنَّ النسب يتم التعبير عنها بالحجم وللوقود الصلب والسائل فإنَّ النسب يتم

التعبير عنها بالكتلة.

تُعطي المعادلة (2) نتيجة موجبة عندما يكون الخليط ضعيفاً ونتيجة سالبة إذا كان الخليط غنياً. للغلاية (boiler plant) فإنّ الخليط غالباً ما يكون أكبر من 20% ضعيف وللتوربينات الغازات (Gas turbines) فإنّ النسبة تكون أكبر من 300% ضعيف. تقابل المحركات البترولية أحوالاً مختلفة من الحمولة والسرعة وتشتغل في مدى واسع من متانة الخلائط.

$$(3) \quad \text{متانة} \text{ قوة الخليط} = \text{نسبة الـ A/F المتكافئة} / \text{نسبة الـ A/F الفعلية}$$

تتراوح القيم التشغيلية في المدى بين 80% (ضعيف) إلى 120% (غني) عندما يحتوي الوقود على بعض الأكسجين (e.g. الكحول الإيثيلي) C_2H_6O فإنّ الوقود في هذه الحالة يتطلب إمداد قليل من الهواء.

1.7 تحليل غاز العادم: (Exhaust and Flue Gas Analysis)

الغازات هي نواتج الاحتراق الرئيسية. عندما يتم أخذ عينة من الغاز للتحليل غالباً ما يتم تبريدها إلى درجة حرارة ما دون درجة حرارة التشبع للبخار. لا يُضمّن المحتوى البخاري في هذه الحالة أي في التحليل الذي يتم تصنيفه على أنه تحليل للنواتج الجافة. بما أنّ النواتج هي غازات فإنّه غالباً ما يتم التحليل بالحجم. أما التحليل الذي يشمل البخار في العادم يُسمى بالتحليل الرطب.

1.8 أمثلة محلولة في الإحتراق: (Solved Examples in Combustion)

1/ أحسب نسبة الـ A/F المتكافئة لاحتراق عينة من الـ Anthracite الجاف الذي يتكون من الآتي بالكتلة:

ash 3%, S 0.5%, N 1%, O 2.5%, H 3%, C 90%

حدد نسبة الـ A/F والتحليل الجاف والرطب لنواتج الاحتراق بالحجم عندما يتم إمداد 20% هواء زائد.

الحل:

الجدول أدناه يوضِّح التحاليل المطلوبة بالكتلة.

التحليل بالكتلة

الكتلة لكل فحم kg	معادلة الاحتراق	الأكسجين المطلوب لكل kg من الفحم	النواتج لكل kg من الفحم
0.9	$C + O_2 \rightarrow CO_2$ $12kg + 32kg \rightarrow 44kg$	$0.9 \times \frac{32}{12} = 2.4kg$	$0.9 \times \frac{44}{12} = 3.3kg CO_2$
0.03	$2H + O_2 \rightarrow 2H_2O$ $1kg + 8kg \rightarrow 9kg$	$0.03 \times 8 = 2.24kg$	$0.03 \times 9 = 27kg H_2O$
0.025	-	-0.025kg	-
0.01	-	-	0.01kg N ₂
0.005	$S + O_2 \rightarrow SO_2$ $32kg + 32kg \rightarrow 64kg$	$0.005 \times \frac{32}{32} = 0.005kg$	$0.005 \times \frac{64}{32} = 0.01kg SO_2$
0.03	-	-	-
	-	الجملة 2.62kg	

من الجدول أعلاه،

الأكسجين O₂ المطلوب لكل kg من الفحم = 2.62kg

$$11.25 \text{ kg} = \frac{2.62}{0.233} = \text{kg من الفحم}$$

(بما أن الهواء يحتوي على 23.3% أكسجين (O₂) بالكتلة).

$$0.767 \times 11.25 = 8.63 \text{ kg} \text{ ، النيتروجين } N_2 \text{ المتحد مع الهواء ،}$$

$$8.63 + 0.01 = 8.64 \text{ kg} \text{ ، جملة النيتروجين } N_2 \text{ في النواتج ،}$$

$$\frac{11.25}{1} = \text{نسبة الـ A/F المتكافئة}$$

باستخدام المعادلة (2)،

$$= \text{النسبة المئوية للهواء الزائد}$$

$$\text{(نسبة الـ A/F المتكافئة)} / \text{(نسبة الـ A/F المتكافئة)}$$

من المعادلة (2)،

$$= \text{نسبة الـ A/F الفعلية}$$

$$\text{نسبة الـ A/F المتكافئة} + \text{النسبة المئوية للهواء الزائد} \times \text{نسبة الـ A/F المتكافئة}$$

$$= 11.25 + \frac{20}{100} \times 11.25 = 13.5/1$$

عليه فإن إمداد النيتروجين N₂،

$$0.767 \times 13.5 = 10.36 \text{ kg}$$

أيضاً إمداد الأكسجين O₂،

$$0.233 \times 13.5 = 3.144 \text{ kg}$$

في النواتج،

$$N_2 = 10.36 + 0.01 = 10.374 \text{ kg}$$

والأكسجين الزائد O₂،

$$O_2 = 3.144 + 2.62 = 0.524 \text{ kg}$$

الجدول أدناه يوضح التحليل المطلوبة بالحجم.

التحليل بالحجم

المنتج Product	Mass/kg Coal	% by Mass	M Kg/kmol	Kmol/kg Coal	% by volume wet	% by volume dry
1	2	3	4	5	6	7
CO ₂	3.3	22.8	44	0.075	15.77	16.3
H ₂ O	0.27	1.87	18	1.015	3.16	-
SO ₂	0.01	0.07	64	0.0002	0.03	0.03
O ₂	0.52	3.6	32	0.0162	3.4	3.51
N ₂	10.37	71.65	28	0.37	77.8	80.3
	14.47		Total wet	0.4764	100.16	100.14
			-H ₂ O	0.015		
			Total dry	0.4614		

2/ تحليل إمداد من غاز الفحم كالاتي:

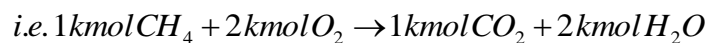
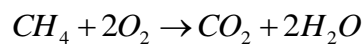
أحسب نسبة الـ H_2 49.4%, CO 18%, CH_4 20%, C_4H_8 2%, O_2 0.4%, N_2 6.2%, CO_2 4%

A/F المتكافئة. أوجد أيضاً التحليل الرطب والجاف لنواتج الاحتراق إذا كان الخليط الفعلي

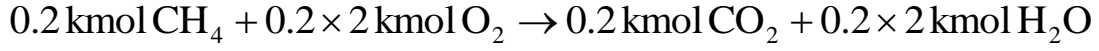
20% ضعيف.

الحل:

هذا المثال يتم حله بطريقة الجدولة، يتم توضيح عينة من الحسابات فيما يلي لـ CH_4



هنالك 0.2 kmol من الميثان CH₄ لكل kmol من غاز الفحم، عليه،



عليه فإنَّ الأوكسجين المطلوب للميثان CH₄ في غاز الفحم هو 0.4 kmol لكل kmol من غاز الفحم.

يتم تضمين الأوكسجين في الوقود (0.004 kmol) في العمود 4 ككمية سالبة

1	kmol/kmol	Combustion Equ.	O ₂ kmol/kmol	Products	
	Fuel		Fuel	CO ₂	H ₂ O
2	3	4	5	6	
H ₂	0.494	$2H_2 + O_2 \rightarrow 2H_2O$	0.247	–	0.494
CO	0.18	$2CO + O_2 \rightarrow 2CO_2$	0.09	0.18	–
CH ₄	0.20	$CH_4 + 2O_2 \rightarrow CO_2 + 2H_2O$	0.4	0.20	0.40
C ₄ H ₈	0.02	$C_4H_8 + 6O_2 \rightarrow 4CO_2 + 4H_2O$	0.12	0.08	0.08
O ₂	0.004	–	–0.004	–	–
N ₂	0.062	–	–	–	–
CO ₂	0.04		–	0.04	–
		Total	0.853	0.5	0.974

$$\text{الهواء المطلوب} = \frac{0.853}{0.21} = 4.06 \text{ (kmol لكل kmol من الوقود)}$$

(حيث أنَّ الهواء يحتوي على 21% من O₂ بالحجم).

i.e. نسبة الـ A/F المتكافئة = 4.06/1 بالحجم

خليط 20% ضعيف، وباستخدام المعادلة (2)،

$$4.872/1 = 4.06 \times \frac{20}{100} + 4.06 = \text{نسبة الـ A/F الفعلية}$$

$$\text{النيتروجين المتحد} = 4.872 \times 0.79 = 3.85 \text{ (kmol لكل kmol من الوقود)}$$

الأكسجين الزائد،

$$= 0.21 \times 4.872 - 0.853 = 0.1706 \text{ kmol/kmol fuel}$$

الـ kmol الكلي للنيتروجين في النواتج،

$$3.85 + 0.062 = 3.912 \text{ kmol/kmol fuel}$$

يتم توضيح التحليل بالحجم للنواتج الرطبة والجافة من الجدول التالي:

Product الناتج	kmol/kmol fuel	% by Vol. (dry)	% by Vol. (wet)
CO ₂	0.5	10.90	9
H ₂ O	0.974	–	17.5
O ₂	0.171	3.72	3.08
N ₂	3.912	<u>85.4</u>	<u>70.4</u>
	Total wet = 5.557	<u>100.02</u>	<u>99.98</u>
	-H ₂ O = 0.974		
	Total dry = 4.583		

في المثالين (1) و(2) يمكن ملاحظة أنَّ حاصل جمع التحاليل لا يكون بالضبط 100%.

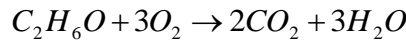
وعليه فإنَّ الدقة الموضحة كافية ولا يوجد زمن لتضييعه في سبيل الوصول إلي تحاليل

مضبوطة.

3/ أوجد نسبة A/F المتكافئة لاحتراق الكحول الايثيلي (C₂H₆O) في محرك بترولي.
 أحسب نسبة A/F لمتانات الخليط 90% و 120% حسب تعريف المعادلة (3). حدّد
 التحاليل الرطبة والجافة بالحجم لغاز العادم لكل متانة مزيج.

الحل:

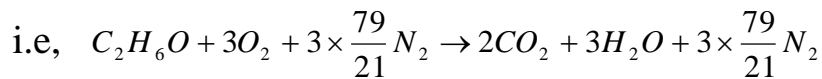
تكون معادلة الاحتراق للكحول الايثيلي كالآتي:



بما أنّ هنالك ذرتين من الكربون في كل مول من C₂H₆O فسيكون هنالك مولان من CO₂
 في النواتج، لتعطي ذرتين من الكربون في كل جانب من المعادلة. بالمثل وبما أنّ هنالك
 ستة ذرات من الهيدروجين في كل مول من الكحول الايثيلي فسيكون هنالك ثلاثة مولات من
 H₂O في النواتج لإعطاء ستة ذرات من الهيدروجين على جانبي المعادلة. وبموازنة ذرات
 الأكسجين، نجد أنّ هنالك (2×3+2=7) ذرات من الأكسجين على الجانب الأيمن للمعادلة،
 عليه يجب أن تظهر 7 ذرات على الجانب الأيسر للمعادلة.

بما أنّ هنالك ذرة واحدة من الأكسجين في الكحول الايثيلي، يجب إضافة ستة ذرات من
 الأكسجين (أي ثلاثة مولات).

وبما أنّ الأكسجين يتم سحبه من الهواء الجوي فسيكون مصاحباً بالنيتروجين كما في
 المعادلة أدناه:



1 kmol من الوقود يمتلك كتلة مقدارها (2×6+12×1+1×16) = 46 kg

3 kmol من الأكسجين يمتلك كتلة مقدارها (3×2×16) = 96 kg

عليه،

$$2.09 \text{ kg} = \frac{96}{46} = \text{الأكسجين المطلوب لكل kg من الوقود}$$

$$8.96/1 = \frac{2.09}{0.233} = \text{إذن نسبة A/F المتكافئة}$$

إعتبر متانة المزيج 90%، من المعادلة (3)،

متانة الخليط = (نسبة الـ A/F المتكافئة) / (نسبة الـ A/F الفعلية)

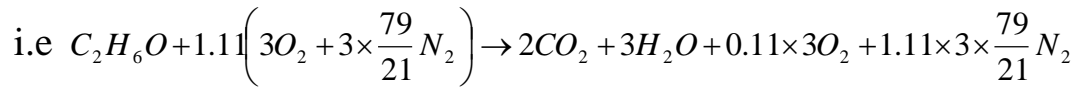
$$0.9 = (نسبة الـ A/F الفعلية) / (8.96) =$$

$$نسبة الـ A/F الفعلية = \frac{8.96}{0.9} = 9.95/1$$

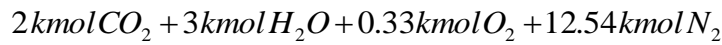
هذا يعني أنّ الهواء المسحوب حقيقة يكون $1/0.9$ أو $\frac{9.95}{8.96} = 1.11$ مرة

الهواء الضروري للاحتراق الكامل.

سيحتوي العادم على 0.11 من الأكسجين المتكافئ،



والنواتج هي:



الكيلومولات الكلية،

$$2 + 3 + 0.33 + 12.54 = 17.87 \text{ kmol}$$

التحليل الرطب،

$$\frac{2}{17.87} \times 100 = 11.20\% \text{ } CO_2; \quad \frac{3}{17.87} \times 100 = 16.8\% \text{ } H_2O$$

$$\frac{0.33}{17.87} \times 100 = 1.85\% \text{ } O_2; \quad \frac{12.54}{17.87} \times 100 = 70.2\% \text{ } N_2$$

الكيلومولات الجافة الكلية،

$$2 + 0.33 + 12.54 = 14.87 \text{ kmol}$$

عليه، التحليل الجاف،

$$\frac{2}{14.87} \times 100 = 13.45\% \text{ CO}_2; \quad \frac{0.33}{14.87} \times 100 = 2.22\% \text{ O}_2$$

$$\frac{12.54}{14.87} \times 100 = 84.4\% \text{ N}_2$$

إعتبر متانة المزيج 120%، من المعادلة (3)،

$$1.2 = (\text{نسبة الـ A/F الفعلية}) / (\text{نسبة الـ A/F المتكافئة})$$

$$\therefore \text{نسبة الـ A/F الفعلية} = \frac{8.96}{1.2} = 7.47/1$$

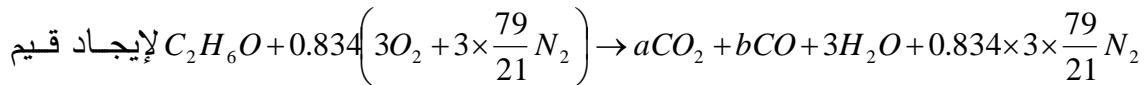
هذا يعني أنّ الهواء المسحوب حقيقة $\frac{7.47}{8.96} = 0.834$ أو $1/1.2$ مرة من الهواء اللازم

للاحتراق الكامل.

إجعل عدد الكيلومولات لـ CO_2 في النواتج يساوي a،

إجعل عدد الكيلومولات لـ CO في النواتج يساوي b،

عليه فإنّ معادلة الاحتراق ستكون كالآتي:



a، b يجب عمل موازنة لذرات الكربون والأكسجين.

$$2 = a + b \quad \text{i.e. موازنة الكربون:}$$

$$1 + 0.834 \times 3 = 2a + b + 3 \quad \text{موازنة الأكسجين:}$$

ب طرح المعادلتين نتحصّل على،

$$a = 1.0$$

$$b = 2 - 1.004 = 0.996 \quad \text{و}$$

i.e. النواتج هي:



عدد الكيلومولات الكلية الجافة،

$$1.004 + 0.996 + 9.41 = 11.41 \text{ kmol}$$

عليه، التحليل الجاف،

$$\frac{1.004}{11.41} \times 100 = 8.8\% \text{ } CO_2; \quad \frac{0.996}{11.41} \times 100 = 8.73\% \text{ } CO$$

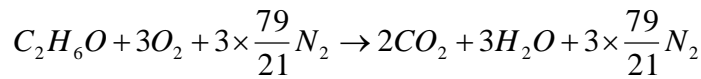
$$\frac{9.41}{11.41} \times 100 = 82.5\%$$

4/ أحسب للمزيج المتكافئ في المثال (3)، حجم الخليط لكل kg من الوقود عند درجة

حرارة 65°C وضغط 1.013 bar. أحسب أيضاً نواتج الاحتراق لكل kg من الوقود بعد

التبريد إلى درجة حرارة 120°C عند ضغط 1 bar.

الحل:



عليه، عدد الكيلومولات الكلية للمواد المتفاعلة،

$$1 + 3 + 3 \times \frac{79}{21} = 15.3 \text{ kmol}$$

ومن العادلة المميزة للغازات،

$$PV = nR_oT$$

$$V = \frac{nR_oT}{P} = \frac{15.3 \times 10^3 \times 8.314 \times 338}{10^5 \times 1.013} = 424.4 \text{ m}^3 / \text{kmol}$$

(ثابت الغاز المولاري) $R_o = 8.314 \text{ kJ} / \text{kmol K}$ (molar gas constant)

$$(T = 65 + 273 = 338 \text{ K حيث})$$

في كل 1 كيلو مول من الوقود يوجد (2 × 12 + 6 + 16 = 46kg)

$$9.226\text{m}^3 = \frac{424.4}{46} = \text{حجم المواد المتفاعلة لكل kg من الوقود}$$

عندما يتم تبريد النواتج إلي 120°C فإن الماء H₂O يوجد كبخار، لأن درجة الحرارة تكون

أعلى من درجة حرارة التشبع نتيجة للضغط النسبي للماء H₂O

$$\left(2+3+3 \times \frac{79}{21}\right) = 16.3 \text{ kmol ل مساوياً ل}$$

من المعادلة، $PV = nR_0T$

$$\therefore V = \frac{16.3 \times 10^3 \times 8.314 \times 393}{10^5 \times 1} = 533.8 \text{ m}^3 / \text{kmol of fuel}$$

(حيث $T = 120 + 273 = 393 \text{ K}$)

$$.11.58\text{m}^3 = \frac{533.8}{46} = \text{حجم النواتج لكل kg من الوقود}$$

5/ إذا تمَّ تبريد النواتج في المثال (4) إلي 15°C عند ضغط ثابت، أحسب كمية الماء الذي

سيتكثف لكل 1 kg من الوقود.

الحل:

عند 15°C، ولأن هنالك بعض التكثيف فإن البخار المتبقي (جاف مشبع) يظل على

التصاق مع السائل. ضغط التشبع عند 15°C هو 0.01704 bar، وهذا هو الضغط

الجزئي لبخار الجاف المشبع.

من المعادلة،

$$\frac{V_i}{V} = \frac{n_i}{n} = \frac{P_i}{P}$$

وللبخار،

$$\frac{n_s}{n} = \frac{0.01704}{1} = 0.01704$$

من المثال (4) عدد الكيلومولات الكلي للنواتج الجافة هو 13.3 kmol، عليه،

$$\frac{n_s}{n_s + 13.3} = 0.01704$$

$$\therefore n_s = \left(\frac{0.01704 \times 13.3}{1 - 0.01704} \right) = 0.2305$$

i.e. عدد الكيلومولات للبخار الجاف المشبع المتبقي عند 15°C = 0.2305

∴ عدد كيلومولات الماء المتكثف، $3 - 0.2305 = 2.77$

1 kmol من H_2O يحتوي على (16 + 2 = 18kg). عليه فإن كتلة الماء المتكثف هي

$2.77 \times 18\text{kg}$ لكل kmol من الوقود.

∴ كتلة الماء المتكثف لكل kg من الوقود = $\frac{2.77 \times 18}{46} = 1.084\text{kg}$

6/ يكون التحليل بالقياس الوزني (Gravimetric Analysis) لعينة من الفحم هو كالاتي:

C 80%، H 12%، 8% رماد. أحسب نسبة الـ A/F المتكافئة وتحليل النواتج بالحجم.

الحل:

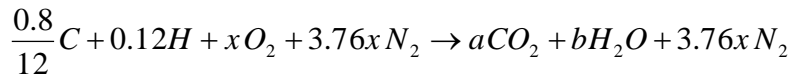
1 kg من الفحم يحتوي على 0.8 kg C و 0.12 kg H،

∴ 1 kg من الفحم يحتوي على 0.12kmol H ، $\frac{0.8}{12}\text{kmol C}$

إجعل الأكسجين المطلوب للاحتراق الكامل يكون x kmol، يكون النيتروجين المصاحب

$$\text{للكسجين هو } x \times \frac{79}{21} = 3.76x\text{kmol}$$

لـ 1kg من الفحم تكون معادلة الاحتراق كالاتي،



عليه،

$$\therefore a = 0.067 \text{ kmol}, \frac{0.8}{12} = a \quad \text{موازنة الكربون:}$$

$$\therefore b = 0.06 \text{ kmol}, 0.12 = 2b \quad \text{موازنة الهيدروجين:}$$

$$\therefore x = 0.097 \text{ kmol}, 2x = 2a + b \quad \text{موازنة الأكسجين:}$$

كتلة 1 kmol من الأكسجين هي 32 kg، عليه فإن كتلة الأكسجين O_2 لكل kg من الفحم

$$\text{هي: } 32 \times 0.097$$

$$13.3/1 = \frac{32 \times 0.097}{0.233} = \text{نسبة الـ A/F المتكافئة}$$

جملة كيلومولات النواتج،

$$= a + b + 3.7x$$

$$= 0.067 + 0.06 + 3.7 \times 0.097 = 0.492 \text{ kmol}$$

عليه فإن التحليل الرطب،

$$\frac{0.067}{0.492} \times 100 = 13.3\% CO_2; \quad \frac{0.06}{0.492} \times 100 = 12.2\% H_2;$$

$$\frac{0.365}{0.492} \times 100 = 74.2\% N_2$$

7/ محرك غازي يتم إمداده بغاز الفحم بالمكونات التالية:

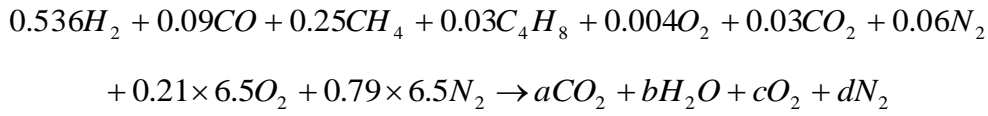
$$3\% CO_2, 0.4\% O_2, 3\% C_4H_8, 25\% CH_4, 9\% CO, 53.6\% H_2, 6\% N_2$$

إذا كانت نسبة الهواء / الوقود تساوي 6.5/1 بالحجم، أحسب تحليل نواتج الاحتراق.

يمكن افتراض أن نسبة الـ A/F المتكافئة أقل من 6.5/1.

الحل:

بما أنّ نسبة الـ A/F الفعلية تكون أكبر من المتكافئة يتبع ذلك أن الهواء الزائد يتم إمداده بالتالي تحتوي النواتج على CO_2, H_2O, O_2, N_2 . ويمكن كتابة معادلة الاحتراق كالتالي:



عليه،

$$\therefore a = \underline{0.49} \quad 0.09 + 0.25 + 0.12 + 0.03 = a \quad \text{موازنة الكربون:}$$

$$\therefore b = \underline{1.26} \quad 0.536 \times 2 + 0.25 \times 4 + 0.03 \times 8 = b \quad \text{موازنة الهيدروجين:}$$

$$\therefore c = \underline{1.26}, \quad 0.09 + 0.004 \times 2 + 0.03 \times 2 + 0.21 \times 6.5 \times 2 = 2a + b + 2c \quad \text{موازنة الأكسجين:}$$

$$\therefore d = 5.2 \quad 0.06 \times 2 + 0.79 \times 6.5 \times 2 = 2d \quad \text{موازنة النيتروجين:}$$

عليه، جملة الكيلومولات للنواتج الجافة،

$$0.49 + 0.378 + 5.2 = 6.068$$

ويكون التحليل بالحجم كالتالي،

$$\frac{0.49}{6.068} \times 100 = 8.08\% CO_2; \quad \frac{0.378}{6.068} \times 100 = 6.22\% O_2;$$

$$\frac{5.2}{6.068} \times 100 = 85.7\% N_2$$

1.9 التحليل العملي لنواتج الاحتراق:

(Practical Analysis of Combustion Products)

يتطلب التحقق المختبري لإجراء الاحتراق تحليل نواتج الاحتراق حيث تُؤخذ عينات من النواتج من نقاط كافية في المحطة.

إذا تمّ التحليل بطريقة كيميائية يتم استخدام محاليل معينة، كل واحدة تمتص إحدى المكونات. وعندما يتم امتصاص جميع المكونات يتم قياس الحجم المتبقي عند نفس الضغط

ودرجة الحرارة للعينة الأولية.

يتم الحصول على حجم المكونات التي تم امتصاصها بأخذ الفرق بين الحجم قبل وبعد الامتصاص.

1.10 أمثلة محلولة في تحليل نواتج الإحتراق:

(Solved Examples in Combustion Products Analysis)

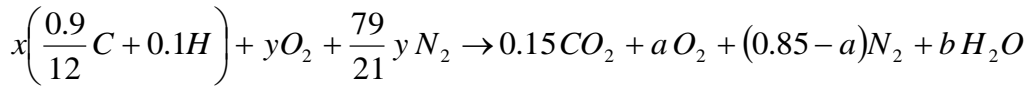
1/ أوضح تحليلاً للعدم (باستخدام جهاز أورسات) لمحرك يعمل بوقود البنزول (Benzol) أن محتوي CO_2 هو 15%، وليس هنالك CO . إفترض أن باقي العادم يحتوي على أكسجين ونيروجين فقط، أحسب الـ A/F للمحرك. يكون التحليل المطلق للبتروول هو 90%C و 10%H.

الحل:

1 kg من الوقود يحتوي على 0.9 kg من C و 0.1 kg من H، عليه يمكن كتابته كالاتي:

$\frac{0.9}{12} kmol C$, $0.1 kmol H$. عليه وباعتبار 1kmol من غاز العادم الجاف (D.E.G) يمكن

كتابة معادلة الاحتراق كالاتي:



حيث: x = هي كتلة الوقود لكل كيلومول من غاز العادم الجاف.

y = هي عدد كيلومولات الأكسجين لكل كيلومول من غاز العادم الجاف.

a = هي عدد كيلومولات الأكسجين الزائدة لكل كيلومول من غاز العادم الجاف.

b = هي عدد كيلومولات الماء لكل كيلومول من غاز العادم الجاف.

$$\therefore x = 2.0 \quad , \quad \frac{0.9}{12}x = 0.5 \quad \text{عليه، موازنة الكربون:}$$

$$\therefore b = 0.1 \quad , \quad 0.1x = 2b \quad \text{موازنة الهيدروجين:}$$

$$\therefore y = 0.2 + a \quad (1) \quad , \quad 2y = 2 \times 0.15 + 2a + b \quad \text{موازنة الأكسجين:}$$

$$\therefore y = 0.226 - 0.266a \quad (2) \quad , \quad 3.76 \times 2 \times y = 2 \times (0.85 - a) \quad \text{موازنة النيتروجين:}$$

وبمساواة قيم y في المعادلتين (1) و (2)،

$$0.226 - 0.266a = 0.2 + a$$

$$\therefore a = 0.0206$$

$$\therefore y = 0.2 + 0.0206 = 0.221 \text{ kmol}$$

\therefore الأكسجين الذي يتم إمداده، $0.221 \times 32 \text{ kg / kmol D.E.G}$

$$\frac{0.221 \times 32}{0.233} = 30.4 \text{ kg / kmol D.E.G} \quad \text{الأكسجين الذي يتم إمداده،}$$

بما أن $x = 2$ ، فإن الوقود الذي يتم إمداده لكل كيلومول، D.E.G هو 2 kg.

$$A/F \text{ ratio} = \frac{30.4}{2} = 15.2/1$$

/2 أعطي تحليلاً للعادم الجاف من محرك احتراق داخلي الآتي:

$$4.5\% \text{ O}_2, 1\% \text{ H}_2, 4\% \text{ CH}_4, 2\% \text{ CO}, 12\% \text{ CO}_2$$

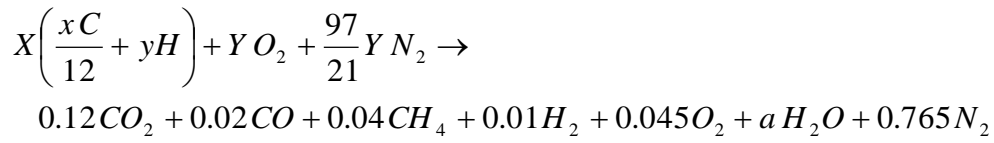
والمتبقي نيتروجين. أحسب التناسب بالكتلة للكربون إلي الهيدروجين في الوقود، بافتراض أنه

هيدروجين نقي.

الحل:

اجعل 1 kg من الوقود يحتوي على $x \text{ kg C}$ و $y \text{ kg H}$.

عليه، وباعتبار 1 kmol من D.E.G وبإدخال x، y كما معرّف في المثال السابق، يمكن كتابته،



عليه،

$$\therefore Y = 0.2035, \quad 3.76 Y = 0.765 \quad \text{موازنة النيتروجين:}$$

$$\therefore a = 0.057 \quad , \quad 0.2035 = 0.12 + \frac{0.02}{2} + 0.045 + \frac{a}{2} \quad \text{موازنة الأكسجين:}$$

$$\therefore \frac{Xx}{12} = 0.12 + 0.02 + 0.04 \quad \text{موازنة الكربون:}$$

$$\therefore Xx = 2.16 \quad (1)$$

$$Xy = 4 \times 0.04 + 2 \times 0.01 + 2 \times 0.057 \quad \text{موازنة الهيدروجين:}$$

$$\therefore Xy = 0.294 \quad (2)$$

وبقسمة (1) % (2)،

$$\frac{Xx}{Xy} = \frac{2.16}{0.294} = 7.35$$

∴ نسبة الكربون إلي الهيدروجين في الوقود،

$$\frac{x}{y} = 7.35/1$$

الفصل الثاني

ماكينات الإزاحة الموجبة

(Positive Displacement Machines)

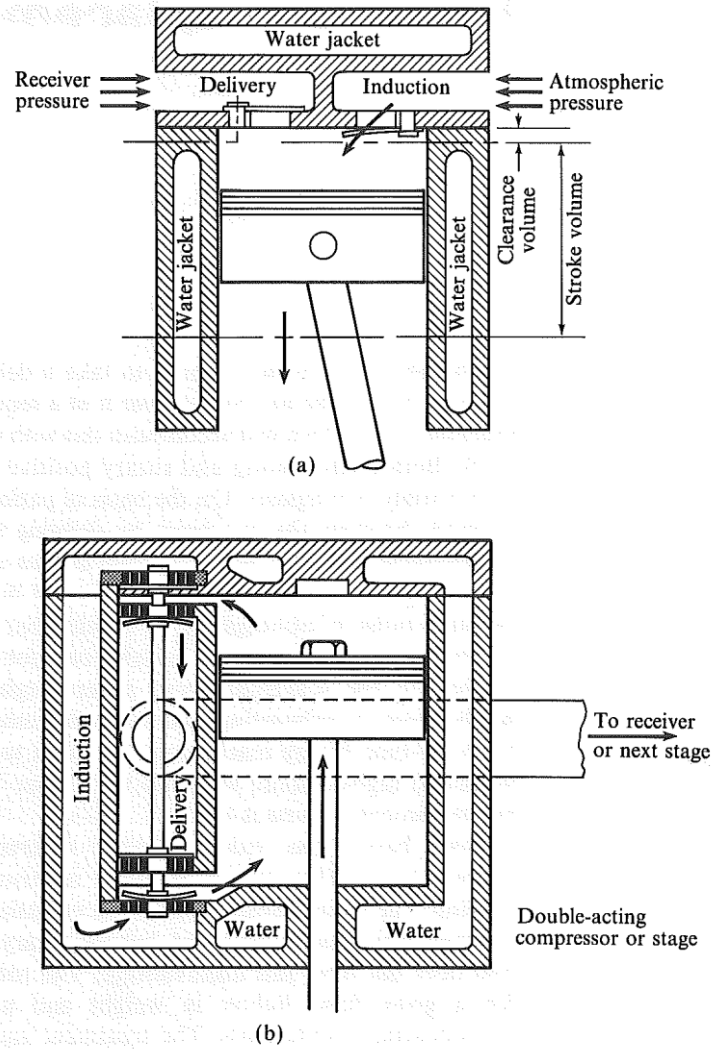
2.1 مدخل: (Introduction)

وظيفة الضاغط هي سحب كمية محددة من مائع (عادة غاز، وغالباً هواء) وتصريفها عند ضغط مطلوب. الماكينة الأكثر كفاءة هي تلك التي ستكمل هذا بأدنى شغل ميكانيكي مدخل. تستخدم كل من ماكينات الإزاحة الموجبة الترددية والدّوّارة لأغراض متنوعة. يمكن التمييز بينهما على أساس الأداء بتعريف النوع الترددي كذلك الذي يمتلك معدّل سريان كتلة منخفض ونسب ضغط عالية، والنوع الدّوّار كذلك الذي يمتلك معدّل سريان كتلة عالي ونسب ضغط منخفضة. يكون مدى الضغط من الجوى إلي 9bar مشتركاً لكلا من النوعين.

تكون بعض الماكينات الدّوّارة مناسبة فقط لشغل ذو نسبة ضغط منخفضة ويتم تطبيقها للنظافة (الكنس) والشحن الفوقي للمحركات، والتطبيقات المتنوعة للاستنفاد (العام) والضح الفراغي. لضغوط فوق 9bar يمكن استخدام الماكينة ذات الريشة (vane-type rotary m/c) لإمداد ضغوط تعزيزية، لكن لشغل ذو ضغط عال محتمل حتى 485bar فما فوق، لأغراض خاصة، يتم استخدام النوع الترددي.

كلا النوعان الأساسيان يوجد في أشكال مختلفة كل بمميزاته الخاصة. يمكن أن يكونا مفردى أو متعددى المرحلة، وأما أن يملكا تبريداً هوائياً أو مائياً. تكون الماكينات الترددية نبضية في حركتها مما يحد من معدّل تصريف المائع خلالها، بينما تكون الدّوّارة متصلة في حركتها. تكون الماكينات الدوّارة أصغر في حجمها لسريان معطي، أخف في وزنها وأبسط ميكانيكا من رصيفتها الترددية. يوضح الشكل (2.1) تخطيطياً الأنواع المتباينة التي سيتم مناقشتها.

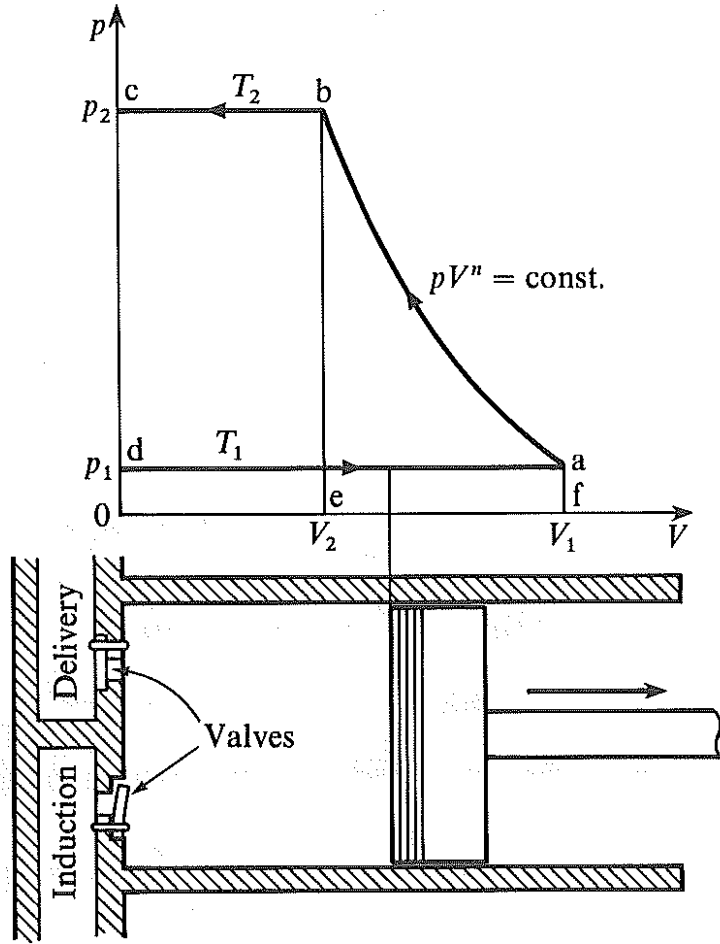
لضاغط يشتغل بأسلوب دوري أو نبضي، مثل الضاغط الترددي، فإنّ الخواص عند المدخل والمخرج هي القيم المتوسطة المأخوذة في الدورة. يتم اختبار حد حجم التحكم بحيث تكون الحالات 1 و 2 ثابتة مع الزمن وتكون الأوضاع المنتخبة بعيدة عن اضطراب التنبيض (pulsating disturbance).



شكل (2.1) ضواغط هواء ترددية أحادي الفعل (a) ومزدوج الفعل (b)

2.2 الماكينات الترددية: (Reciprocating Machines)

تشتمل الآلية على الكباس، ذراع التوصيل، المرفق، وترتيبة الأسطوانة. ابتدائياً سيتم تجاهل حجم الخلوص في الأسطوانة. أيضاً سيتم افتراض أن مائع التشغيل هو غازاً مثالياً. تأخذ الدورة لفة واحدة للعمود المرفقي لتكتمل ويتم توضيح المخطط البياني في الشكل (2.2). يتم تصميم الصمامات المستخدمة في معظم ضواغط الهواء بحيث تعطي فعل ذاتي وتكون من النوع المحمل باليايات التي تشتغل بفرق ضغط صغير عبرها، يعطي ضغط الياي الخفيف فعل إغلاق سريع.



شكل (2.2) مخطط الضغط ضد الحجم لضغط ترددي بتجاهل الخلوص

يجب أن يكون صعود الصمام لإعطاء سريان الهواء المطلوب أصغر ما يمكن ويجب أن يشتغل بدون صدمة.

في الشكل (2.2) يمثل الخط d-a شوط السحب. تزداد الكتلة في الأسطوانة من صفر عند d إلى تلك المطلوبة لملء الأسطوانة عند a. تكون درجة الحرارة ثابتة عند T_1 لهذا الإجراء و لا يكون هنالك تبادل حرارة مع البيئة المحيطة في الحالة المثالية. يبدأ السحب عندما يكون فرق الضغط عبر الصمام كاف لفتحه. يمثل الخط a-b-c الانضغاط وشوط التصريف عندما يبدأ الكباس شوط رجوعه يرتفع الضغط في الأسطوانة ويغلق صمام الدخول. يستمر صعود الضغط بالكباس الراجع كما موضح بالخط a-b حتى يتم الوصول إلى الضغط الذي

يفتح عنده صمام التصريف (قيمه يتم تحديدها بالصمام والضغط في المستقبل ((receiver)).

يحدث التصريف كما موضح بالخط b-c، الذي يكون إجراءً عند درجة حرارة ثابتة T_2 ، ضغط ثابت P_2 ، تبادل حرارة صفري وكتلة متناقصة. تعاد الدورة عند نهاية هذا الشوط. تعتمد درجة حرارة التصريف على قانون الانضغاط بين a، b الذي بدوره يعتمد على تبادل الحرارة مع البيئة المحيطة أثناء هذا الإجراء. يمكن افتراض أن الشكل العام للانضغاط هو متعدد الانتحاء انعكاسي (reversible polytropic)، (i.e. PV^n constant). يُعطي صافي الشغل المبذول في الدورة بمساحة مخطط $P - V$ ويكون الشغل المبذول على الغاز. سيكون الشغل المبذول على الغاز موجباً في هذا الفصل، بما أننا سنهتم أساسياً بإجراء الانضغاط. الشغل المبذول البياني على الهواء للدورة = المساحة abcd = المساحة abef + المساحة bcde - المساحة adof.

باستخدام المعادلة التالية، المساحة abef،

$$\begin{aligned}
 \text{i.e. شغل الدخل} &= \frac{P_2 v_b - P_1 v_a}{n-1} + p_2 v_b - p_1 v_a \\
 &= (p_2 v_b - p_1 v_a) \left(\frac{1}{n-1} + 1 \right) \\
 &= (p_2 v_b - p_1 v_a) \left(\frac{1+n-1}{n-1} \right) \\
 &= \frac{n}{n-1} (p_2 v_b - p_1 v_a) \quad (1)
 \end{aligned}$$

من المعادلة المميزة للغازات يمكن كتابة،

$$p_1 v_a = \dot{m} R T_1 \quad , \quad p_2 v_b = \dot{m} R T_2$$

(حيث \dot{m} هي الكتلة المسحوبة والمصرفة في الدورة)، وبالتالي:

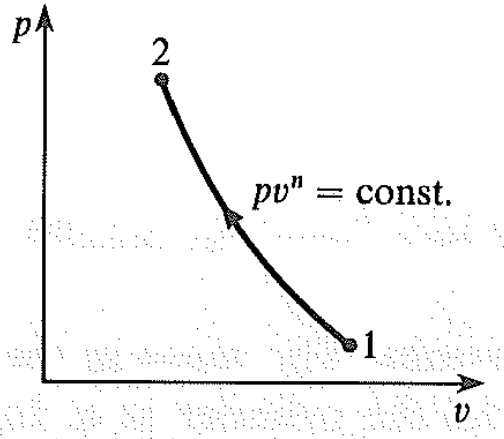
$$\text{شغل الدورة الواحدة} = \frac{n}{n-1} \dot{m} R (T_2 - T_1) \quad (2)$$

يكون الشغل المبذول على الهواء لوحدة زمن مساوياً للشغل المبذول بالدورة مضروباً في عدد

الدورات لوحدة زمن. يستخدم معدّل سريان الكتلة أكثر تكراراً من الكتلة في الدورة.

يغير مائع التشغيل حالته بين a، b في الشكل (2.2) من P_1 و T_1 إلى P_2 و T_2 ، يتم

توضيح التغير في الشكل (2.3) الذي هو مخطط خواص (p i.e. ضد v).



شكل (2.3) إجراء الانضغاط على مخطط p - v

$$T_2 = T_1 \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{(n-1)/n} ، \text{ تُعطي درجة حرارة التصريف بالمعادلة التالية ،}$$

مثال (1):

ضاغط ترددي مفرد المرحلة يسحب 1m^3 من الهواء في الدقيقة عند 1.013bar و 15°C

ويصرفه عند 7bar . مفترضاً أن قانون الانضغاط يكون $pv^{1.35} = \text{const.}$ وأنّ الخلوّص

يتم تجاهله، أحسب القدرة البيانية.

الحل:

$$\text{الكتلة المصروفة في الدقيقة ، } \dot{m} = \frac{P_1 v_1}{RT_1} = \frac{1.013 \times 1 \times 10^5}{287 \times 288} = 1.226 \text{ kg/min}$$

(حيث $T_1 = 15 + 273 = 288 \text{ K}$.)

$$T_2 = T_1 \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{(n-1)/n} = 288 \left(\frac{7}{1.013} \right)^{(1.35-1)/1.35}$$

$$= 288 \times 6.91^{0.259} = 288 \times 1.65 = 475.2 \text{ K}$$

من المعادلة (2)،

$$\text{الشغل البياني} = \frac{n}{n-1} \dot{m} R (T_2 - T_1) \text{ kJ/min}$$

(حيث \dot{m} هو معدّل سريان الكتلة بالـ kg/min).

$$\text{i.e. الشغل البياني} = \frac{1.35 \times 1.226 \times 287 \times (475.2 - 288)}{10^3 \times (1.35 - 1)}$$

$$= 254 \text{ kJ/min}$$

$$\text{i.e. القدرة البيانية } i.p. = \frac{254}{60} = 4.23 \text{ kW}$$

يكون شغل الدخل الفعلي للضاغط أكبر من الشغل البياني، نتيجة للشغل الضروري لتخطي الفقدات الناشئة من الاحتكاك، etc.

$$\text{i.e. الشغل الاحتكاكي} + \text{الشغل البياني} = \text{شغل العمود}$$

$$\text{أو } s.p = i.p + f.p \quad (3)$$

تُعطي الكفاءة الميكانيكية للماكينة بـ

$$\text{الكفاءة الميكانيكية للضاغط} = \frac{\text{الشغل البياني أو القدرة البيانية}}{\text{شغل العمود أو قدرة العمود}} \quad (4)$$

لتحديد قدرة الدخل المطلوبة يجب اعتبار كفاءة محرك الإدارة بالإضافة للكفاءة الميكانيكية.

بالتالي،

$$\text{قدرة الدخل} = \frac{S.P}{\text{كفاءة المحرك و الإدارة}} \quad (5)$$

مثال (2):

إذا تمت إدارة الضاغط للمثال (1) بسرعة 300rev/min لماكينة مفردة التشغيل، مفردة الأسطوانة، أحسب قطر الأسطوانة المطلوب، مفترضاً نسبة طول شوط إلي قطر أسطوانة مقداره 1.5/1. أحسب قدرة المحرك المطلوبة لإدارة الضاغط إذا كانت الكفاءة الميكانيكية للضاغط تعادل 85% وتلك لنقل قدرة المحرك 90%.

الحل:

$$\text{الحجم المسحوب في الدقيقة عند المدخل} = 1 \text{ m}^3/\text{min}$$

$$\therefore \text{الحجم المسحوب في الدورة} = \frac{1}{300} = 0.00333 \text{ m}^3 / \text{cycle}$$

$$\text{i.e. حجم الأسطوانة} = 0.00333 \text{ m}^3$$

$$\therefore \frac{\pi}{4} d^2 L = 0.00333$$

(حيث d = قطر الأسطوانة، L = طول الشوط).

$$\text{i.e. } \frac{\pi}{4} d^2 (1.5d) = 0.00333$$

$$\therefore d^3 = 0.00283 \text{ m}^3$$

$$\text{i.e. قطر الأسطوانة } d = \underline{141.5} \text{ mm}$$

$$\text{قدرة الدخل للضاغط} = \frac{4.23}{0.85} = \underline{4.98} \text{ kW}$$

$$\therefore \text{قدرة المحرك} = \frac{4.98}{0.9} = \underline{5.53} \text{ kW}$$

مبدئياً بالمعادلة (2)، يمكن اشتقاق تعبيرات أخرى للشغل البياني ،

$$\text{القدرة البيانية} = \frac{n}{n-1} \dot{m} R (T_2 - T_1) = \frac{n}{n-1} \dot{m} R T_1 \left(\frac{T_2}{T_1} - 1 \right)$$

أيضاً من المعادلة التالية،

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{(n-1)/n}$$

عليه،

$$\text{القدرة البيانية} = \frac{n}{n-1} \dot{m} R T_1 \left(\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{(n-1)/n} - 1 \right) \quad (6)$$

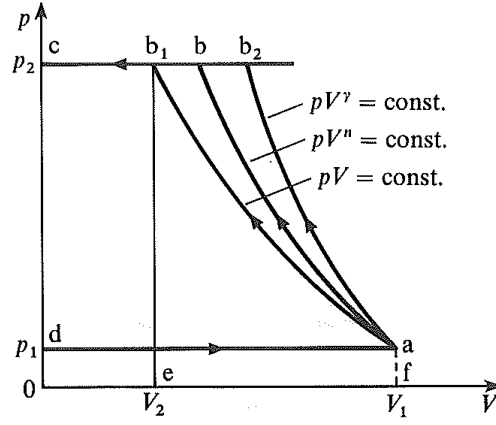
$$\text{أو القدرة البيانية} = \frac{n}{n-1} p_1 \dot{V} \left(\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{(n-1)/n} - 1 \right) \quad (7)$$

(حيث \dot{V} هو الحجم المسحوب لوحدة زمن)

2.3 شرط الحصول على أدنى شغل:

(The Condition for Minimum Work)

يُعطى الشغل المبذول على الهواء بمساحة المخطط البياني، وسيكون الشغل المبذول أدنى عندما تكون مساحة المخطط أدنى. يتم تثبيت ارتفاع المخطط بنسبة الضغط المطلوبة (عندما تكون p_1 مثبتة)، ويتم تثبيت طول الخط da بحجم الأسطوانة الذي يتم تثبيته بالسحب المطلوب من الغاز. الإجراء الوحيد الذي يمكن أن يؤثر على مساحة المخطط هو الخط ab . يتم تحديد موضع هذا الخط بقيمة الأس n ؛ الشكل (2.4) أدناه يوضح المحددات للإجراءات الممكنة.



شكل (2.4) إجراءات الإنضغاط الممكنة على مخطط $p - v$

يكون الخط ab_1 طبقاً للقانون $PV = \text{constant}$ (i.e. ثابت درجة الحرارة). يكون الخط ab_2 طبقاً لقانون $PV^\gamma = \text{constant}$ (i.e. ثابت القصور الحراري). حيث يكون كلا الإجراءان انعكاسيان.

يكون الانضغاط ثابت درجة الحرارة هو الإجراء الأكثر تفضيلاً بين a و b ، معطياً الشغل الأدنى المبذول على الهواء. هذا يعني أنه في ضاغط فعلي يجب الحفاظ على درجة حرارة الغاز بحيث تكون أقرب ما يمكن لقيمتها الأولية وهذا يتطلب توفير وسيلة لتبريد الغاز إما بالهواء أو بالماء. يعطي الشغل المبذول البياني عندما يتم انضغاط الغاز بثبات درجة الحرارة بالمساحة ab_1cd .

$$\text{المساحة } ab_1cd = \text{المساحة } ab_1ef + \text{المساحة } b_1coe - \text{المساحة } adof$$

$$\text{المساحة } ab_1ef = p_2 v_{b_1} \log_e \frac{p_2}{p_1}$$

$$\text{i.e. الشغل البياني في الدورة} = p_2 V_{b_1} \log_e \frac{p_2}{p_1} + p_1 V_{b_1} - p_1 V_a$$

أيضاً $p_1 V_a = p_2 V_{b_1}$ ، بما أن الإجراء ab_1 ثابت درجة الحرارة.

$$\therefore \text{الشغل البياني في الدورة} = p_2 V_{b_1} \log_e \frac{p_2}{p_1} \quad (8)$$

$$= p_1 V_a \log_e \frac{p_2}{p_1} \quad (9)$$

$$= mRT \log_e \frac{p_2}{p_1} \quad (10)$$

2.4 كفاءة ثابت درجة الحرارة: (Isothermal Efficiency)

بالتعريف المؤسس على مخطط البيان،

$$\text{كفاءة ثابت درجة الحرارة} = \frac{\text{الشغل ثابت درجة الحرارة}}{\text{الشغل البياني}} \quad (11)$$

مثال (3):

مستخدماً البيانات للمثال (1) أحسب كفاءة ثابت درجة الحرارة للضاغط.

الحل:

من المعادلة (10)،

القدرة ثابتة درجة الحرارة =

$$mRT \log_e \frac{p_2}{p_1} = 1.226 \times 0.287 \times 288 \times \log_e \frac{7}{1.013} = 196 \text{ kJ/min}$$

من المثال (1)، الشغل البياني = 254 kJ/min.

بالتالي، مستخدماً المعادلة (11) عاليه،

$$\text{كفاءة ثابت درجة الحرارة} = \frac{196}{254} = 0.772 \text{ أو } 77.2\%$$

الصورة الأقل تفصيلاً للانضغاط في الضواغط الترددية هي تلك التي تُعطي بالإجراء ثابت

القصور الحراري (أنظر الشكل (2.4)). ستكون الصورة الفعلية للانضغاط عادة بين هذين

الحدين. يتم تمثيل الإجراءات الثلاث على مخطط $T - s$ في الشكل (2.5).

1 - 2' يمثل انضغاطاً ثابت درجة الحرارة.

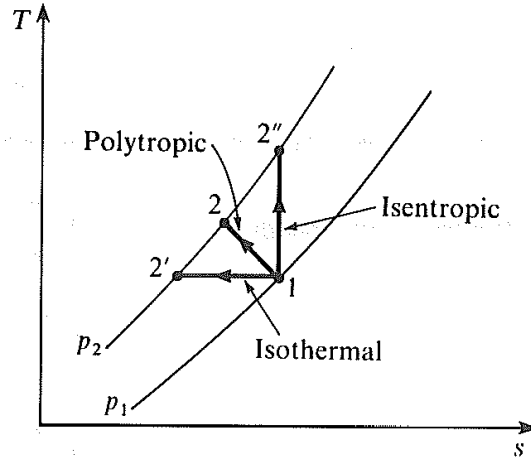
1 - 2'' يمثل انضغاطاً ثابت القصور الحراري.

1 - 2''' يمثل انضغاطاً طبقاً لقانون $PV^n = \text{constant}$

عادة ما تقع n بين 1.2 و 1.3 لضغط هواء ترددي.

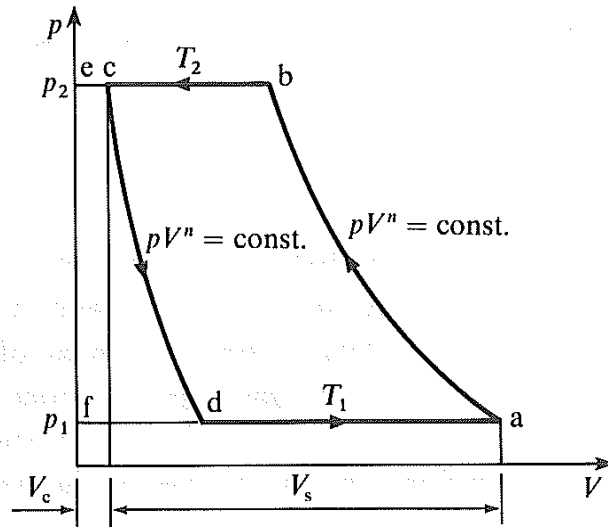
يكون الأسلوب الرئيسي المستخدم لتبريد الهواء بإحاطة الأسطوانة بغلاف ماء (water jacket).

والتصميم للنسبة الأفضل لمساحة السطح إلي حجم الأسطوانة.



شكل (2.5) إجراء ثابت الحرارة، متعدّد الانتحاء، انضغاط ثابت

القصور الحراري على مخطط T - s



شكل (2.6) مخطط البيان المثالي لضغط ترددي بخلوص

2.5 الضواغط الترددية بتضمين الخلوص:

(Reciprocating Compressors Including Clearance)

يكون الخلوص ضرورياً في ضاغط لإعطاء حرية ميكانيكية لأجزاء التشغيل ويسمح بالفراغ الضروري لتشغيل الصمامات.

يوضح الشكل (2.6) مخطط البيان المثالي بتضمين حجم الخلوص. لماكينات ذات جودة عالية يكون حجم الخلوص حوالي 6% من الحجم المكتسح، وللماكينات ذات الصمام الكمي (Sleeve valve m/cs) يمكن أن يصبح حوالي 2%، لكن هنالك أيضاً ماكينات شائعة بخلوصات 30-35%.

عندما يكتمل شوط التصريف bc يكون حجم الخلوص V_c ممتلئاً بالغاز عند ضغط p_2 ودرجة حرارة T_2 . كلما واصل الكباس مسيرته على شوط السحب التالي يتمدد الهواء خلفه حتى يتم الوصول للضغط p_1 . مثالياً حالما يصل الضغط إلي p_1 ، سيبدأ سحب غاز طازج ويستمر لنهاية هذا الشوط عند a . من بعد يتم إنضغاط الغاز طبقاً للقانون $PV^n = \text{const.}$ (عموماً)، ويبدأ التصريف عند b حسب تحكم الصمامات. يكون تأثير الخلوص هو خفض الحجم المسحوب عند p_1 و T_1 من V_s إلي $(V_a - V_d)$. تكون كتل الغاز عند النقاط الأربع الرئيسية بحيث أن، $\dot{m}_c = \dot{m}_d, \dot{m}_a = \dot{m}_b$. تعطي الكتلة المصرفة في الدورة بـ $(\dot{m}_b - \dot{m}_c)$ ، والتي تكون مساوية لتلك المسحوبة المعطاة بـ $(\dot{m}_a - \dot{m}_d)$. تتغير خواص مائع التشغيل في الإجراءات a-b و c-d كما موضّح في الشكل (2.7) أدناه. بالرجوع للشكل (2.6) يُعطي الشغل المبذول البياني بمساحة المخطط $p - v$.

المساحة abcd = الشغل البياني

= المساحة abef - المساحة cefd

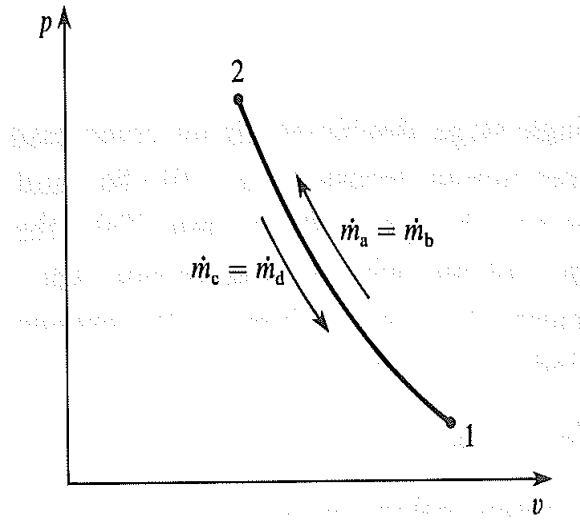
بالتالي، باستخدام المعادلة (2)،

$$\text{القدرة البيانية} = \frac{n}{n-1} \dot{m}_a R (T_2 - T_1) - \frac{n}{n-1} \dot{m}_d R (T_2 - T_1)$$

i.e. $\text{القدرة البيانية} = \frac{n}{n-1} R (\dot{m}_a - \dot{m}_d) (T_2 - T_1)$

$$= \frac{n}{n-1} R \dot{m} (T_2 - T_1) \quad (12)$$

(حيث \dot{m} هي الكتلة المسحوبة لوحدة زمن $((\dot{m}_a - \dot{m}_d))$)



شكل (2.7) انضغاط وإعادة تمدد كتل الغاز في ضاغط ترددي

توضح المقارنة بين المعادلات (12) و (2) أنهما متطابقتان. الشغل المبذول لانضغاط كتلة

الغاز \dot{m}_c (أو \dot{m}_d) على الانضغاط a-b، يتم إرجاعه عندما يتمدد الغاز من c إلى d.

بالتالي فإن الشغل المبذول لوحدة كتلة من الهواء المصرف لا يتأثر بمقياس حجم الخلوص.

يمكن اشتقاق تعبيرات أخرى كما في سابقه. من المعادلة (7)،

$$\text{القدرة البيانية} = \frac{n}{n-1} p_1 \dot{v} \left(\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{(n-1)/n} - 1 \right)$$

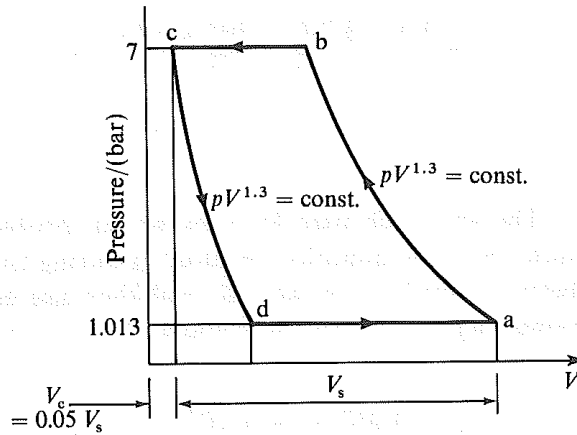
$$\therefore \text{القدرة البيانية} = \frac{n}{n-1} p_1 (v_a - v_d) \left(\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right) \quad (13)$$

يمكن زيادة الكتلة المصرفة لوحدة زمن بتصميم الماكينة بحيث تصبح مزدوجة التشغيل (double – acting)، i.e.، يتم التفاعل مع الغاز على كلا جانبي الكباس، شوط السحب لأحد الجانبين يكون شوطاً للانضغاط للجانب الآخر (أنظر الشكل (2.1)).

مثال (4):

ضاغط هواء مفرد المرحلة مزدوج التشغيل مطلوب منه تصريف 14m^3 من الهواء في الدقيقة مقاساً عند 1.013bar و 15°C . يكون ضغط التصريف 7bar والسرعة $300\text{rev}/\text{min}$. خذ الحجم الخلوصى كـ 5% من الحجم المكتسح بأس انضغاط مقداره $n=1.3$. أحسب الحجم المكتسح للأسطوانة، درجة حرارة التصريف والقدرة البيانية.

الحل:



شكل (2.8) مخطط الضغط ضد الحجم للمثال (4)

بالرجوع للشكل (2.8) أعلاه،

$$\text{الحجم المكتسح} = (v_a - v_c) = v_s$$

و $v_c = 0.05v_s$ ، حجم الخلوص

$$v_a = 1.05v_s$$

الحجم المسحوب في الدورة $= (v_a - v_d)$

$$\text{و } (v_a - v_d) = \frac{14}{300 \times 2} = 0.0233m^3$$

(عدد الدورات في اللفة \times عدد اللغات في الدقيقة = عدد الدورات في الدقيقة)

الآن،

$$v_a = 1.05v_s \quad , \quad v_d = v_c \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{1}{n}} = 0.05v_s \left(\frac{7}{1.013} \right)^{\frac{1}{1.3}}$$

$$\text{i.e. } v_d = 0.221v_s$$

$$\therefore (v_a - v_d) = 1.05v_s - 0.221v_s = 0.0233m^3$$

$$\therefore v_s = \frac{0.0233}{0.829} = 0.028m^3$$

$$\text{درجة حرارة التصريف} , \quad T_2 = T_1 \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{n-1}{n}}$$

$$\text{و } T_1 = 15 + 273 = 288K$$

$$\text{i.e. } T_2 = 288 \left(\frac{7}{1.013} \right)^{(1.3-1)/1.3} = 288 \times 6.91^{0.231}$$

$$= 288 \times 1.563 = 450 K$$

$$\therefore \text{درجة حرارة التصريف} = 177^\circ C$$

مستخدماً المعادلة (13)،

$$\text{القدرة البيانية} = \frac{n}{n-1} p_1 (v_a - v_d) \left(\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{(n-1)/n} - 1 \right)$$

$$= \frac{1.3}{0.3} \times \frac{1.013 \times 10^5 \times 14}{10^3 \times 60} \left(\left(\frac{7}{0.013} \right)^{(1.3-1)/1.3} - 1 \right) kW$$

i.e. القدرة البيانية = 57.65 kW

بطريقة أخرى،

$$\dot{m} = \frac{1.013 \times 14 \times 10^5}{0.287 \times 288 \times 10^3} = 17.16 kg / min$$

بالتالي، مستخدماً المعادلة (12)،

$$\begin{aligned} \text{القدرة البيانية} &= \frac{n}{n-1} \dot{m} R (T_2 - T_1) \\ &= \frac{1.3}{0.3} \times 17.16 \times 0.287 (450 - 288) \\ &= 3459 kJ / min \end{aligned}$$

$$\text{i.e. القدرة البيانية} = \frac{3459}{60} kW = 57.65 kW$$

2.6 الكفاءة الحجمية η_v : (Volumetric Efficiency)

لقد تمّ توضيح أنّ أحد تأثيرات الخلوص هو خفض الحجم المسحوب إلي قيمة أقل من ذلك للحجم المكتسح. هذا يعني أنّه ولسحب مطلوب يجب زيادة مقياس الأسطوانة فوق ذلك الذي يتم حسابه بافتراض خلوص صفري.

يتم تعريف الكفاءة الحجمية كالآتي:

$$\eta_v = \text{كتلة الهواء المصرفّ مقسوماً على كتلة الهواء التي ستتملأ الحجم المكتسح عند}$$

$$(14) \quad \text{حالات الهواء الطليق للضغط ودرجة الحرارة}$$

أو، $\eta_v =$ حجم الهواء المصرف مقاساً عند ضغط ودرجة حرارة الهواء الطليق مقسوماً على الحجم المكتسح للأسطوانة

(15)

يمكن توضيح أن المعادلتان (14) و (15) تكونا متطابقتان،

i.e. إذا كان تصريف الهواء الطليق F.A.D. هو V ، عند P و T ، بالتالي تكون الكتلة

$$\dot{m} = \frac{PV}{RT} \text{ المصرفة}$$

الكتلة المطلوبة لملء الحجم المكتسح V_s ، عند P و T تعطي بـ ،

$$\dot{m}_s = \frac{PV_s}{RT}$$

عليه بالمعادلة (14)،

$$\eta_v = \frac{\dot{m}}{\dot{m}_s} = \frac{PV}{RT} \times \frac{RT}{PV_s} = \frac{V}{V_s}$$

يمكن الحصول على الكفاءة الحجمية من مخطط البيان. بالرجوع للشكل (2.9) أدناه،

$$\text{الحجم المسحوب} = V_a - V_d = V_s + V_c - V_d$$

وباستخدام المعادلة التالية،

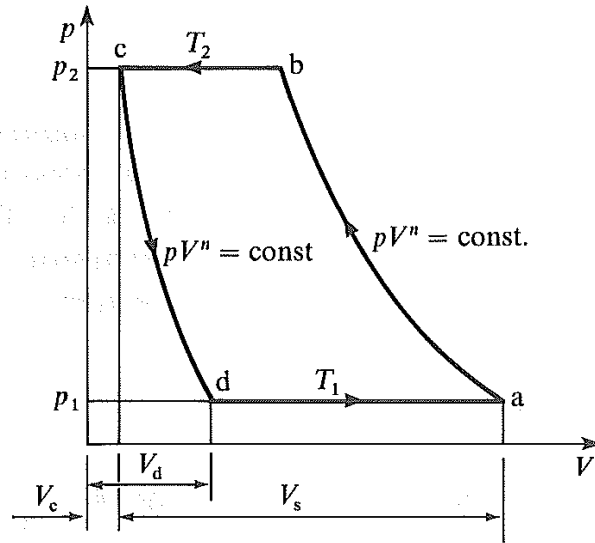
$$\frac{V_d}{V_c} = \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{1/n} \quad \text{i.e.} \quad V_d = V_c \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{1/n}$$

$$\begin{aligned} \therefore \text{الحجم المسحوب} &= V_s + V_c - V_c \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{1/n} \\ &= V_s - V_c \left\{ \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{1/n} - 1 \right\} \end{aligned} \quad (15)$$

بالتالي، مستخدماً المعادلة (15)،

$$\eta_v = \frac{V_a - V_d}{V_s} = \frac{V_s - V_c \left\{ \left(p_2 / p_1 \right)^{1/n} - 1 \right\}}{V_s}$$

$$\text{i.e. } \eta_v = 1 - \frac{V_c}{V_s} \left\{ \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{1/n} - 1 \right\} \quad (16)$$



شكل (2.9) مخطط البيان لضغط ترددي

من المهم ملاحظة أن التعريف للكفاءة الحجمية يكون متسقاً فقط مع المعادلتان (14) و (15) إذا كانت حالات الضغط ودرجة الحرارة في الأسطوانة أثناء شوط السحب متطابقة مع تلك للهواء الطليق. حقيقة فإنّ الغاز سيتم تسخينه بواسطة جدران الأسطوانة، وسيكون هنالك انخفاضاً في الضغط نتيجة لانخفاض الضغط المطلوب لسحب الغاز إلي الأسطوانة ضد مقاومة السريان الحتمية. تتطلب هذه التعديلات للحالة المثالية تطبيق بعناية أكثر الصيغ التي تم اشتقاقها مسبقاً.

كمثال، كما في السابق إذا تم ترميز الـ F.A.D في الدورة بـ V عند p و T بالتالي،

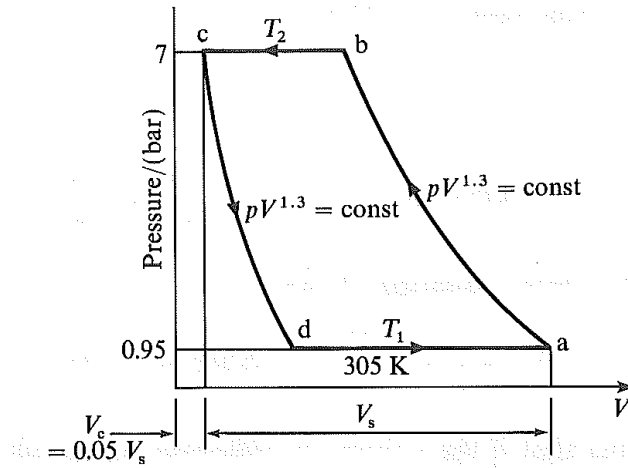
$$\dot{m} = \frac{pV}{RT} = \frac{p_1(V_a - V_d)}{RT_1}$$

$$\text{i.e. } F.A.D / \text{cycle}, V = (V_a - V_d) \frac{T}{T_1} \frac{p_1}{p} \quad (17)$$

(حيث p_1 و T_1 هما حالات السحب).

مثال (5):

ضاغط هواء مفرد المرحلة، مزدوج التشغيل لدية F.A.D مقداره $14\text{m}^3/\text{min}$ مقاساً عند 1.013bar و 15°C . يكون الضغط ودرجة الحرارة في الأسطوانة أثناء السحب هما 0.95bar و 32°C . يكون ضغط التصريف 7bar وأس الانضغاط والتمدد $n=1.3$. أحسب القدرة البيانية المطلوبة والكفاءة الحجمية. يكون الخلوص مساوياً لـ 5% من الحجم المكتسح.



شكل (2.10) مخطط الضغط ضد الحجم للمثال (5)

يتم توضيح مخطط $p - v$ في الشكل (2.10) أعلاه.

$$\dot{m} = \frac{pV}{RT}$$

الكتلة المصروفة في الدقيقة.

(حيث F.A.D في الدقيقة هو V عند p و T)

$$\text{i.e. } \dot{m} = \frac{1.013 \times 14 \times 10^5}{0.287 \times 288 \times 10^3} = 17.16 \text{ kg/min}$$

(حيث $T = 15 + 273 = 288 \text{ K}$)

$$T_2 = T_1 \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{(n-1)/n}$$

$$\text{i.e. } T_2 = 305 \times \left(\frac{7}{0.95} \right)^{(1.3-1)/1.3} = 305 \times 1.586 = 483.7 \text{ K}$$

(حيث $T_1 = 32 + 273 = 305 \text{ K}$)

من المعادلة (12)،

$$\begin{aligned} \text{القدرة البيانية} &= \frac{n}{n-1} \dot{m} R (T_2 - T_1) \\ &= \frac{1.3}{0.3} \times 17.16 \times 0.287 (483.7 - 305) \\ &= 3813 \text{ kJ/min} \end{aligned}$$

$$\therefore i.p. = \frac{3813}{60} = 63.55 \text{ kW}$$

كما في سابقه،

$$V_d = V_c \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{1/n}$$

$$\begin{aligned} \text{i.e. } V_d &= 0.05 V_s \left(\frac{7}{0.95} \right)^{1/1.3} = 0.05 V_s \times 7.369^{0.769} \\ &= 0.05 V_s \times 4.65 = 0.233 V_s \end{aligned}$$

$$\therefore V_a - V_d = V_a - 0.233 V_s = 1.05 V_s - 0.233 V_s = 0.817 V_s$$

مستخدماً المعادلة (17)،

$$F.A.D / \text{cycle} = (V_a - V_d) \frac{T}{T_1} \frac{P_1}{P}$$

$$\text{i.e. } F.A.D / \text{cycle} = 0.817 V_s \times \frac{288}{305} \times \frac{0.95}{1.013} = 0.724 V_s$$

بالتالي من المعادلة (15)،

$$\eta_v = \frac{V}{V_s} = \frac{0.724 V_s}{V_s} = 0.724 \text{ أو } 72.4\%$$

لوحظ أنه إذا كانت الكفاءة الحجمية في المثال عاليه يتم تقويمها باستخدام المعادلة (16)

بالتالي،

$$\eta_v = 1 - \frac{V_c}{V_s} \left\{ \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{1/n} - 1 \right\} = 1 - \frac{0.05V_s}{V_s} \left\{ \left(\frac{7}{0.95} \right)^{1/1.3} - 1 \right\}$$

i.e. $\eta_v = 1 - 0.05(4.65 - 1) = 1 - 0.183 = 0.817$ أو 81.7%

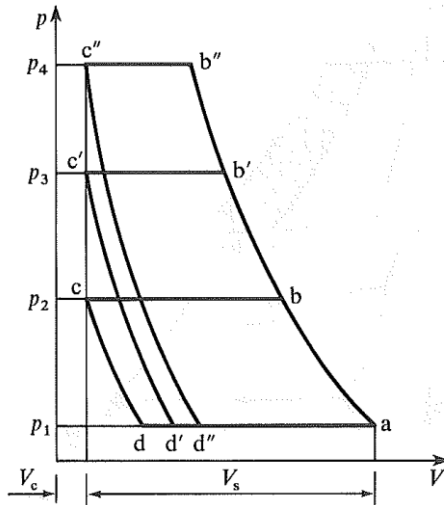
يكون هنالك فرقاً معتبراً بين القيمتين، بما أنّ الإجابة الأخيرة تتجاهل الفرق في درجة الحرارة والضغط بين حالات الهواء الطليق وحالات السحب.

2.7 الانضغاط متعدّد المرحلة: (Multi – Stage Compression)

لقد تم سابقاً تأسيس أنّه ولشغل أدني يجب أن يكون إجراء الانضغاط ثابت درجة الحرارة. عموماً فإنّ درجة الحرارة بعد الانضغاط تُعطي بالمعادلة $T_2 = T_1(p_2/p_1)^{(n-1)/n}$. تزيد درجة حرارة التصريف بزيادة نسبة الضغط. إضافياً، من المعادلة (16)،

$$\eta_v = 1 - \frac{V_c}{V_s} \left\{ \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{1/n} - 1 \right\}$$

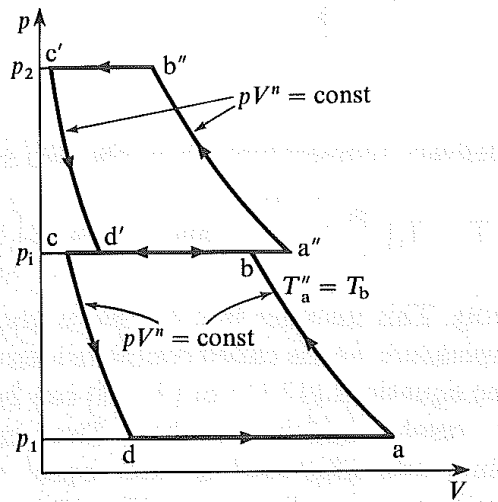
يمكن ملاحظة أنّه كلما زادت نسبة الضغط نقصت الكفاءة الحجمية. هذه يتم توضيحها في الشكل (2.11) أدناه،



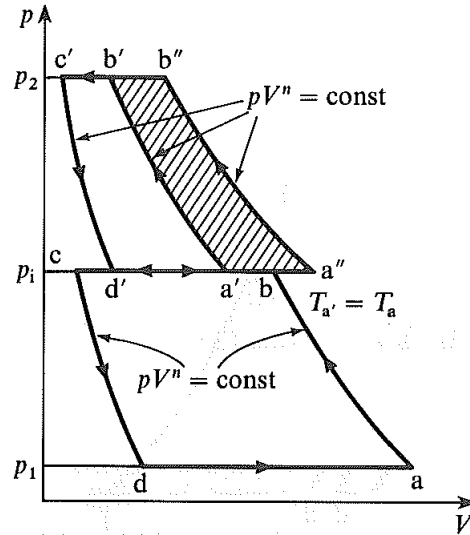
شكل (2.11) تأثير الكفاءة الحجمية لزيادة ضغط التصريف

لانضغاط من p_1 إلى p_2 تكون الدورة $abcd$ و الـ F.A.D للدورة $V_a - V_d$ ؛ لانضغاط من p_1 إلى p_3 تكون الدورة $ab'c'd'$ و الـ F.A.D للدورة $V_a - V_{d'}$ ؛ لانضغاط من p_1 إلى p_4 تكون الدورة $ab''c''d''$ و الـ F.A.D للدورة $V_a - V_{d''}$. عليه لـ F.A.D مطلوب سيزيد مقاس الأسطوانة كلما زادت نسبة الضغط.

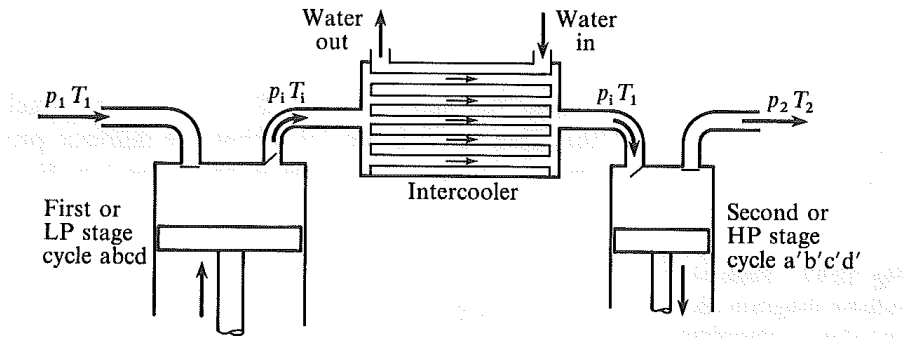
يمكن تحسين الكفاءة الحجمية بتنفيذ الانضغاط في مرحلتين. بعد المرحلة الأولى للانضغاط يتم تمرير المائع إلى أسطوانة أصغر يتم فيها انضغاط الغاز إلى الضغط المطلوب. إذا كانت هنالك مرحلتان للماكينة سيتم تصريف الغاز عند نهاية المرحلة، لكن يمكن تصريفه إلى أسطوانة ثالثة لنسب ضغط أعلى. تكون أسطوانات المراحل المتعاقبة متناسبة لأخذ حجم الغاز المصرف من المرحلة السابقة.



شكل (2.12) مخطط الضغط ضد الحجم لانضغاط ذو مرحلتين



شكل (2.13) أثر التبريد البيني على شغل الانضغاط



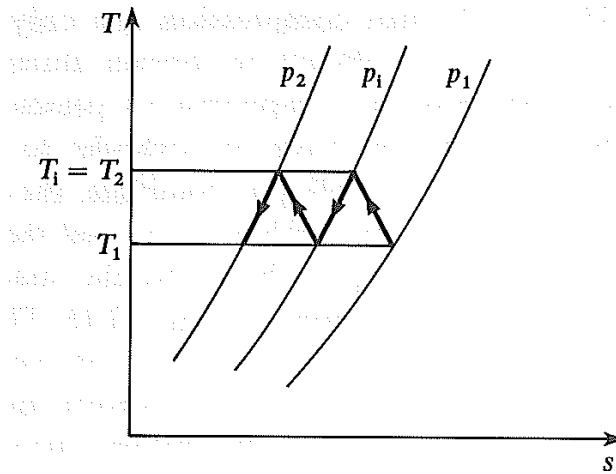
شكل (2.14) التبريد البيني بين مراحل الضاغط

يتم توضيح مخطط البيان لماكينة ذات مرحلتين في الشكل (2.12). في هذا المخطط يتم افتراض أن إجراء التصريف من المرحلة الأولى أو مرحلة الضغط المنخفض وإجراء السحب للمرحلة الثانية أو مرحلة الضغط العالي، يكونا عند نفس الضغط. يمكن الحصول على انضغاط ثابت لدرجة الحرارة مثالي فقط إذا كان التبريد المثالي متصلًا. هذه من الصعوبة بمكان الحصول عليها أثناء الانضغاط العادي. بانضغاط متعدّد المرحلة يتم تبريد الغاز كلما يتم نقله من أسطوانة إلي أخرى، يتم بتمريره خلال مبرد بيني (intercooler). إذا كان التبريد كاملاً، سيدخل الغاز المرحلة الثانية عند نفس درجة الحرارة التي دخل بها المرحلة الأولى. يتم توضيح الشكل المتحصل عليه بالتبريد البيني بالمساحة

المظللة في الشكل (2.13) ومخطط المحطة في الشكل (2.14). يتم توضيح مخططي البيان abcd و a'b'c'd' بضغط مشترك، p_1 . هذا لا يحدث في ماكينة فعلية لأن هنالك هبوط صغير في الضغط بين الأسطوانتين، يمكن تركيب مبرد بعدي (after cooler) بعد إجراء التصريف لتبريد الغاز. تعطي درجات حرارة التصريف من المرحلتين بـ ،

$$T_i = T_1 \left(\frac{p_i}{p_1} \right)^{(n-1)/n} \quad , \quad T_2 = T_1 \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{(n-1)/n}$$

على الترتيب. هذا يفترض أن الغاز يتم تبريده في المبرد البيني إلي حرارة المدخل، ويسمي بالتبريد الكامل. لحساب الـ i.p. يمكن تطبيق المعادلات (12) و (13) لكل مرحلة بانفصال وإضافة النتائج لبعضها. يتم تمثيل الانضغاط ثنائي المرحلة بتبريد بيني كامل وتبريد بعدي، ونسب ضغوط متساوية في كل مرحلة على مخطط $T - s$ في الشكل (2.15) أدناه.



شكل (2.15) مخطط يوضح التبريد البيني والتبريد البعدي

مثال (6):

في ضاغط هواء ترددي مفرد التشغيل - ثنائي المرحلة يتم انضغاط 4.5kg من الهواء في الدقيقة من 1.013bar و 15°C خلال نسبة ضغط مقدارها 9/1. كلا المرحلتين لها نفس نسبة الضغط، ويكون قانون الانضغاط والتمدد في كلا المرحلتين هو $PV^{1.3} = \text{const.}$ إذا

كان التبريد بيني كاملاً، أحسب القدرة البيانية الحجم المكتسحة المطلوبة للأسطوانة. افترض أن حجوم الخلوص لكلا المرحلتين هما 5% من حجومهما المكتسحة وأنّ الضاغط يشتغل بسرعة مقدارها 300rev/min.

الحل:

يتم توضيح مخططا البيان متراكبين في الشكل (2.16). تكون دورة مرحلة الضغط المنخفض هي abcd ودورة الضغط العالي هي a'b'c'd'،
الآن،

$$p_2 / p_1 = 9$$

$$\therefore p_2 = 9p_1$$

$$p_i / p_1 = p_2 / p_i \quad \text{أيضاً}$$

$$\therefore p_i^2 = p_1 p_2 = 9p_1^2$$

$$\therefore p_i^2 = 9p_1^2 \quad \therefore \frac{p_i}{p_1} = \sqrt{9} = 3$$

مستخدماً المعادلة التالية ،

$$\frac{T_i}{T_1} = \left(\frac{p_i}{p_1} \right)^{(n-1)/n} \quad \therefore \frac{T_i}{288} = 3^{(1-1.3)/1.3}$$

(حيث $T_1 = 15 + 273 = 288 \text{ K}$ ، و T_i هي درجة الهواء الداخل للمبرّد البيني).

$$\text{i.e. } T_i = 288 \times 1.289 = 371 \text{ K}$$

الآن بما أن n ، m ، وفرق درجة الحرارة هي نفسها لكلا المرحلتين، بالتالي فإن الشغل

المبدول في كل مرحلة هو نفسه. i.e.، مستخدماً المعادلة (12)،

$$\text{الشغل الكلي المطلوب في الدقيقة} = 2 \times \frac{n}{n-1} \dot{m} R (T_i - T_1)$$

$$= 2 \times \frac{1.3}{1.3-1} \times 4.5 \times 0.387 (371 - 288)$$

$$= 930 \text{ kJ/min}$$

$$\text{القدرة البيانية} = \frac{930}{60} = 15.5 \text{ kW}$$

يكون معدّل سريان الكتلة في الدورة هو،

$$\dot{m} = \frac{4.5}{300} = 0.015 \text{ kg/cycle}$$

يتم تمرير الكتلة خلال كل مرحلة على الترتيب.

لأسطوانة الضغط المنخفض، بالرجوع للشكل (2.17)،

$$V_a - V_d = \frac{\dot{m} R T_1}{p_1} = \frac{0.015 \times 287 \times 288}{1.013 \times 10^5} = 0.0122 \text{ m}^3 / \text{cycle}$$

مستخدماً المعادلة (16)،

$$\eta_v = \frac{V_a - V_d}{V_s} = 1 - \frac{V_c}{V_s} \left\{ \left(\frac{p_i}{p_1} \right)^{1/n} - 1 \right\} = 1 - 0.05 (3^{0.769} - 1)$$

$$\therefore \eta_v = 1 - 0.066 = 0.934$$

$$\therefore V_s = \frac{V_a - V_d}{\eta_v} = \frac{0.0122}{0.934} = 0.013 \text{ m}^3 / \text{cycle}$$

i.e. الحجم المكتسح لأسطوانة الضغط المنخفض = 0.0131 m³

لمرحلة الضغط العالي، يتم سحب كتلة مقدارها 0.015 kg/cycle عند 15°C وضغط

$$\text{مقداره } p_i = 3 \times 1.013 = 3.039 \text{ bar}$$

$$\text{i.e. الحجم المسحوب} = \frac{0.015 \times 287 \times 288}{3.039 \times 10^5}$$

$$= 0.00406 \text{ m}^3 / \text{cycle}$$

مستخدماً المعادلة (16) لمرحلة الضغط العالي،

$$\eta_v = 1 - \frac{V_c}{V_s} \left\{ \left(\frac{p_2}{p_i} \right)^{1/n} - 1 \right\}$$

وبما أن V_c/V_s هي نفسها كما لمرحلة الضغط المنخفض وأيضاً $p_2/p_i = p_i/p_1$ وبالتالي η_v

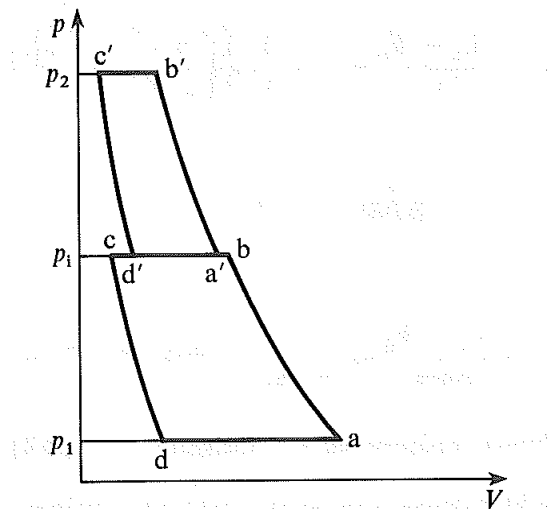
تكون مساوية لـ 0.934 كما في عاليه.

$$\therefore \text{الحجم المكتسح لمرحلة الضغط العالي} = \frac{0.00406}{0.934} = 0.00436 \text{ m}^3$$

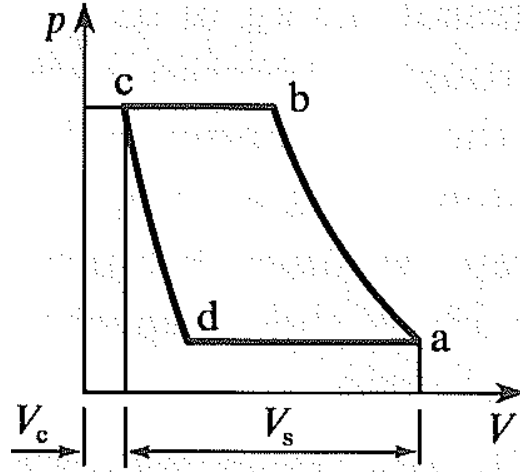
لاحظ أن نسبة الخلوص هي نفسها في كل أسطوانة، ودرجات حرارة السحب هي نفسها بما

أن التبريد البيئي يكون كاملاً، عليه فإنّ الحجم المكتسح تكون في نسبة ضغوط السحب.

$$\text{i.e. } V_H = \frac{V_L}{3} = \frac{0.0131}{3} = 0.00436 \text{ m}^3$$



شكل (2.16) مخطط الضغط ضد الحجم موضحاً كل المرحلتين للمثال (6)



شكل (2.17) مخطط الضغط ضد الحجم لمرحلة الضغط المنخفض للمثال (6)

الفصل الثالث

محطات القدرة البخارية

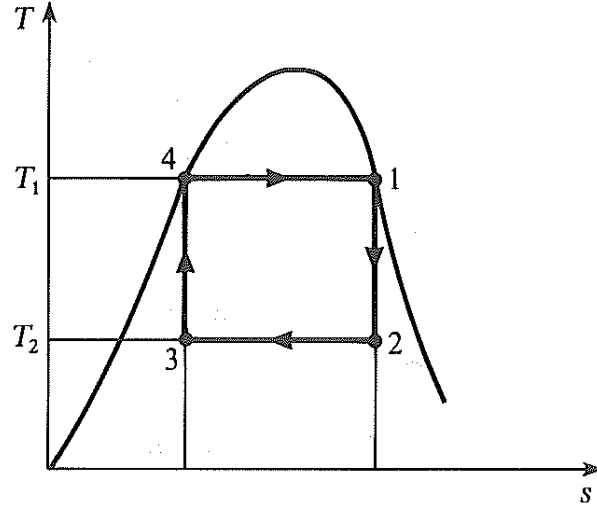
(Steam Power Plants)

3.1 دورة كارنو: (Carnot Cycle)

هي الدورة الأكبر كفاءة بالنسبة لدرجات حرارة المصدر والعاظم. يمكن تطبيقها في

حالة الغازات والبخار. يمكن متابعة دورة كارنو للبخار الرطب في الشكل (3.1) أدناه، الذي

يمكن تلخيص الملامح الرئيسية له في الآتي:



شكل (3.1) دورة كارنوت لبخار رطب على مخطط $T - s$

1-4 تسخين بثبات درجة الحرارة والضغط. e.g. القيزانات أو الغلايات، المولدات، والمفاعلات النووية.

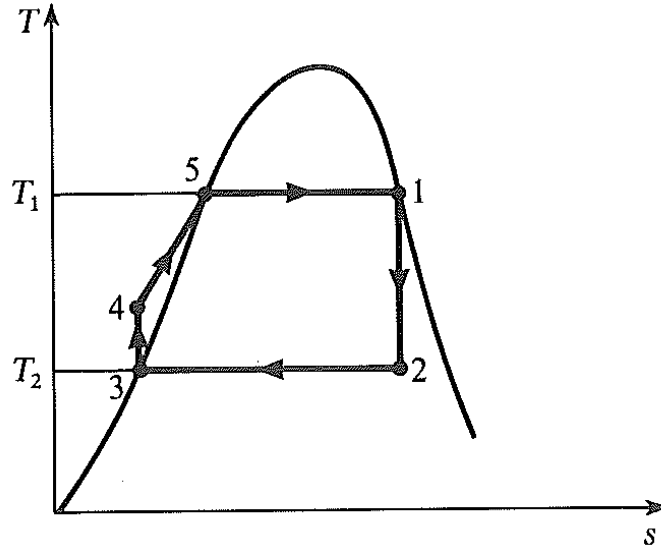
2-1 يتمدد البخار بإجراء انعكاسي ثابت القصور الحراري من الضغط العالي ودرجة الحرارة العالية إلى الضغط المنخفض وبهذا يكون قد أنتج شغلاً وهو الغرض الرئيسي من هذه الدورة e.g. الآلة البخارية أو التوربين البخاري.

3-2 فقد حراري بالتبريد عند ضغط ودرجة حرارة ثابتين e.g. المكثف.

4-3 انضغاط بإجراء انعكاسي ثابت القصور الحراري من ضغط ودرجة حرارة منخفضة إلى ضغط عالي، e.g. المضخة أو الضاغط. وتتواصل الدورة.

3.2 دورة رانكن: (Rankine Cycle)

يتم توضيح الدورة في الشكل (3.2) أدناه.



شكل (3.2) دورة رانكن للبخر الرطب على مخطط $T - s$

4-1 الغلاية، 4-5 إضافة حرارة (تسخين) بثبات الضغط وباختلاف درجة الحرارة وذلك لتغيير الماء من الحالة 4 (ماء غير مشبع) إلى الحالة 5 (ماء مشبع) حتى يصل إلى درجة الحرارة والضغط اللازمين لدخوله إلى الغلاية.

5-1 تسخين بثبات درجة الحرارة والضغط.

1-2 التوربين، يتمدد البخار بإجراء انعكاسي ثابت القصور الحراري من الحالة (1) بخار جاف مشبع إلى الحالة (2) بخار رطب.

2-3 المكثف، تكثيف كامل للبخار بالتبريد من الحالة (2) بخار رطب إلى الحالة (3) سائل مشبع لتسهيل عملية ضخه إلى الحالة (4) باستخدام المضخات العادية.

3-4 إنضغاط للبخار بإجراء انعكاسي ثابت القصور الحراري من الحالة (3) سائل مشبع إلى الحالة (4) سائل غير مشبع. وتتواصل الدورة.

من معادلة طاقة السريان المستقر (steady state flow energy equation)

(S.S.F.E.E) أدناه،

$$h_1 + \frac{C_1^2}{2} + z_1 g + Q = h_2 + \frac{C_2^2}{2} + z_2 g + W \quad (1)$$

إجعل التغير في طاقة السرعة يساوي صفراً i.e. $\frac{C_2^2}{2} - \frac{C_1^2}{2} = 0$

واجعل التغير في طاقة الوضع يساوي صفراً i.e. $z_2 g - z_1 g = 0$

حيث تصبح المعادلة (1) كالاتي:

$$h_1 + Q = h_2 + W \quad (2)$$

الغلاية: من المعادلة (2)،

$$Q_{sup} = Q_{541} = (h_1 + h_4) + W$$

$$\therefore Q_{541} = h_1 - h_4 \quad , \quad W = 0$$

التوربين: من المعادلة (2)،

$$W_{o/p} = (h_1 - h_2) + Q$$

$$Q = 0 \quad , \quad (تمدد أديباتي انعكاسي) \quad , \quad S_1 = S_2$$

$$\therefore W_{o/p} = W_{12} = h_1 - h_2$$

المكثف: من المعادلة (2)،

$$Q_{rej.} = Q_{23} = (h_2 - h_3) + W$$

$$W = 0$$

$$\therefore Q_{rej.} = Q_{23} = h_2 - h_3$$

المضخة: من المعادلة (2)،

$$W_{i/p} = W_{34} = (h_4 - h_3) + Q$$

$$Q = 0 \quad , \quad (تمدد أديباتي انعكاسي) \quad , \quad S_3 = S_4$$

شغل الدخل للمضخة. $W_{34} = h_4 - h_3$

صافي الشغل في الدورة، $W_{net\ o/p} = W_{12} - W_{34}$

$$\therefore W_{net\ o/p} = (h_1 - h_2) - (h_4 - h_3) \quad (3)$$

إذا تمَّ تجاهل شغل مضخة التغذية، نظراً لأنَّ خرج التوربين كبير جداً مقارنة بشغل المضخة، فإنَّ المعادلة (3) تصبح كالآتي،

$$W_{net\ o/p} = h_1 - h_2$$

كفاءة دورة راكن، $\eta_R = \frac{\text{صافي شغل الخرج}}{\text{الحرارة المكتسبة في الغلاية}}$

$$\eta_R = \frac{(h_1 - h_2) - (h_4 - h_3)}{h_1 - h_4} = \frac{(h_1 - h_2) - (h_4 - h_3)}{(h_1 - h_3) - (h_4 - h_3)} \quad (4)$$

وإذا تمَّ تجاهل شغل مضخة التغذية i.e. $h_4 - h_3 = 0$ ، تصبح المعادلة كالآتي:

$$\eta_R = \frac{h_1 - h_2}{h_1 - h_3} \quad (5)$$

وإذا تم اعتبار مضخة التغذية،

$$\therefore W_{34} = h_4 - h_1$$

للسوائل غير الانضغاطية، من الحالة (3) إلى الحالة (4)، $v = \text{constant}$

$$\therefore h_4 - h_3 = v(p_4 - p_3) \quad (6)$$

ولإثبات المعادلة (6) عاليه، من معادلة طاقة اللاسريان،

$$dQ = du + dw$$

ولأي إجراء انعكاسي، $dw = p\ dv$

وللإجراء الأديباتي الانعكاسي،

$$dQ = du + p dv = 0$$

$$h = u + pv \quad \text{، وبما أن}$$

بتفاضل المعادلة عاليه نحصل على،

$$dh = du + p dv + v dp$$

$$du + p dv = dh - v dp \quad \text{وبإعادة ترتيبها}$$

$$\therefore dQ = dh - v dp = 0$$

$$\therefore dh = v dp$$

بتكامل المعادلة عاليه فيما بين الحالتين 3 و 4،

$$\int_3^4 dh = v \int_3^4 dp$$

$$\therefore h_4 - h_3 = v(p_4 - p_3)$$

∴ شغل دخل المضخة،

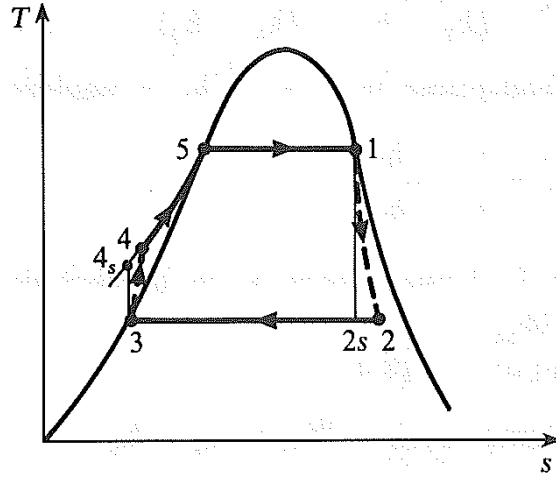
$$W_{34} = h_4 - h_3 = v(p_4 - p_3)$$

(تؤخذ قيمة v من جداول البخار عند ضغط p_3).

ويمكن أخذها كقيمة متوسطة مساوية لـ $0.001 \text{ m}^3/\text{kg}$

نسبة الكفاءة: (Efficiency Ratio)

$$\text{نسبة الكفاءة} = \frac{\text{كفاءة الدورة الفعلية}}{\text{كفاءة دورة رانكن}}$$



شكل (3.3) دورة رانكن موضحة الإجراءات الفعلية على مخطط T - s

في الشكل (3.3) عاليه،

يكون التمدد الفعلي لا انعكاسياً (1-2').

ويكون الانضغاط الفعلي لا انعكاسياً (3-4').

بالنسبة لإجراء التمدد، يمكن تعريف كفاءة ثابت القصور الحراري كالتالي:

كفاءة ثابت القصور الحراري للتوربين = (Isentropic efficiency)

$$\frac{\text{الشغل الفعلي}}{\text{الشغل ثابت القصور الحراري}}$$

$$\text{i.e. } \eta_{isen, T} = \frac{W'_{12}}{W_{12}} = \frac{h_1 - h'_2}{h_1 - h_2}$$

وبالنسبة لإجراء الانضغاط،

$$\text{كفاءة ثابت القصور الحراري للضاغط} = \frac{\text{الشغل ثابت القصور الحراري}}{\text{الشغل الفعلي}}$$

$$\eta_{isen, C} = \frac{W_{34}}{W'_{34}} = \frac{h_4 - h_3}{h'_4 - h_3}$$

نسبة الشغل: (Work Ratio)

يتم تعريفها كالاتي،

$$WR = \frac{\text{صافي الشغل}}{\text{اجمالي الشغل}} ، \text{نسبة الشغل}$$

الاستهلاك النوعي للبخار: (Specific Steam Consumption)

هو معدّل سريان البخار بالـ kg/h المطلوب لتطوير قدرة مقدارها 1kw.

$$ssc = \frac{\text{معدل سريان البخار}}{\text{القدرة المنتجة}} = \frac{3600}{W_{net\ o/p}} \text{ kg / kwh} ، \text{الاستهلاك النوعي للبخار}$$

بتجاهل شغل مضخة التغذية،

$$h_4 - h_3 = 0$$

$$\therefore W_{net\ o/p} = h_1 - h_2$$

$$\therefore ssc = \frac{3600}{h_1 - h_2} \text{ kg / kwh}$$

مثال (1):

i/ يتم إمداد بخار جاف مشبع عند ضغط 40bar إلي توربينه حيث يكون ضغط المكثف

0.035bar. إذا كانت المحطة تعمل بدورة رانكن،

أحسب لكل kg من البخار الآتي:

1/ الشغل الناتج متجاهل شغل مضخة التغذية.

2/ الشغل المطلوب لمضخة التغذية.

3/ كمية الحرارة المنتقلة إلي ماء التبريد بالمكثف، وكمية ماء التبريد المطلوبة للمكثف إذا

كان الارتفاع في درجة حرارة الماء هو 5.5 K.

4/ كمية الحرارة المكتسبة.

5/ كفاءة دورة رانكن.

6/ الاستهلاك النوعي للبخار (بتجاهل شغل مضخة التغذية).

ii/ لنفس حالات البخار السابقة، أحسب الآتي:

7/ كفاءة دورة كارنو.

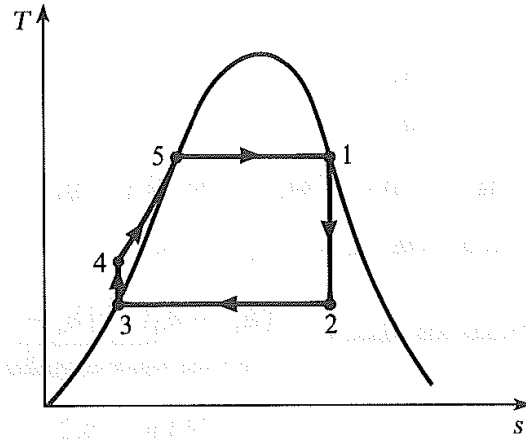
8/ الاستهلاك النوعي للبخار.

لدورة كارنو تعمل في البخار الرطب.

الحل:

من الشكل (3.4) أدناه،

/i



شكل (3.4) مخطط T - s للمثال (3.1)

1/ الشغل الناتج متجاهلاً شغل مضخة التغذية،

$$W_{\text{Gross}} = W_{12} = h_1 - h_2$$

من جداول البخار المشبع عند ضغط 40bar،

$$h_1 = h_g = 2801 \text{ kJ/kg}$$

$$s_g = s_1 = s_2 = 6.07 \text{ kJ/kgK}$$

وعند ضغط 0.035bar،

$$s_2 = s_1 = sf_2 + x_2 sfg_2$$

$$sf_2 = 0.391 \text{ kJ/kgK}, sfg_2 = 8.13 \text{ kJ/kgK}$$

$$\therefore s_2 = s_1 = 6.07 = 0.391 + x_2(8.13)$$

$$\therefore x_2 = \frac{6.07 - 0.391}{8.13} = 0.699 \approx 0.7$$

$$\therefore h_2 = hf_2 + x_2 hfg_2$$

$$hf_2 = 112 \text{ kJ/kgK}, hfg_2 = 2438 \text{ kJ/kgK}$$

$$\therefore h_2 = 112 + 0.7 \times 2438 = 1818.6 \text{ kJ/kg}$$

$$\therefore W_{12} = h_1 - h_2 = 2801 - 1818.6 = 982.4 \text{ kJ/kg}$$

2/ الشغل المطلوب لمضخة التغذية،

$$W_{34} = h_4 - h_3 = v(p_4 - p_3)$$

$$= \frac{1}{\rho} (p_4 - p_3) = \frac{0.001(40 - 0.035) \times 10^5}{10^3} = 4 \text{ kJ/kg}$$

3/ كمية الحرارة المنقولة إلى ماء التبريد بالمكثف، وكمية ماء التبريد المطلوبة للمكثف إذا

كان الارتفاع في درجة حرارة الماء هو 5.5K.

$$Q_{rej.} = Q_{23} = T_2(s_2 - s_3)$$

من جداول البخار المشبع عند ضغط 0.035bar،

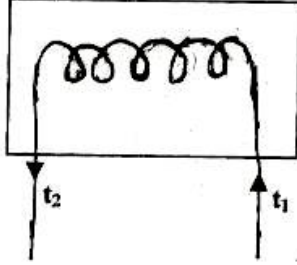
$$T_2 = T_s = 26.7^\circ\text{C} = 26.7 + 273 = 299.7 \text{ K}$$

$$s_2 = s_1 = 6.07 \text{ kJ/kgK}$$

$$s_3 = s_f = 0.391 \text{ kJ/kgK}$$

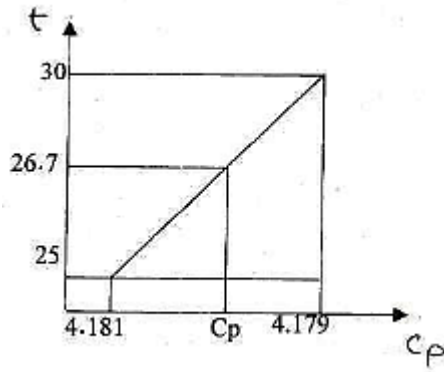
$$\therefore Q_{23} = 299.7(6.07 - 0.391) = \underline{1702 \text{ kJ/kg}}$$

$$Q = m c_p dT \text{ أيضاً}$$



يتم إيجاد c_p من جداول البخار المشبع عند درجة حرارة 26.7°C بأسلوب استخدام

الاستكمال (Interpolation) كالآتي،



$$\therefore c_p = 4.181 + \frac{26.7 - 25}{30 - 25} (4.179 - 4.181) = \underline{4.18 \text{ kJ/kgK}}$$

$$\therefore Q_{23} = 1702 = m \times 4.18 \times 5.5$$

$$\therefore m = \frac{1702}{4.18 \times 5.5} = \underline{74 \text{ kg}}$$

4/ كمية الحرارة المكتسبة،

$$Q_{\text{sup}} = Q_{451} = h_1 - h_4$$

باستخدام المعادلة التالية لإيجاد h_4

$$W_{34} = h_4 - h_3 = v(p_4 - p_3) = 4 \text{ kJ/kg}$$

من جداول البخار المشبع عند ضغط 0.035bar،

$$h_3 = h_f = 112 \text{ kJ/kg}$$

$$\therefore h_4 = 4 + 112 = 116 \text{ kJ/kg}$$

$$\therefore Q_{\text{sup}} = 2801 - 116 = 2685 \text{ kJ/kg}$$

/5 كفاءة دورة رانكن،

$$\eta_R = \frac{(h_1 - h_2) - (h_4 - h_3)}{(h_1 - h_3) - (h_4 - h_3)} = \frac{982.4 - 4}{(2801 - 112) - 4} = 0.3644 \approx 36.4\%$$

/6 الاستهلاك النوعي للبخار (بتجاهل شغل مضخة التغذية)

$$ssc = \frac{3600}{W_{\text{net o/p}}}$$

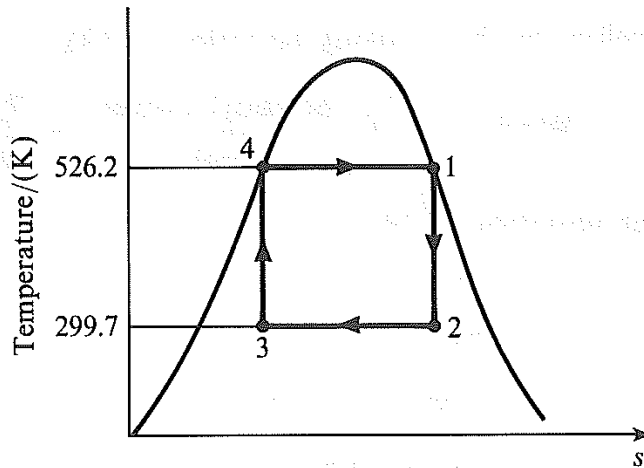
$$W_{\text{net o/p}} = W_{12} - W_{34}$$

بما أن $W_{34} = 0$ ،

$$\therefore W_{\text{net o/p}} = W_{12} = h_1 - h_2 = 982.4 \text{ kJ/kg}$$

$$ssc = \frac{3600}{982.4} = \underline{\underline{3.66 \text{ kg/kwh}}}$$

/ii



شكل (3.5) دورة كارنو في مخطط T – s للمثال (1)

7/ كفاءة دورة كارنو،

$$\eta_{Carnot} = \frac{T_1 - T_2}{T_1}$$

من جداول البخار المشبع عند ضغط 40bar،

$$T_s = T_1 = 250.3^\circ C$$

$$= 250.3 + 273 = 523.3 K$$

$$\therefore \eta_{Carnot} = \frac{523.3 - 299.7}{523.3} = 0.427 \text{ or } 42.7\% \approx \underline{43\%}$$

8/ الاستهلاك النوعي للبخار،

$$ssc = \frac{3600}{W_{net\ o/p}}$$

$$W_{net\ o/p} = W_{12} - W_{34} = (h_1 - h_2) - (h_4 - h_3)$$

$$W_{12} = h_1 - h_2 = \underline{982.4\ kJ/kg}$$

من جداول البخار المشبع عند ضغط 40bar،

$$h_4 = h_f = \underline{1087\ kJ/kg}$$

$$s_4 = s_3 = s_f = \underline{2.797\ kJ/kgK}$$

من جداول البخار المشبع عند ضغط 0.035bar،

$$s_3 = s_4 = 2.797 = sf_3 + x_3 sfg_3$$

$$sf_3 = 0.391\ kJ/kgK, \quad sfg_3 = 8.13\ kJ/kgK$$

$$\therefore 2.797 = 0.391 + x_3(8.13)$$

$$\therefore x_3 = \frac{2.797 - 0.391}{8.13} = \underline{\underline{0.296}}$$

$$\therefore h_3 = hf_3 + x_3 hfg_3$$

$$hf_3 = 112 \text{ kJ/kg}, \quad hfg_3 = 2438 \text{ kJ/kg}$$

$$h_3 = 112 + 0.296 \times 2438 = 833.65 \text{ kJ/kg}$$

$$W_{34} = h_4 - h_3 = 1087 - 833.65 = 253.35 \text{ kJ/kg}$$

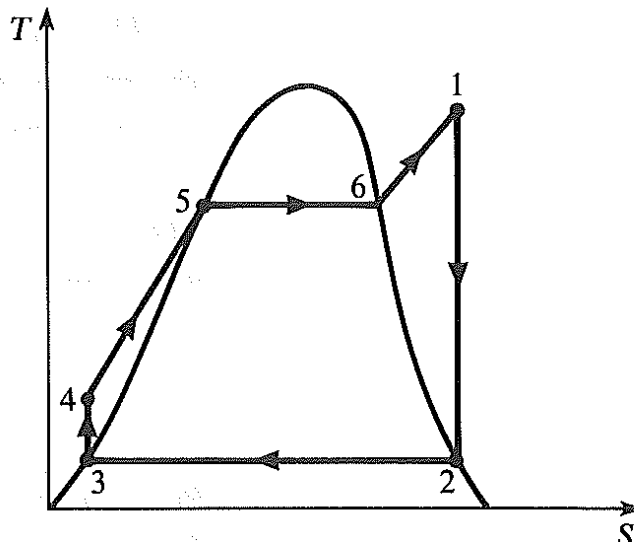
$$W_{net\ o/p} = 982.4 - 253.35 = 729.05 \text{ kJ/kg}$$

$$\therefore ssc = \frac{3600}{729.05} = \underline{\underline{4.94}} \text{ kg/kwh}$$

3.3 تعديلات دورة رانكن: (Modifications of Rankine Cycle)

أ/ دورة رانكن مع التحميص: (Rankine Cycle with Superheat)

يمكن زيادة حرارة الحرارة المتوسطة التي يتم إمدادها إلى الغلاية بتحميص البخار، وذلك بتمرير البخار الجاف المشبع في مجموعة مواسير صغيرة المقطع ليتم تسخينها إضافياً بثبوت الضغط وبتفاوت درجة الحرارة في فرن الغلاية حتى يصل البخار إلى درجة الحرارة المطلوبة لدخوله إلى التوربينة (شكل (3.6)) أدناه،



شكل (3.6) محطة بخار محمص على مخطط T – s

ب/ دورة إعادة التسخين: (The Reheat Cycle)

يتم إعادة تسخين البخار عند ضغط ثابت ودرجة حرارة متغيرة من الحالة (2) إلى الحالة (6) وذلك إما بإعادة البخار إلى الغلاية وتمريه خلال مجموعة من المواسير بالقرب من مواسير التحميص أو باستخدام فرن إعادة تسخين (reheater) يوجد بالقرب من التوربينات. من مخطط T – s أدناه (3.7) ومن المخطط الوظيفي للمحطة شكل (3.8)، يمكن توضيح الآتي:

1-2 تمدد انعكاسي بثبوت القصور الحراري في التوربين ذو الضغط العالي.

2-6 إعادة تسخين البخار بثبوت الضغط وبتفاوت درجة الحرارة.

6-7 تمدد انعكاسي بثبوت القصور الحراري في التوربين ذو الضغط المنخفض.

دواعي استخدام دورة إعادة التسخين:-

1/ تخفيض الرطوبة عند مخرج التوربين بحيث لا تتعدى نسبتها 10%.

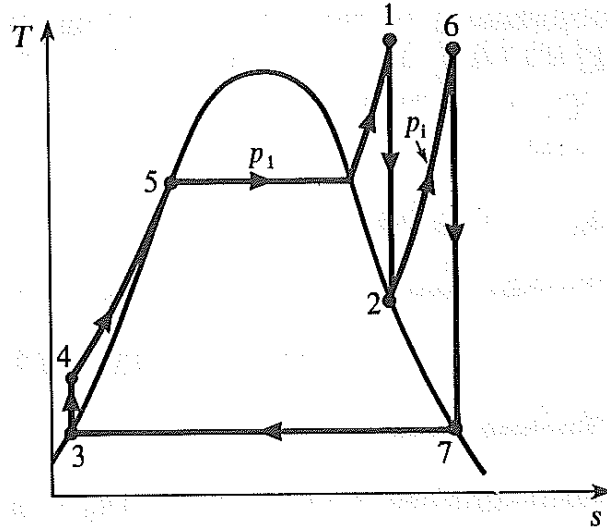
2/ إمكانية استخدام غلايات ذات ضغط عالي لزيادة الكفاءة وتقليل حجم المحطة. وذلك

لأنّ التمدد إذا تم في مرحلة واحدة فإنّ البخار الخارج من التوربينات سيحتوي على رطوبة،

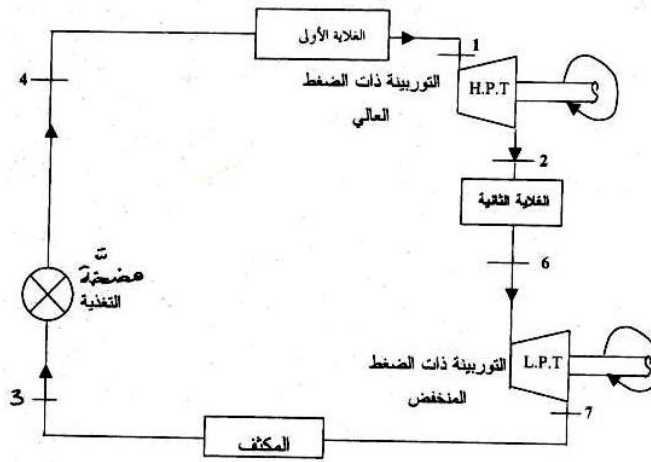
عليه سيتم التمدد على مرحلتين.

3/ تحسين الاستهلاك النوعي للبخار.

يتم توضيح المخطط الكتلي لدورة إعادة التسخين في الشكل (3.8) أدناه.



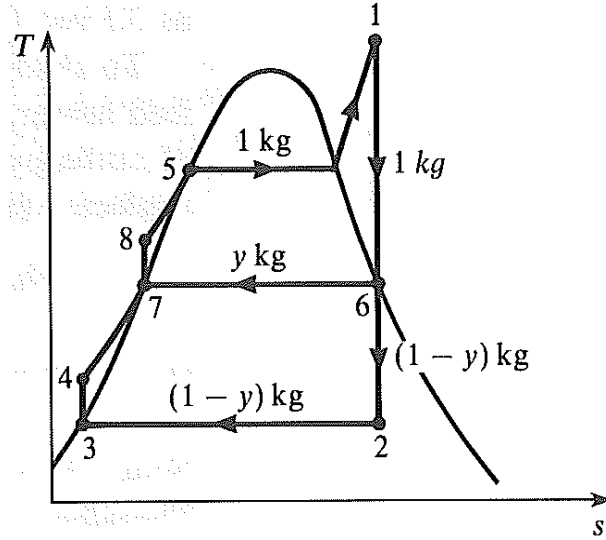
شكل (3.7) مخطط T - s موضحاً دورة إعادة تسخين البخار



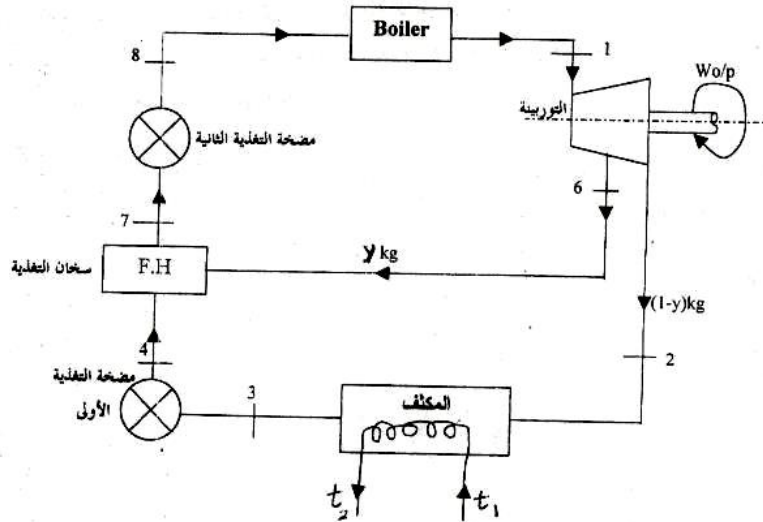
شكل (3.8) مخطط دورة إعادة التسخين

ج/ دورة الاسترجاع (Regenerative Cycle) أو الدورة التجديدية:

هي الدورة التي يتم فيها زيادة درجة حرارة الماء الداخلة إلى الغلاية وذلك بتنظيف بعض البخار عند ضغط وسيط من داخل التوربينة وخلطه مع الماء الخارج من المكثف في سخان تغذية أو خلاط (feed heater or mixer). يتم توضيح مخطط T - s والمخطط الكتلي الوظيفي للدورة في الأشكال (3.9) و(3.10) على الترتيب.



شكل (3.9) محطة بخار ذات دورة تجديدية على مخطط $T - s$



شكل (3.10) مخطط دورة تجديدية

يتمدد البخار من الحالة (1) إلى الحالة (2) خلال التوربين. وعند ضغط وسيط p_6 يتم استنزاف كمية من البخار من التوربينة بمقدار $y \text{ kg}$ لكل kg من البخار ويتم إمداده إلى سخان التغذية (F.H). المتبقي من البخار يكمل إجراء التمدد في التوربينة ويخرج منها عند الحالة (2) حيث يتم تكثيفه في المكثف حتى الحالة (3) التي عندها يتم ضخه بواسطة مضخة التغذية الأولى إلى الحالة (4) (ماء غير مشبع)، وبعدها يتم تمريره إلى سخان

التغذية عند نفس ضغط البخار المستنزف حيث يتم خلطه مع البخار المستنزف لرفع درجة حرارة الماء ليصبح ماءً مشبعاً عند الحالة (7) التي عندها يتم ضخه بواسطة مضخة التغذية الثانية إلى الحالة (8) (ماء غير مشبع)، بعدها يدخل إلى الغلاية ليتم تسخينه بضغط ثابت.

يتم حساب درجة حرارة النزيف بالمعادلة،

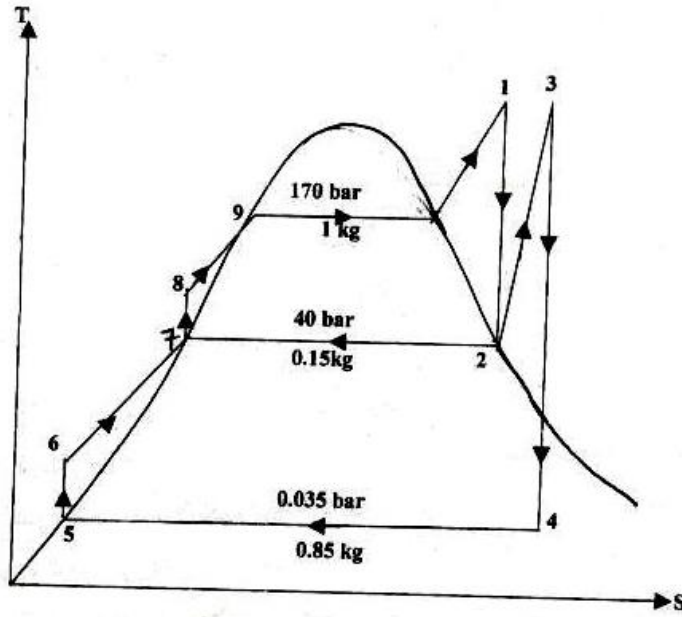
$$t_{bleed} = \frac{t_5 - t_2}{2} ، \text{ درجة حرارة النزيف}$$

مثال (2):

محطة توليد قدرة كهربائية تعطي خرجاً مقداره 200MW. يكون الضغط المحمّص الخارج من الغلاية هو 170bar ودرجة حرارة 600°C. بعد التمدد خلال توربينة المرحلة الأولى إلى ضغط 40bar، يتم استنزاف 15% من البخار إلى سخان التغذية، والمتبقي يتم إعادة تسخينه إلى درجة حرارة 600°C ومن بعد يتمدد خلال توربينة المرحلة الثانية لضغط مكثف مقداره 0.035bar. للحسابات الأولية افترض أنّ الدورة الفعلية لها نسبة كفاءة مقدارها 70%، وتكون الكفاءة الميكانيكية والكهربائية هي 95%. أحسب أقصى معدّل سريان إلى الغلاية بالـ kg/h.

الحل:

$$\begin{aligned} P_{o/p} &= 200 \text{ MW} = 200 \times 10^6 \text{ W} \\ &= \underline{\underline{200 \times 10^3 \text{ kW}}} \end{aligned}$$



من جداول البخار المحمّص عند ضغط 170bar ودرجة حرارة 600°C،

$$h_1 = 3564 \text{ kJ/kg}$$

$$s_1 = 6.603 \text{ kJ/kgK} = s_2$$

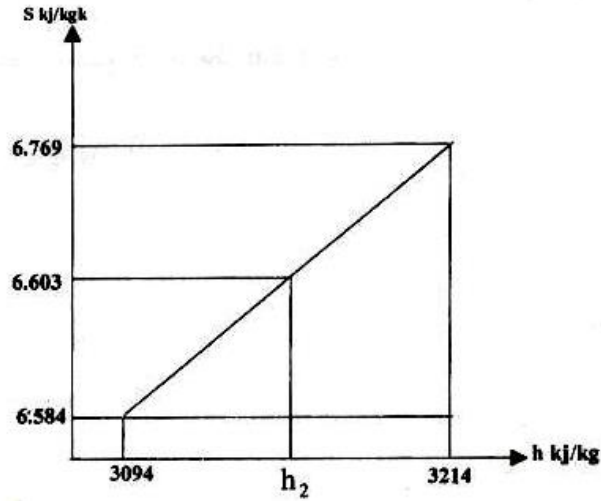
من جداول البخار المشبع عند ضغط 40bar،

$$s_g = 6.07 \text{ kJ/kgK} < s_2$$

عليه سيكون البخار محمّصاً عند الحالة (2).

من جداول البخار المحمّص عند ضغط 40bar وقصور حراري 6.603kJ/kgK وباستخدام

طريقة الاستكمال،



$$h_2 = 3094 + \left(\frac{6.603 - 6.584}{6.769 - 6.584} \right) \times (3214 - 3094) = \underline{3106.3 \text{ kJ/kg}}$$

لإيجاد قيمة h_3 ، من جداول البخار المحمّص عند الضغط 40bar ودرجة حرارة 600°C ،

$$h_3 = 3674 \text{ kJ/kg}$$

$$s_3 = s_4 = 7.368 \text{ kJ/kgK}$$

من جداول البخار عند ضغط 0.035bar،

$$s_g = 8.521 \text{ kJ/kgK} > s_4$$

سيكون البخار رطباً عند الحالة (4)،

$$s_4 = sf_4 + x_4 sfg_4$$

$$7.368 = 0.391 + x_4 (8.13)$$

$$\therefore x_4 = \frac{7.368 - 0.391}{8.13} = \underline{0.86}$$

$$\therefore h_4 = hf_4 + x_4 hfg_4$$

$$= 112 + 0.86 \times 2438 = \underline{2208.7 \text{ kJ/kg}}$$

أيضاً من جداول البخار المشبع عند ضغط 0.035bar،

$$h_5 = h_f = \underline{112} \text{ kJ/kg}$$

شغل مضخة التغذية الأولى،

$$\begin{aligned} W_{56} &= h_6 - h_5 = v(p_6 - p_5) \\ &= \frac{0.001(40 - 0.035) \times 10^5}{10^3} = 4 \text{ kJ/kg} \end{aligned}$$

$$\therefore h_6 = W_{56} + h_5 = 4 + 112 = 116 \text{ kJ/kg}$$

من جداول البخار المشبع عند ضغط 40bar،

$$h_7 = h_f = 1087 \text{ kJ/kg}$$

شغل مضخة التغذية الثانية،

$$\begin{aligned} W_7 &= h_8 - h_7 = v(p_8 - p_7) \\ &= \frac{0.001(170 - 40) \times 10^5}{10^3} = 13 \text{ kJ/kg} \end{aligned}$$

$$h_8 = W_{78} + h_7 = 13 + 1087 = \underline{1100} \text{ kJ/kg}$$

$$\eta_R = \frac{W_{net \ o/p}}{Q_{sup.}}$$

$$W_{net \ o/p} = W_{12} + W_{34} - (W_{56} - W_{78})$$

$$= 1(h_1 - h_2) + 0.85(h_3 - h_4) - 0.85(h_6 - h_5) - 1(h_8 - h_7)$$

$$= 1(3564 - 3106.3) + 0.85(3674 - 2208.7) - 0.85 \times 4 - 1(13) = \underline{1686} \text{ kJ/kg}$$

$$Q_{sup.} = 1(h_1 - h_8) + 0.85(h_3 - h_2)$$

$$= 1(3564 - 1100) + 0.85(3674 - 3106.3)$$

$$= 2946.55 \text{ kJ/kg}$$

$$\eta_g = \frac{1686.8}{2946.55} = 0.572 \text{ or } \underline{57.2\%}$$

$$0.7 = \frac{\text{كفاءة الدورة الفعلية}}{\text{كفاءة دورة رانكن}} = \text{نسبة الكفاءة}$$

$$\text{كفاءة الدورة الفعلية } \eta_{act.} = 0.7 \times \eta_R = 0.7 \times 0.572 = 0.4 \text{ أو } 40\%$$

صافي الشغل الفعلي في الدورة،

$$W_{net o/p}^{act} = \eta \cdot Q_{sup p} = 0.4 \times 2964.55 = 1178.6 \text{ kJ/kg}$$

$$\therefore ssc = \frac{3600}{act.W_{net o/p}} = \frac{3600}{1178.6} = 3.054 \text{ kg/kWh}$$

$$\text{معطي } \eta_{mech..elec.} = 0.95$$

$$\therefore P_{i/p} = \frac{P_{o/p}}{\eta_{mech..elect}} = \frac{200 \times 10^3}{0.95} = 210.53 \times 10^3 \text{ kW}$$

بالتحليل البعدي، معدّل السريان إلى الغلاية \dot{m} ،

$$\dot{m} = P_{o/p} \times ssc = \text{kW} \times \frac{\text{kg}}{\text{kWh}} = \text{kg/h}$$

$$= 210.53 \times 10^3 \times 3.054 = 643 \times 10^3 \text{ kg/h}$$

$$= \underline{\underline{643000 \text{ kg/h}}}$$

3.4 مسائل: (Problems)

1/ يتم إمداد بخار لتوربينة ذات مرحلتين عند 40bar و 350°C، يتمدد البخار في التوربينة

الأولي حتى يصبح جافاً مشبعاً عندها يتم إعادة تسخينه إلى 350°C ومن ثم يتمدد خلال

توربينة المرحلة الثانية.

يكون ضغط المكثف 0.035bar. أحسب شغل الخرج والحرارة المكتسبة لكل kg من البخار

للمحطة، مفترضاً إجراءات مثالية ومتجاهلاً شغل مضخة التغذية. أحسب أيضاً الإستهلاك

النوعي للبخار وكفاءة الدورة.

Ans. (1290 kj; 3362kj; 2.79 kg/kWh; 38.4%)

2/ إذا كانت لإجراءات التمدد في التوربينات للمسألة (1) كفاءات ثابتة قصور حراري

مقدارها 84% و 78% على الترتيب، في المرحلتين الأولى والثانية.

أحسب شغل الخرج والحرارة المكتسبة لكل kg من البخار، الكفاءة الحرارية والاستهلاك

النوعي للبخار. قارن الكفاءات واستهلاكات الوقود النوعية المتحصل عليها من المسائل (1)

و(2). قارن أيضاً رطوبة البخار المغادر للتوربينة في كل حالة.

Ans. (1026kj ; 3311kj ; 31.1% ; 3.51kg/kWh)

3/ توربينة بخار تعمل على دورة استرجاع بسيطة. يتم إمداد بخار جاف مشبّع عند

40bar، ويستنفذ إلى مكثف عند 0.07bar. يتم ضخ البخار المتكثف إلى ضغط 3.5bar

الذي عنده يتم خلطه مع البخار المستنزف من التوربينة عند 3.5bar. يتم من بعد ضخ

الماء الناتج الذي يكون عند درجة حرارة التشبع إلى الغلاية. للدورة المثالية متجاهلاً شغل

مضخة التغذية، أحسب،

a/ مقدار البخار المستنزف المطلوب لكل kg من بخار الإمداد.

b/ الكفاءة الحرارية للمحطة.

c/ الاستهلاك النوعي للبخار.

Ans. (0.1906; 37%; 4.39kg/kWh)

4/ يتم إمداد بخار لتوربينة ذات مرحلتين عند 40bar و 500°C. يتمدد البخار في المرحلة

الأولى بإجراء ثابت القصور الحراري إلى ضغط 3.0bar الذي يتم عنده استخلاص

2500kg/h من البخار لشغل العملية. يتم إعادة تسخين المتبقي إلى 500°C ومن بعد يتمدد

بإجراء ثابت القصور الحراري إلى 0.06bar. يتطلب أن تكون قدرة الناتج الثانوي للمحطة

6000kW أحسب مقدار البخار المطلوب من الغلاية، والحرارة المكتسبة بالـ kW.
تجاهل شغل مضخة التغذية، وافترض أنّ البخار المستنزف يعود عند درجة حرارة التشبع
ليختلط أدبياتياً مع البخار المتكثف من المكثف.

Ans. (15,000 kg/h; 15620 kW)

الفصل الرابع

التوربينات الغازية

(Gas Turbines)

4.1 مدخل (Introduction):

تستخدم التوربينات الغازية عموماً في أيامنا الحاضرة في مجال صناعة الطائرات، ويرجع الفضل لاختراع أول محرك نفاث للعالم سير فرانك ويتل (Sir Frank Whittle) قبيل اندلاع الحرب العالمية الثانية (1939-1945)، حيث تطورت صناعة وحدة التوربينة الغازية بصورة سريعة ومذهلة. تستخدم وحدات التوربينات الغازية الضخمة في توليد القدرة الكهربائية وفي محركات الدفع البحري ولكن دائماً ما يكون استخدام محركات الزيت (oil engines) والتوربينات البخارية (steam turbines) أكثر تكراراً في مثل هذه المجالات.

نقص الكفاءة في إجراءات الانضغاط والتمدد يكون أكبر في الوحدات التوربينية الصغيرة (small turbine units) ولذلك من الضروري استخدام مبادل حراري (heat exchanger) لتحسين الكفاءة الحرارية للتوربينات الغازية حتى تستطيع منافسة محركات الزيت الصغيرة والمحركات البترولية من الناحية الفنية و الاقتصادية.

التوربينة الغازية لـ (Halz Warth) والتي تم بناؤها سنة 1905م تعمل باحتراق ثابت الحجم، وهذا يتطلب استخدام صمامات وبالتالي تشغيل متقطع للمحطة.

استخدام احتراق ثابت الضغط مع ضاغط دوّار يتم إدارته بواسطة توربينة دوّارة مركّبة في عمود مشترك يُعطى توافقاً مثالياً لسريان كتلة مستقر في مدى تشغيل واسع.

4.2 الدورة العملية للتوربينة الغازية (The Practical Gas Turbine Cycle):

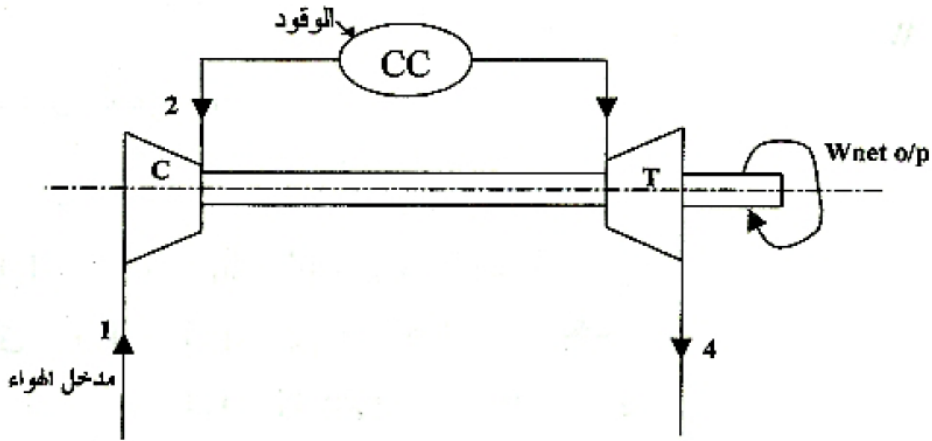
وحدة التوربينة الغازية الأساسية الأكثر استخداماً هي تلك التي تعمل بدورة مفتوحة الحلقة وتتكون من ضاغط دوّار وتوربينة مركبّان في عمود مشترك كما هو واضح في الشكل التخطيطي أدناه (شكل رقم (4.1)). يتم سحب الهواء إلى الضاغط C وبعد الانضغاط يُمرّر إلى غرفة الاحتراق CC. يتم إمداد الطاقة في غرفة الاحتراق برش الوقود في جدول من الهواء، ونتيجة لذلك تتمدد الغازات الساخنة الناتجة من الاحتراق خلال التوربينة T، إلى الهواء الجوى (atmosphere). ولتحقيق صافي شغل خرج من الوحدة، يجب أن يكون شغل الخرج الإجمالي الناتج من التوربينة أكبر من الشغل المطلوب لتشغيل الضاغط وتجاوز الفقد الميكانيكي في الإدارة.

يمكن استخدام إما ضاغط طرد مركزي أو ضاغط سريان محوري، حيث يكون إجراء الانضغاط لا انعكاسي ولكنه تقريباً أديباتي (كاظم للحرارة) (adiabatic process) وبالمثل فإنّ إجراء التمدد في التوربينة يكون لا انعكاسياً ولكنه كاظم للحرارة .

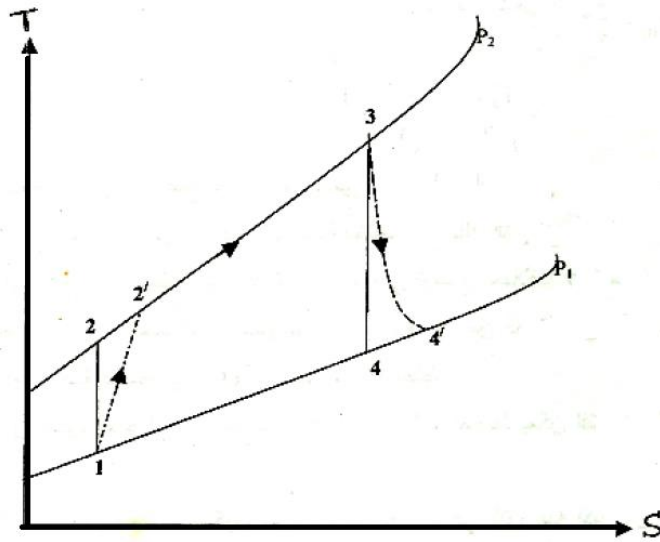
نتيجة لهذه اللا انعكاسية (irreversibility) فإننا نحتاج لشغل أكبر لإجراء الانضغاط لنسبة ضغط معطاة، ولشغل أقل لإجراء التمدد. لتحسين تصميم الضاغط والتوربينة يجب بقدر الإمكان قطع أو تقليل اللا انعكاسية التي تُبْطِئ تطوير وحدة التوربينة الغازية.

لا يمكن مقارنة التوربينة الغازية مفتوحة الحلقة مباشرة مع دورة الضغط الثابت المثالي فالدورة الفعلية تشتمل على تفاعل كيميائي في غرفة الاحتراق يتسبب في نواتج ذات درجة حرارة عالية متباينة كيميائياً عن المواد المتفاعلة. أيضاً لا يكون هنالك تبادل للطاقة مع البيئة المحيطة أثناء الاحتراق ونتيجة لذلك فسيكون هنالك انخفاض تدريجي في الطاقة الكيميائية مع زيادة مقابلة في المحتوى الحراري لمائع التشغيل.

سوف لن يتم تناول تفاعل الاحتراق بالتفصيل في هذا المنعطف وسيتم تبسيطه بافتراض أن الطاقة الكيميائية المتحررة من الاحتراق تساوي انتقال الحرارة عند ضغط ثابت لمائع التشغيل ثابت متوسط الحرارة النوعية. هذا التقارب البسيط يسمح بمقارنة الإجراء الفعلي مع المثالي وبإمكانية تمثيله في مخطط T-S كما موضَّح في الشكل رقم (4.2) أدناه.



شكل (4.1) مخطط وظيفي لدورة وحدة توربينة غازية أساسية



شكل (4.2) مخطط درجة الحرارة ضد القصور الحراري

(T-S) لدورة وحدة توربينة غازية أساسية

الخط 1-2' يُمثّل انضغاطاً لا انعكاسياً كاظم للحرارة في الضاغط (irreversible adiabatic)
(compression).

الخط 2'-3 يُمثّل إمداد حراري ثابت الضغط في غرفة الاحتراق (heat supply at constant
(pressure).

الخط 3-4' يُمثّل تمدد لا انعكاسي كاظم للحرارة في التوربينة (irreversible adiabatic)
(expansion).

الإجراء 1-2 يُمثّل انضغاط مثالي ثابت القصور الحراري بين الضغوط P_2 و P_1 (isentropic)
(compression).

وبالمثل فإن الأجراء 3-4 يُمثّل تمدد مثالي ثابت القصور الحراري بين الضغوط P_1 و P_2
(isentropic expansion).

سيتم افتراض أن التغير في طاقة الحركة في النقاط المختلفة للدورة صغير جداً بحيث يمكن تجاهله
مقارنة بتغير المحتوى الحراري كما هو واضح في معادلة طاقة السريان للحالة المستقرة الموضحة
أدناه:

$$h_1 + \frac{C_1^2}{2} + Z_1 g + Q = h_2 + \frac{C_2^2}{2} + Z_2 g + W$$

بتطبيق معادلة طاقة السريان للحالة المستقرة (Steady State Flow Energy Equation) أو

(S.S.F.E.E) لكل جزء من الدورة لكل Kg نحصل على:

$$h_1 + Q = h_2 + W$$

$$h = c_p dt \quad ، \quad h \text{ ، والمحتوي الحراري النوعي،}$$

بالتالي،

$$\text{للضاغط:} \quad W_{i/p} = h'_2 - h_1 = c_p (T'_2 - T_1) \quad ، \quad \text{شغل الدخل}$$

لغرفة الاحتراق: $Q_{supp} = c_p (T_3 - T'_2)$ ، الحرارة المكتسبة

للتوربين: $W_{o/p} = c_p (T_3 - T'_4)$ ، شغل الخرج

بالتالي،

صافي شغل الخرج = شغل الخرج للتوربين - شغل الدخل للضاغط

صافي شغل الخرج ، $W_{o/p} = c_p (T_3 - T'_4) - c_p (T'_2 - T_1)$

الكفاءة الحرارية ، $\eta_{th} = \frac{\text{صافي شغل الخرج}}{\text{الحرارة المكتسبة}} = \frac{W_{o/p}}{Q_{supp}}$

$$= \frac{c_p (T_3 - T'_4) - c_p (T'_2 - T_1)}{c_p (T_3 - T'_2)}$$

تتغير الحرارة النوعية لغاز حقيقي بتغير درجة الحرارة. في الدورة المفتوحة، فإن الحرارة النوعية للغازات في غرفة الاحتراق وفي التوربينة تختلف عن تلك التي في الضاغط وذلك لأنه تمت إضافة وقود وحدث تغير كيميائي. يمكن استخدام المنحنيات التي توضح اختلاف الحرارة النوعية c_p مع درجة الحرارة، T ونسبة الهواء إلى الوقود، ويمكن إيجاد القيمة المتوسطة لـ c_p و γ . من المعتاد في تطبيقات التوربينات الغازية افتراض القيم المتوسطة الثابتة لـ c_p و γ لإجراء الانضغاط. لإجراء الاحتراق يمكن استخدام المخططات المناسبة، للحساب المبسط يمكن افتراض القيمة المتوسطة لـ c_p .

في التوربينة الغازية مفتوحة الحلقة يكون سريان كتلة الغازات في التوربينة اكبر من ذلك في الضاغط وذلك نتيجة لتواجد كتلة الوقود المحترق مع الهواء المسحوب. يمكن تجاهل كتلة الوقود وذلك لأن النسب المستخدمة للهواء إلي الوقود كبيرة. أيضاً يتم في حالات كثيرة استنزاف هواء من الضاغط لأغراض التسخين والتبريد، حيث يستخدم الهواء المستنزف لمنع تجمد الوقود وفي تكييف الكابينة في حالة طائرات عند ارتفاع عالٍ. هذه الكمية من الهواء المستنزف تكون مساوية تقريباً لكمية الوقود التي يتم حقنها في غرفة الاحتراق. يتم تعريف كفاءة ثابت القصور الحراري للضاغط

كنسبة شغل الدخل المطلوب في الانضغاط ثابت القصور الحراري (i.e. الشغل المثالي) بين p_1 , p_2 والشغل الفعلي المطلوب.

بتجاهل التغير في الحركة،

كفاءة ثابت القصور الحراري للضاغط،

$$\eta_{isen,C} = \frac{c_p(T_2 - T_1)}{c_p(T'_2 - T_1)} = \frac{T_2 - T_1}{T'_2 - T_1}$$

وبالمثل يمكن تعريف كفاءة ثابت القصور الحراري للتوربين كنسبة شغل الخرج الفعلي إلي شغل

الخرج ثابت القصور الحراري بين p_1 و p_2 .

بتجاهل التغير في طاقة الحركة،

كفاءة ثابت القصور الحراري للتوربين،

$$\eta_{isen,T} = \frac{c_p(T_3 - T'_4)}{c_p(T_3 - T_4)} = \frac{T_3 - T'_4}{T_3 - T_4}$$

4.3 أمثلة محلولة في الدورة الأساسية للتوربينة الغازية:

(Solved Examples in Basic Cycle of the Gas Turbine)

مثال (1): حساب قدرة الخرج بالكيلو واط لمولد كهربائي معشَّق مع توربينة غازية

وحدة توربينة غازية لها نسبة ضغط مقدارها 6/1 ودرجة حرارة قصوى قدرها 600°C تكون كفاءة

ثابت القصور الحراري للضاغط والتوربينة هي علي الترتيب 0.82 و 0.85، أحسب قدرة الخرج

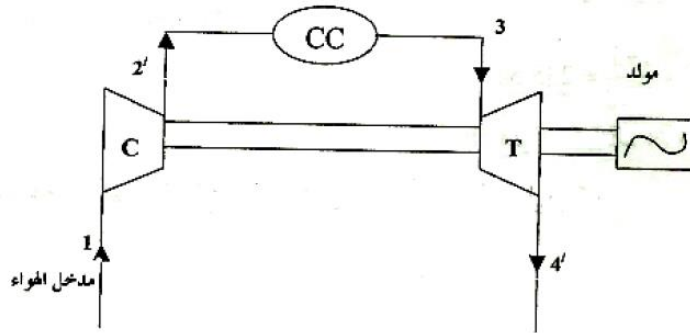
بالكيلو واط لمولد كهربائي معشَّق مع التوربينة عندما يدخل الهواء إلي الضاغط عند 15°C بمعدل

سريان مقداره 15Kg/s . خذ $c_p = 1.005\text{ kJ/kgK}$ و $\gamma = 1.4$ لإجراء الانضغاط، وخذ

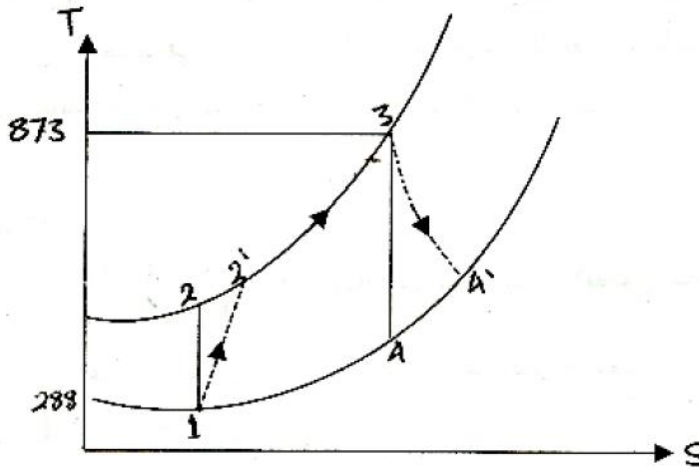
$c_p = 1.11\text{ kJ/kg K}$ و $\gamma = 1.333$ لإجراء التمدد.

الحل:

الشكلان (4.3) و(4.4) يوضحان المخطط الوظيفي للدورة الأساسية للتوربينة الغازية ومخطط درجة الحرارة ضد القصور الحراري (T-S) للتوربينة الغازية.



شكل (4.3) المخطط الوظيفي للدورة الأساسية للتوربينة الغازية



شكل (4.4) مخطط درجة الحرارة ضد القصور الحراري للتوربينة الغازية

لحساب صافي شغل الخرج، من الضروري حساب درجات الحرارة T'_2 و T'_4 . لحساب T'_2 يجب في البداية حساب T_2 وبعدها استخدام معادلة كفاءة ثابت القصور الحراري.

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{(\gamma-1)/\gamma} \quad \text{للإجراء ثابت القصور الحراري للضاغط:}$$

$$\begin{aligned} \therefore T_2 &= T_1 \times \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{(\gamma-1)/\gamma} \\ &= 288 \times 6^{0.4/1.4} = 288 \times 1.67 = \underline{481\text{K}} \end{aligned}$$

$$\text{كفاءة ثابت القصور الحراري للضاغط ، } \eta_{isen,C} = \frac{T_2 - T_1}{T'_2 - T_1} = \frac{481 - 288}{T'_2 - 288} = \underline{0.82}$$

$$T'_2 - 288 = \frac{193}{0.82} = 235.5 K$$

$$\therefore T'_2 = 288 + 235.5 = 523.5 K$$

بالمثل، بالنسبة للتوربينة، للإجراء ثابت القصور الحراري:

$$\frac{T_3}{T_4} = \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{(\gamma-1)/\gamma}$$

$$\therefore T_4 = \frac{T_3}{\left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{(\gamma-1)/\gamma}} = \frac{873}{6^{0.333/1.333}} = \frac{873}{1.564} = 558 K$$

$$\eta_{isen,T} = \frac{T_3 - T'_4}{T_3 - T_4} = \frac{873 - T'_4}{873 - 558} = 0.85$$

$$873 - T'_4 = 315 \times 0.85 = 268 k$$

$$\therefore T'_4 = 873 - 268 = 605 K$$

$$\text{شغل الدخل الضاغط} , w_{i/p} = c_{p_a} (T'_2 - T_1) = 1.005 (523.5 - 288)$$

$$= 1.005 \times 235.5 = 236.2 k j / kg$$

يعطى شغل الخرج للتوربين كآتي:

$$w_{o/p} = c_{p_g} (T_3 - T'_4) = 1.11(873 - 605) = 1.11 \times 268 = 297.5 k j / kg$$

$$\text{صافي شغل الخرج} , W_{net o/p} = w_{o/p} - w_{i/p} = 297.5 - 236.2 = 61.3 k j / kg$$

$$\text{القدرة بالكيلو واط} , P_{o/p} = W_{net o/p} \times \dot{m} = 61.3 \times 15 = 920 k j / s = 920 kw$$

مثال (2): حساب الكفاءة الحرارية ونسبة الشغل لتوربينة غازية

أحسب الكفاءة الحرارية ونسبة الشغل للمحطة في المثال (1)، بافتراض أن c_p لإجراء الاحتراق

تساوي 1.11 kJ / Kg K .

الحل:

$$\eta_{th} = \frac{W_{net o/p}}{\text{الحرارة المكتسبة}} , \text{ الكفاءة الحرارية}$$

الحرارة المكتسبة ، $Q_{\text{supp}} = c_{p_g} (T_3 - T'_2) = 1.11(873 - 523.5) = 1.11 \times 349.5 = 388 \text{ kJ/kg}$

$$\therefore \eta_{th} = \frac{61.3}{388} = 0.158 \text{ } \underline{\underline{15.8\%}} \text{ أو } 0.158$$

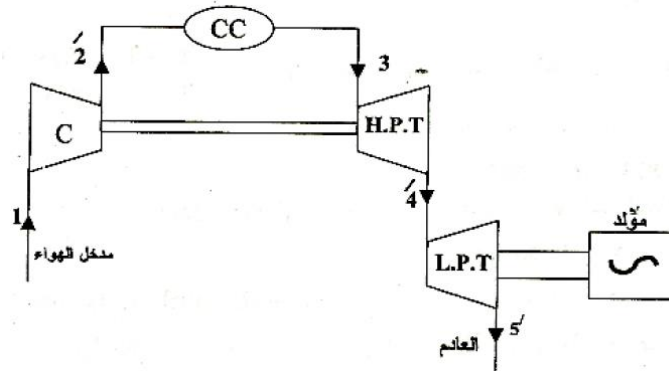
من تعريف الشغل،

$$WR = \frac{W_{\text{net o/p}}}{W_{\text{gross o/p}}} = \frac{61.3}{297.5} = \underline{\underline{0.206}}$$

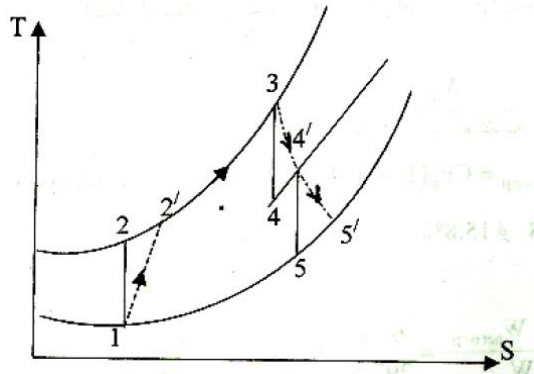
نسبة الشغل ،

في المثالين (1) و (2) تم ترتيب التوربينة لإدارة الضاغط ولتوليد صافي قدرة خرج. في بعض الأحيان من الملائم استخدام توربينتين منفصلتين، إحداهما تُدير الضاغط والأخرى تُعطي قدرة الخرج. التوربينة الأولى أو التوربينة ذات الضغط العالي تسمى بتوربينة الضاغط، بينما التوربينة الثانية أو التوربينة ذات الضغط المنخفض تسمى بتوربينة القدرة.

يتم توضيح الترتيبية ومخطط (T-S) في الشكل رقم (4.5) و (4.6) على الترتيب.



شكل (4.5) مخطط وظيفي لتوربينتان منفصلتان إحداهما تُدير الضاغط والأخرى تدير المولد



شكل (4.6) مخطط درجة الحرارة ضد القصور الحراري لتوربينتان منفصلتان إحداهما تدير الضاغط والأخرى تدير المولد

افتراض أن لكل توربينة كفاءة ثابتة قصور حراري خاصة بها، وتجاهل التغير في طاقة السرعة،

شغل الدخل إلي الضاغط = شغل الخرج من توربينة الضغط العالي

$$c_{P_g} (T_3 - T'_4) = c_{P_a} (T'_2 - T_1)$$

حيث c_{P_g} = سعة الحرارة النوعية بثبوت الضغط للغازات في التوربينة.

c_{P_a} = سعة الحرارة النوعية بثبوت الضغط للهواء في الضاغط.

عليه، فإن صافي شغل الخرج يعطي بتوربينة الضغط المنخفض كالأتي:

$$\text{i.e. } W_{\text{net o/p}} = C_{P_g} (T'_4 - T'_5)$$

مثال(3): حساب الضغط، درجة الحرارة للغازات الداخلة إلى توربينة القدرة، صافي القدرة المتولدة

من الوحدة، معدّل السريان، نسبة الشغل، والكفاءة الحرارية للوحدة

وحدة توربينة غازية تأخذ الهواء عند 17°C و 1.01bar ونسبة ضغط $8/1$. يُدار الضاغط بواسطة

توربينة ضغط عالي وتدير توربينة الضغط المنخفض عمود قدرة منفصل. تكون كفاءات ثابتة

القصور الحراري للضاغط، وتوربينة الضغط العالي وتوربينة الضغط المنخفض هي 0.8 ، 0.85

و 0.83 ، علي الترتيب. احسب الضغط ودرجة الحرارة للغازات الداخلة لتوربينة القدرة، صافي القدرة

المتولدة للوحدة لكل kg/s من معدّل السريان، نسبة الشغل والكفاءة الحرارية للوحدة. تكون درجة

الحرارة القصوى في الدورة هي 650°C . لإجراء الانضغاط خذ $c_p = 1.005 \text{ kJ/kgK}$

و $\gamma = 1.4$. وإجراء الاحتراق، وإجراء التمدد خذ $c_p = 1.15 \text{ kJ/kgK}$ و $\gamma = 1.333$.

تجاهل كتلة الوقود.

الحل:

تكون الوحدة كما موضحة في الأشكال (4.5) و (4.6) أعلاه.

للإجراء ثابت القصور الحراري في الانضغاط:

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{(\gamma-1)/\gamma}$$

$$i.e. T_2 = \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{(\gamma-1)/\gamma} T_1 = 8^{0.4/1.4} \times 290 = \underline{525 K}$$

$$\text{والآن، فإنَّ شغل الخرج من توربينة الضغط العالي (H.P.T) يجب أن يكون كافياً لإدارة الضاغط.}$$

$$\eta_{isen}, C = \frac{T_2 - T_1}{T'_2 - T_1} = \frac{525 - 290}{T'_2 - 290} = 0.8$$

$$\therefore T'_2 - 290 = \frac{235}{0.8}$$

$$i.e. T'_2 = 290 + 494 = \underline{584 K}$$

$$\text{شغل الدخل للضاغط} = C_{p_a} (T'_2 - T_1) = 1.005(584 - 290)$$

$$= 1.005 \times 294 = 295.5 \text{ Kj / kg}$$

والآن، فإنَّ شغل الخرج من توربينة الضغط العالي (H.P.T) يجب أن يكون كافياً لإدارة الضاغط.

$$\text{شغل الخرج من توربينة الضغط العالي (H.P.T)} = C_{p_g} (T_3 - T'_4) = \underline{295.5 \text{ kj / kg}}$$

$$\therefore T_3 - T'_4 = \frac{295.5}{1.15} = \underline{257 K}$$

$$\therefore T'_4 = T_3 - 257 = 923 - 257 = \underline{666 K}$$

$$\eta_{H.P.T} = \frac{T_3 - T'_4}{T_3 - T_4} = \frac{923 - 666}{923 - T_4} = 0.85$$

$$923 - T_4 = \frac{257}{0.85} = \underline{302.5 K}$$

$$\therefore T_4 = 923 - 302.5 = \underline{620.5 K}$$

للإجراء ثابت القصور الحراري في توربينة الضغط العالي:

$$\frac{T_3}{T_4} = \left(\frac{P_3}{P_4} \right)^{(\gamma-1)/\gamma}$$

$$\text{أو } \frac{P_3}{P_4} = \left(\frac{T_3}{T_4} \right)^{\gamma/(\gamma-1)} = \left(\frac{923}{620.5} \right)^{1.333/0.333} = 1.488^4 = \underline{4.9}$$

$$\therefore P_4 = \frac{P_3}{4.9} = \frac{8 \times 1.01}{4.9} = \underline{1.651 \text{ bar}}$$

عليه، فإنَّ الضغط ودرجة الحرارة عند مدخل توربينة الضغط المنخفض (L.P.T) هي 1.651 bar

$$\text{و } (t'_4 = 666 - 273 = 393^\circ\text{C i.e.) } 393^\circ\text{C}$$

، لإيجاد قدرة الخرج من الضروري حساب T'_5 ،

نسبة الضغط P_4 / P_5 يمكن إيجادها كالاتي،

$$\frac{P_4}{P_5} = \frac{P_4}{P_3} \times \frac{P_3}{P_5}$$

بما أن:

$$P_3 = P_2$$

$$P_5 = P_1$$

و

فإنَّ المعادلة عاليه يمكن كتابتها كالاتي،

$$\frac{P_4}{P_5} = \frac{P_4}{P_3} \times \frac{P_2}{P_1}$$

$$\therefore \frac{P_4}{P_5} = \frac{1}{4.9} \times 8 = \frac{8}{4.9} = 1.63$$

للإجراء ثابت القصور الحراري في توربينة الضغط المنخفض،

$$\frac{T'_4}{T_5} = \left(\frac{P_4}{P_5} \right)^{(\gamma-1)/\gamma} = 1.63^{0.333/1.333} = 1.131,$$

$$\therefore \frac{T'_4}{T_5} = 1.131, \therefore T_5 = \frac{T'_4}{1.131} = \frac{666}{1.131} = 588K$$

$$\eta_{isen, LPT} = \frac{T'_4 - T'_5}{T'_4 - T_5} = 0.83$$

$$T'_4 - T'_5 = 0.83(666 - 588) = 0.83 \times 78 = 64.8K$$

شغل الخرج من توربينة الضغط المنخفض،

$$W_{o/p}(LPT) = C_p (T'_4 - T'_5) = 1.15 \times 64.8 = 74.5 \text{ k j/kg}$$

$$\text{صافي قدرة الخرج} = 74.5 \times 1 = 74.5 \text{ kw}$$

$$\text{نسبة الشغل ، } WR = \frac{W_{net o/p}}{W_{gross o/p}} = \frac{74.5}{74.5 + 295.5} = \frac{74.5}{370} = 0.201$$

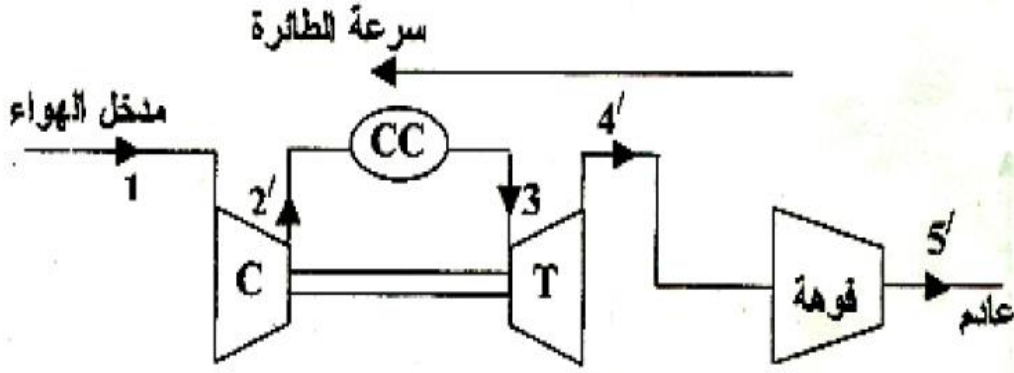
$$\text{الحرارة المكتسبة ، } Q_{sup p} = C_p (T_3 - T'_2) = 1.15(923 - 584)$$

$$= 1.15 \times 339 = 390 \text{ kJ/kg}$$

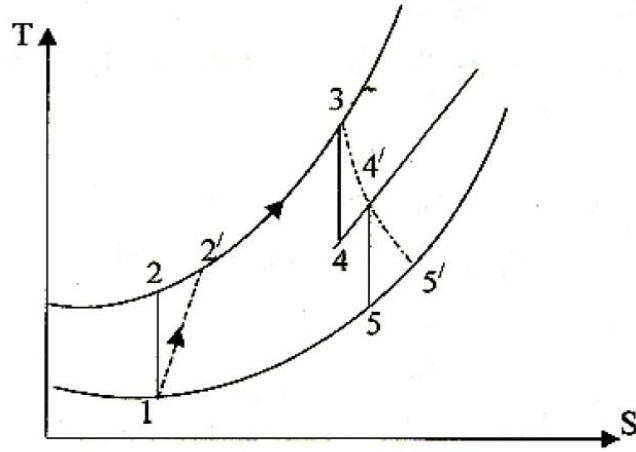
$$\text{الكفاءة الحرارية ، } \eta_{th} = \frac{W_{net \text{ o/p}}}{Q_{sup \text{ p}}} = \frac{74.5}{390} = \underline{\underline{0.191}} \text{ أو } \underline{\underline{19.1\%}}$$

في المحركات النفاثة (Jet engines) فإن فوهة الدفع تحل محل توربينة الضغط المنخفض كما هو واضح تخطيطياً في الشكل رقم (4.7). يتم توضيح الدورة علي مخطط T-S في الشكل رقم (4.8)، والذي يُلاحظ أنه متطابق مع الشكل (4.6). تستمد الطائرة قدرتها بالدفع الرد فعلي لنفث الغازات المغادرة للفوهة، ويتم الحصول علي هذه السرعة العالية للنفث علي حساب هبوط المحتوي الحراري من 4' إلي 5'. وتُولد التوربينة شغل يكفي فقط لإدارة الضاغط وتجاوز الفقدوات الميكانيكية. في محرك الدفع التوربيني، تدير التوربينة الضاغط وأيضا اللولب الهوائي (air screw) أو عمود الدفع (propeller shaft)، كما موضَّح في الأشكال (4.9) و (4.10). يُعطي صافي شغل الخرج المتاح لإدارة عمود الدفع ب،

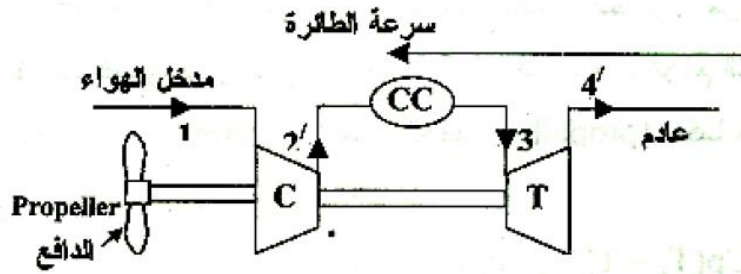
$$W_{net} = C_p(T_3 - T'_4) - C_p(T'_2 - T_1) \text{ ، صافي الشغل (بتجاهل الفقدوات الميكانيكية).}$$



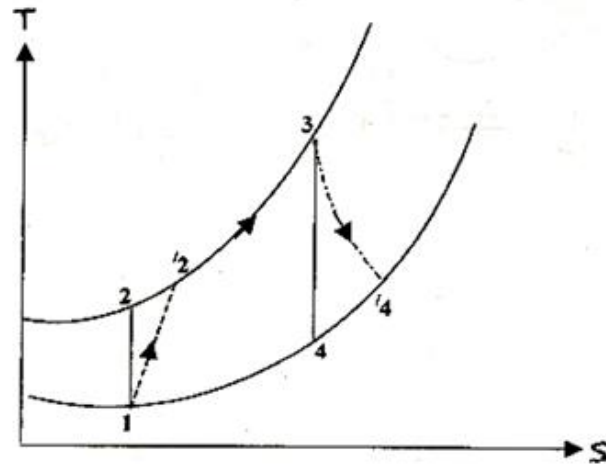
شكل (4.7) فوهة الدفع تحل محل توربينة الضغط المنخفض في طائرة نفاثة



شكل (4.8) مخطط درجة الحرارة ضد القصور الحراري لطائرة نفاثة



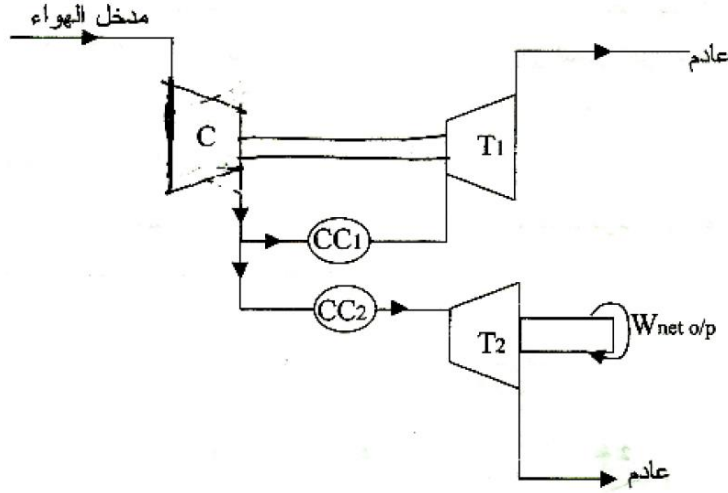
شكل (4.9) محرك دفع توربيني لطائرة تدير فيه التوربينة الضاغط وعمود الدفع



شكل (4.10) مخطط درجة الحرارة ضد القصور الحراري لمحرك دفع توربيني

عملياً فإن هنالك دفع نفثي صغير يتم إنتاجه في طائرات الدفع التوربيني. في بعض الوحدات الصناعية ووحدات التوربينة الغازية البحرية، فإنَّ سريان الهواء ينشطر إلى جدولين بعد اكتمال إجراء الانضغاط. يُمرَّر بعض الهواء إلى غرفة الاحتراق التي تمد الغازات الساخنة إلى التوربينة

التي تدير الضاغط، بينما يُمرَّر باقي الهواء إلى غرفة الاحتراق الثانية ومنها إلى توربينة القدرة. يتم توضيح المنظومة مخططياً في الشكل رقم (4.11) أدناه. وتسمى هذه المنظومة بوحدة السريان المتوازي (parallel flow unit).



شكل (4.11) وحدة السريان المتوازي

في هذه المنظومة فإن كل توربينة تُمدِّد الغازات التي تستقبلها خلال نسبة الضغط الكاملة (full pressure ratio). بما أنَّ توربينات السريان المتوازي ليست شائعة، عليه، فإننا لن نغوص في تفاصيلها.

4.4 تعديلات الدورة الأساسية للتوربينة الغازية

(Modifications to the Basic Cycle of the Gas Turbine)

1. مدخل (Introduction):

يتضح من الأمثلة (1)، (2) و (3) في الفقرة 4.3 أنَّ نسبة الشغل وكفاءة الدورة للدورة الأساسية للتوربينة الغازية تكون صغيرة جداً. يمكن تحسين نسبة الشغل وكفاءة الدورة بزيادة كفاءات ثابت القصور الحراري (isentropic efficiencies) للضاغط والتوربينة بإعادة تصميم وتصنيع ريش كلٍّ من الضاغط والتوربينة.

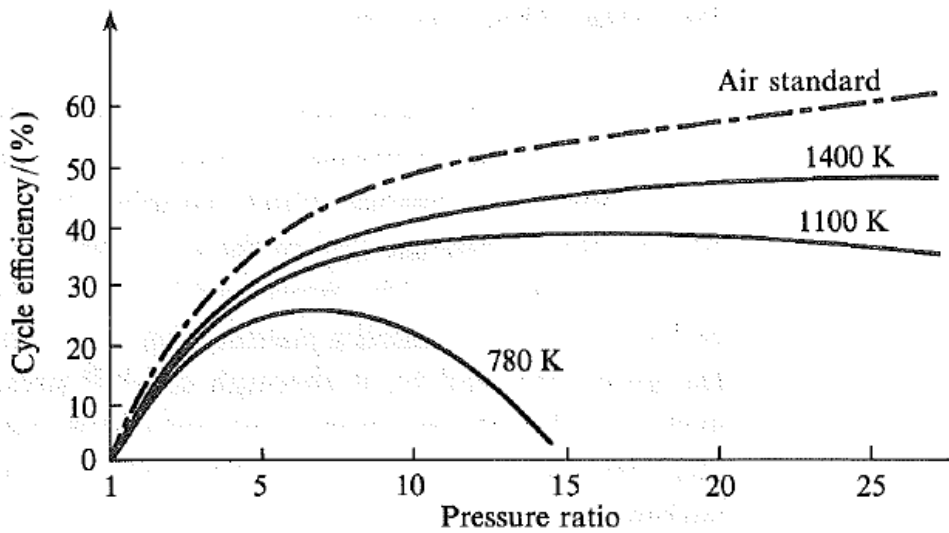
في دورة عملية بلا انعكاسيات في إجراءات الانضغاط والتمدد تعتمد كفاءة الدورة على درجات حرارة الدورة القصوى وأيضاً على نسبة الضغط. لقيم ثابتة لكفاءات ثابت القصور الحراري للضاغط والتوربينة يمكن رسم كفاءة الدورة ضد نسبة الضغط لقيم متباينة لدرجة حرارة قصوى. هذا يتم توضيحه في الشكل (4.12) أدناه، لدورة تكون فيها كفاءة ثابت القصور الحراري للضاغط مساوية لـ 0.89 ، وتكون كفاءة ثابت القصور الحراري للتوربينة مساوية لـ 0.92 ، ودرجة حرارة دخول الهواء 20°C . يتم توضيح الكفاءة الحرارية للدورة المعيارية المثالية للهواء بخطوط سلسلية.

يتم إعطاء كفاءة دورة الضغط الثابت المثالية بالمعادلة:

$$\eta = 1 - \left(\frac{1}{r_p} \right)^{(\gamma-1)/\gamma}$$

حيث r_p هي نسبة الضغط وتكون مستقلة عن درجة الحرارة العظمى في الدورة.

يُلاحظ من الشكل (4.12) أدناه أنه عند أي درجة حرارة قصوى في الدورة هنالك قيمة لنسبة الضغط تُعطي أقصى كفاءة في الدورة.

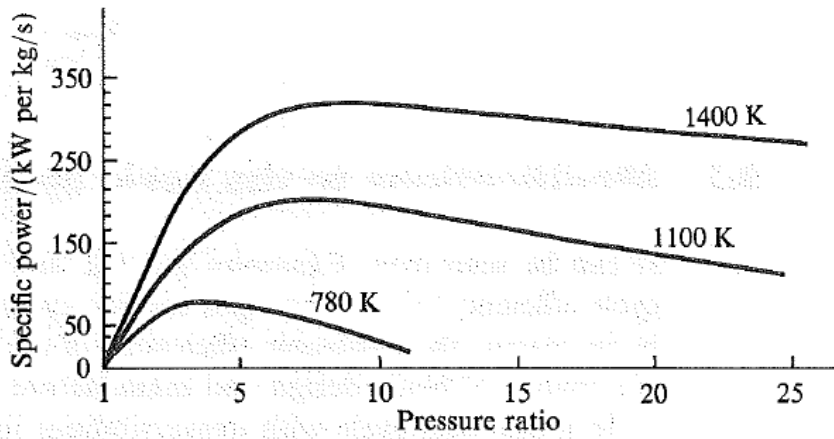


شكل (4.12) كفاءة دورة التوربينة الغازية ضد نسبة الضغط لدرجات حرارة عظمى متباينة في الدورة

من الأهمية بمكان استخدام نسبة شغل أكبر ما يمكن. هنالك العديد من الأساليب التي يمكن استخدامها لزيادة نسبة الشغل مثل التبريد البيني بين مراحل الضاغط، وإعادة التسخين بين مراحل التوربين والتي سيتم مناقشتها في هذا الفصل.

بينما يزيد التبريد البيني وإعادة التسخين نسبة الشغل فإنهما يُخفّضان كفاءة الدورة، ولكن عندما يتم استخدامهما بالاقتران مع مبادل حراري فإنّ كلّ من التبريد البيني وإعادة التسخين يساهما في زيادة كلّ من نسبة الشغل وكفاءة الدورة.

صافي شغل الخرج يعتمد أيضاً على نسبة الضغط وعلى درجة الحرارة القصوى في الدورة، ويتم توضيح منحنيات خرج القدرة النوعية ضد نسبة الضغط للعديد من درجات الحرارة العظمى في الشكل (4.13) أدناه. تكون كفاءات ثابت القصور الحراري للضاغط والتوربينة، ودرجة حرارة دخول الهواء هي نفسها كتلك المستخدمة في اشتقاق المنحنيات في الشكل (4.12). يُلاحظ أنّ كفاءة الدورة تصل إلى قيمتها القصوى عند قيمة مختلفة لنسبة الضغط من تلك لشغل الخرج. عليه، يجب أن يكون هنالك توافقاً في اختيار نسبة الضغط.



شكل (4.13) القدرة النوعية ضد نسبة الضغط لدرجات حرارة عظمى في الدورة

تكون درجة الحرارة العظمى في الدورة محدودة باعتبارها ميتالورجية (i.e. معدنية). وتكون ريشة التوربينة تحت إجهاد ميكانيكي كبير وعليه فإنّ درجة حرارة مادة الريشة يجب أن تحفظ عند قيمة

تشغيلية آمنة. يمكن رفع درجة حرارة الغازات المدخلة إلى التوربينة في حال توفر وسيلة لتبريد الريشة. في الطائرات حيث يكون العمر التشغيلي للمحرك أقصر يتم عادة استخدام درجات حرارة عظمى أكبر من تلك التي يتم استخدامها في وحدات توربين الغاز الصناعي والبحري. بالتالي سيتم استخدام سبائك عالية الثمن وتبريد للريشة للسماح بدخول غازات عند درجات حرارة عظمى (i.e.) أكبر من 1600 K) إلى ريشة التوربينة.

2. التبريد البيني بين مرحلتي الضاغط:

(Inter-cooling between Compressor Stages):

عندما يتم أداء الانضغاط في مرحلتين بمبرد بيني بين المراحل، بالتالي ينخفض شغل الدخل لنسبة ضغط وسريان كتلة معطيان. اعتبر نظاماً كما موضَّح في الشكل (4.14)، ويتم توضيح مخطط T-S للوحدة في الشكل رقم (4.15). تكون إجراءات الدورة الفعلية هي 1-2' في ضاغط الضغط المنخفض، 2'-3 في المبرد البيني، 3-4' في ضاغط الضغط العالي، 4'-5 في غرفة الاحتراق، 5-6' في التوربين. تكون الدورة المثالية لهذه الترتيبة هي 1-2-3-4-5-6، يتم توضيح إجراء الانضغاط بدون تبريد بيني ك 1-A' في الحالة الفعلية وك 1-A في الحالة المثالية ثابتة القصور الحراري.

يُعطى شغل الدخل بتبريد بيني بالمعادلة التالية:

$$\text{شغل الدخل بتبريد بيني} = c_{p_a} (T'_2 - T_1) + c_{p_a} (T'_4 - T_3)$$

ويُعطى شغل الدخل بدون تبريد بيني بالمعادلة التالية:

$$\begin{aligned} \text{شغل الدخل بدون تبريد بيني} &= c_{p_a} (T'_A - T_1) \\ &= c_{p_a} (T'_2 - T_1) + c_{p_a} (T'_A - T_2) \end{aligned}$$

بمقارنة هذه المعادلة مع المعادلة السابقة، يمكن ملاحظة أن شغل الدخل بتبريد بيني يكون أقل من شغل الدخل بدون تبريد بيني، عندما $c_{p_a}(T'_4 - T_3)$ تكون أقل من $c_{p_a}(T'_A - T'_2)$. هذا يكون كذلك إذا تمّ افتراض أن الكفاءات ثابتة القصور الحراري للضاغطين اللذين يشتغلا بانفصال، تكون كل منهما مساوية لكفاءة ثابتة القصور الحراري لضاغظ مفرد يكون مطلوباً إذا لم يتم استخدام تبريد بيني. بالتالي، $(T'_A - T'_2) < (T'_4 - T_3)$ بما أنّ خطوط الضغط تتباعد من اليسار إلى اليمين على مخطط درجة الحرارة ضد القصور الحراري $(T - S)$.

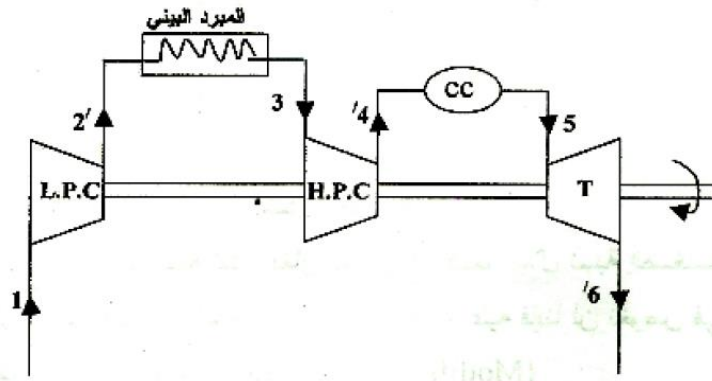
يمكن توضيح أن الضغط البيني الأفضل هو ذلك الذي يُعطي نسب ضغط متساوية في كل مرحلة

للانضغاط، بالرجوع للشكل (4.15) هذا يعني أنّ، $\frac{P_2}{P_1} = \frac{P_4}{P_3}$ ، وبالتالي يكون شغل الدخل

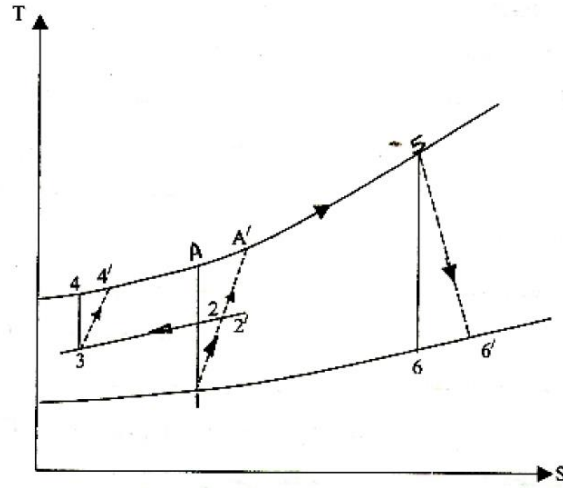
المطلوب أدنى ما يمكن عندما تكون نسبة الضغط في كل مرحلة هي نفسها، وعندما يتم تبريد

درجة حرارة الهواء في المبرد البيني إلى القيمة عند مدخل الوحدة (i.e.) بالرجوع للشكل (4.15)،

$$(T_3 = T_1).$$



شكل (4.14) المخطط الوظيفي لدورة توربينة غازية بمبرد بيني



شكل (4.15) مخطط درجة الحرارة ضد القصور الحراري (T - S) لتوربينة غازية بمبرد بيني

$$\text{نسبة الشغل} = \frac{\text{صافي شغل الخرج}}{\text{إجمالي شغل الخرج}}$$

$$= \frac{\text{شغل التمدد} - \text{شغل الانضغاط}}{\text{شغل التمدد}}$$

يتبع ذلك أنه عندما يتم خفض شغل الدخل فان نسبة الشغل ستزيد. علي أي حال، بالرجوع للشكل رقم (4.15)، فإن الحرارة المكتسبة في غرفة الاحتراق عندما يتم استخدام تبريد بيني في الدورة يُعطي بالمعادلة التالية:

$$\text{الحرارة المكتسبة بتبريد بيني} = c_{p_g} (T_5 - T_4')$$

بينما تعطي الحرارة المكتسبة عندما لا يتم استخدام تبريد بيني عند نفس درجة الحرارة القصوى في الدورة T_5 بالمعادلة التالية:

$$\text{الحرارة المكتسبة بدون تبريد بيني} = c_{p_g} (T_5 - T_A')$$

بالتالي فإن الحرارة المكتسبة عندما يتم استخدام تبريد بيني تكون أكبر من تلك بدون استخدام تبريد بيني. بالرغم من زيادة صافي شغل الخرج بالتبريد البيني وُجدَ عموماً أن الزيادة في الحرارة

المكتسبة تتسبب في نقصان الكفاءة الحرارية بما أن الكفاءة الحرارية تساوى $\frac{\text{صافي شغل الخرج}}{\text{الحرارة المكتسبة}}$

$$\cdot \left(\frac{W_{\text{net o/p}}}{Q_{\text{supplied}}} \text{ i.e.} \right)$$

3. إعادة التسخين بين مرحلتي التوربين (Reheat between Turbine Stages):

كما ذكر سابقاً، فإن إجراء التمدد يتم أدائه تكراراً في مرحلتي توربين منفصلتين، توربين الضغط العالي الذي يدير الضاغط وتوربين الضغط المنخفض الذي يُعطي خرج القدرة المستفاد. يمكن زيادة شغل الخرج لتوربينة الضغط المنخفض برفع درجة الحرارة عند مدخل هذه المرحلة. هذا يمكن عمله بوضع غرفة احتراق ثانية (second combustion chamber) بين مرحلتي التوربين لكي يتم تسخين الغازات المغادرة لتوربينة الضغط العالي. يتم توضيح المنظومة تخطيطياً في الشكل رقم (4.16) ، ويتم تمثيل الدورة علي مخطط T-S في الشكل (4.17). يُمثّل الخط 4' - A' التمدد في توربينة الضغط المنخفض إذا لم يتم استخدام إعادة التسخين.

كما موضح سابقاً، فإن شغل الخرج لتوربينة الضغط العالي يجب أن يكون بالضبط مساوياً لشغل الدخل المطلوب للضاغط (بتجاهل الفقدوات الميكانيكية).

$$\text{i.e. } c_{p_a} (T'_2 - T_1) = c_{p_g} (T_3 - T'_4)$$

صافي شغل الخرج، الذي هو شغل الخرج لتوربينة الضغط المنخفض، يعطي بالمعادلة التالية:

$$\text{صافي شغل الخرج} = c_{p_g} (T_5 - T'_6)$$

إذا لم يتم استخدام إعادة التسخين، بالتالي يُعطي شغل توربينة الضغط المنخفض بالمعادلة التالية :

$$\text{صافي شغل الخرج بدون إعادة تسخين} = c_{p_g} (T'_4 - T'_A)$$

بما أن خطوط الضغط تتباعد من اليسار إلى اليمين علي مخطط T-S، يمكن ملاحظة إن فرق درجة الحرارة $(T_5 - T'_6)$ ، يكون دائماً أكبر من $(T'_4 - T'_A)$. هذا يعني أن إجراء إعادة التسخين عادة ما يزيد صافي شغل الخرج.

أيضاً،

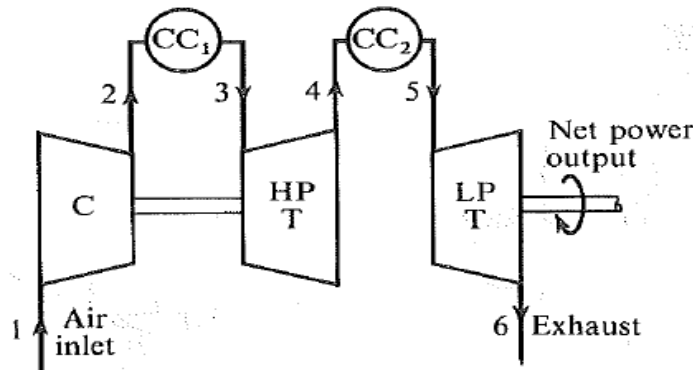
$$\text{نسبة الشغل} = \frac{\text{شغل التمدد} - \text{شغل الانضغاط}}{\text{شغل التمدد}}$$

$$\text{نسبة الشغل} = 1 - \frac{\text{شغل الانضغاط}}{\text{شغل التمدد}}$$

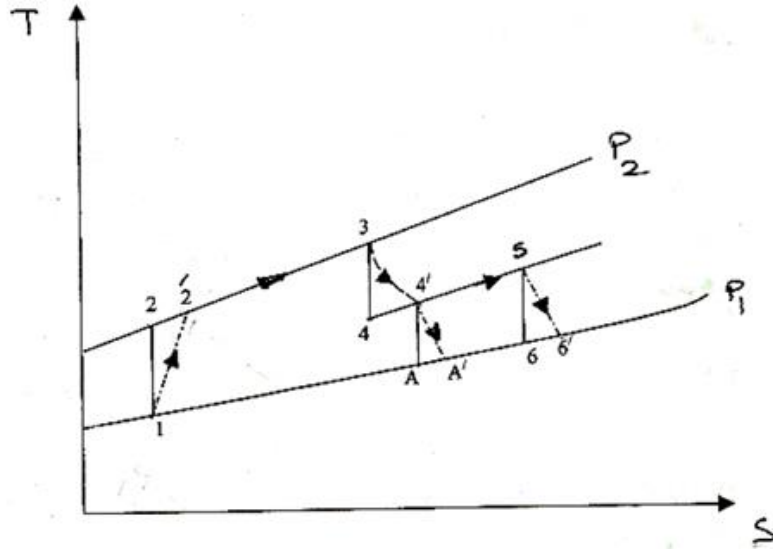
عليه، عندما يتم زيادة شغل التمدد وعدم تغيير شغل الانضغاط (i.e. بمعنى جعل قيمته ثابتة)، فإن نسبة الشغل ستزيد. بالرغم من أن صافي الشغل سيُزاد بإعادة التسخين، أيضاً ستُزاد الحرارة المكتسبة، وتكون المحصلة النهائية هي خفض الكفاءة الحرارية للمنظومة.

$$\text{i.e. الحرارة المكتسبة} = c_{p_g} (T_3 - T'_2) + c_{p_g} (T_5 - T'_4)$$

علي أي حال، فإن درجة حرارة العادم للغازات المغادرة لتوربينة الضغط المنخفض تكون أكبر عندما يتم استخدام إعادة التسخين (i.e. T'_6 عندما يتم مقارنتها بـ T'_A)، ويمكن استخدام مبادل حراري للاستفادة من غازات عادم التوربينة.



شكل (4.16) المخطط الوظيفي لدورة توربينة غازية باستخدام إعادة التسخين

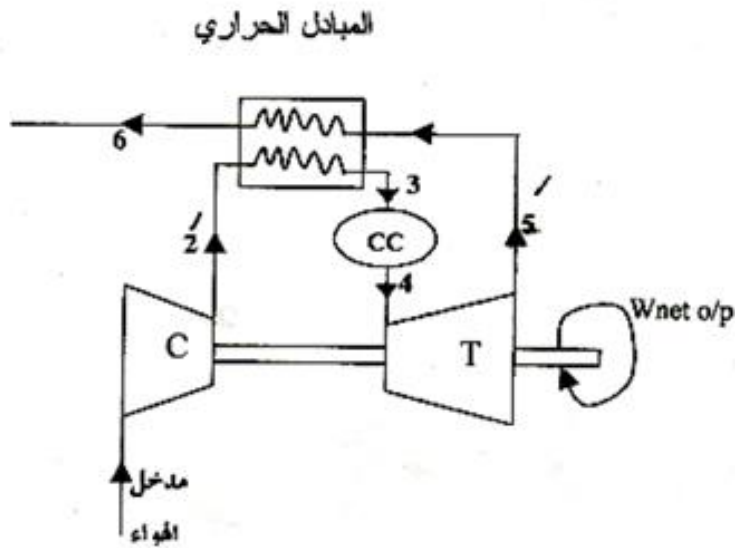


شكل (4.17) مخطط درجة الحرارة ضد القصور الحراري (T-S) لتوربينة باستخدام إعادة التسخين

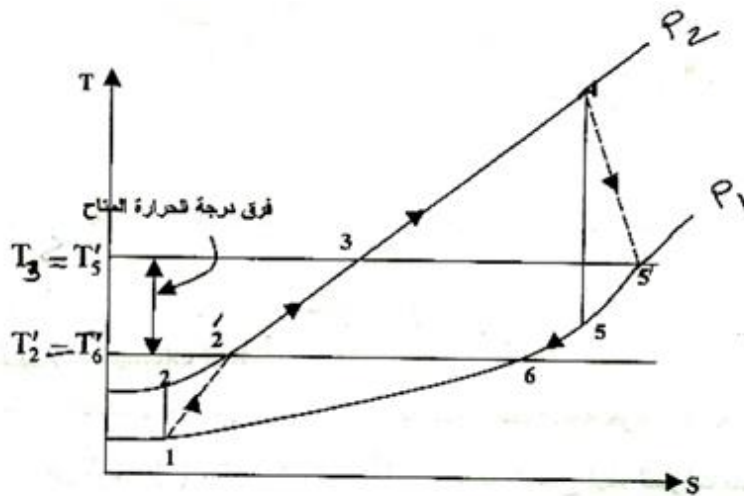
4. المبادل الحراري لرفع درجة حرارة الهواء الداخل إلى غرفة الاحتراق (Heat Exchanger):

ما تزال غازات العادم المغادرة للتوربينة عند نهاية التمدد عند درجة حرارة عالية، وبالتالي محتوى حراري عالي (high enthalpy). إذا تمَّ السماح لهذه الغازات بالمرور إلى الجو، بالتالي فإنَّ هذا يُمثِّلُ فقداً للطاقة المتاحة. بعض هذه الطاقة يمكن استرجاعها بتمرير الغازات من التوربينة خلال مبادل حراري، حيث يتم استخدام الحرارة المنتقلة من الغازات لتسخين الهواء المغادر للضاغط. يتم توضيح الوحدة البسيطة بإضافة مبادل حراري مخططاً في الشكل (4.18)، ويتم تمثيل الدورة علي مخطط T-S في الشكل (4.19). في المبادل الحراري المثالي سيتم تسخين الهواء من T'_2 إلي $T_3 = T'_5$ ، وسيتم تبريد الغازات من T_5 إلي $T'_6 = T_2$. يتم توضيح هذه الحالة المثالية في الشكل رقم (4.19). عملياً يكون هذا مستحيلاً بما أنه يتطلب فرق درجة حرارة كبير عند جميع النقاط في المبادل الحراري لكي يتم تجاوز المقاومة لانتقال الحرارة. بالرجوع للشكل رقم (4.20)، يكون فرق درجة الحرارة المطلوب بين الغازات والهواء الداخل إلي المبادل الحراري هو $(T_6 - T'_2)$ ، ويكون فرق درجة الحرارة المطلوب بين الغازات والهواء المغادر للمبادل الحراري

هو $(T'_5 - T_3)$. إذا لم يكن هنالك فقد حرارة من المبادل الحراري إلى الجو، فإنَّ الحرارة التي تعطيها الغازات يجب أن تكون مساوية بالضبط للحرارة المأخوذة بالهواء.

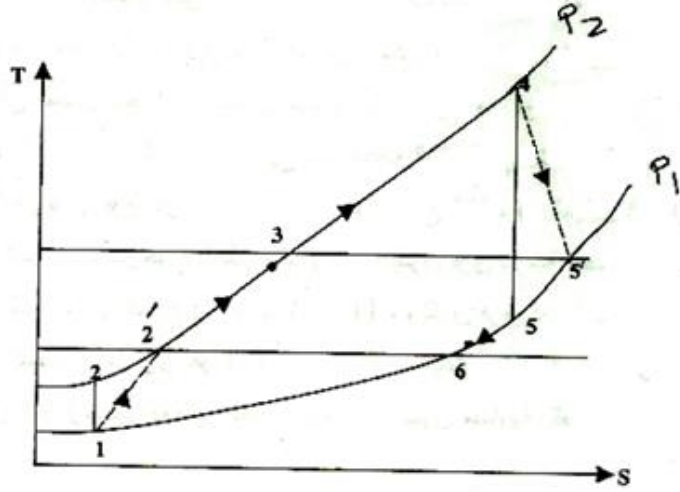


شكل (4.18) المخطط الوظيفي لدورة توربينة غازية باستخدام مبادل حراري



شكل (4.19) مخطط درجة الحرارة ضد القصور الحراري (T-S) لتوربينة غازية باستخدام مبادل

حراري



شكل (4.20) الجدوى الفنية لاستخدام مبادل حراري من عدمه

$$\text{i.e. } \dot{m}_a c_{p_a} (T_3 - T'_2) = \dot{m}_g c_{p_g} (T'_5 - T_6)$$

يكون افتراض عدم فقدان حراري من المبادل الحراري مضبوط بكفاية في معظم الحالات العملية.

عليه تكون المعادلة عالية صحيحة مهما كانت قيم درجات الحرارة T_6 و T_3 .

يتم تعريف فاعلية المبادل الحراري (heat exchanger effectiveness) التي تسمح بفرق درجة

حرارة أقصى ضروري لانتقال الحرارة كنسبة الحرارة التي يستقبلها الهواء إلى الحرارة القصوى

الممكنة التي يمكن انتقالها من الغازات في المبادل الحراري.

$$\therefore \text{الفاعلية} = \frac{\text{الحرارة التي يستقبلها الهواء}}{\text{الحرارة القصوى الممكنة التي يمكن انتقالها من الغازات في المبادل الحراري}}$$

$$\therefore \text{الفاعلية} ، \varepsilon = \frac{\dot{m}_a c_{p_a} (T_3 - T'_2)}{\dot{m}_g c_{p_g} (T'_5 - T'_2)} \rightarrow (4.1)$$

هنالك طريقة أكثر ملائمة لتقييم الأداء لمبادل حراري وهي استخدام نسبة حرارية، يتم تعريفها

كنسبة ارتفاع درجة حرارة الهواء إلى فرق درجة الحرارة الأقصى المتاح.

$$\therefore \text{النسبة الحرارية (thermal ratio) ، TR} = \frac{\text{إرتفاع درجة حرارة الهواء}}{\text{فرق درجة الحرارة الأقصى المتاح}}$$

$$\text{i.e. النسبة الحرارية } TR = \frac{T_3 - T_2'}{T_5' - T_2'} \rightarrow (4.2)$$

بمقارنة المعادلتين (4.1) و (4.2) يمكن ملاحظة أن النسبة الحرارية تكون مساوية للفاعلية عندما

$$\dot{m}_g c_{p_g} \text{ مساويا للمقدار } \dot{m}_a c_{p_a}$$

عندما يتم استخدام مبادل حراري تنخفض الحرارة التي يتم إمدادها في غرفة الاحتراق، بافتراض أن درجة الحرارة القصوى في الدورة لا تتغير.

لا يتغير صافي شغل الخرج وبالتالي تزيد الكفاءة الحرارية.

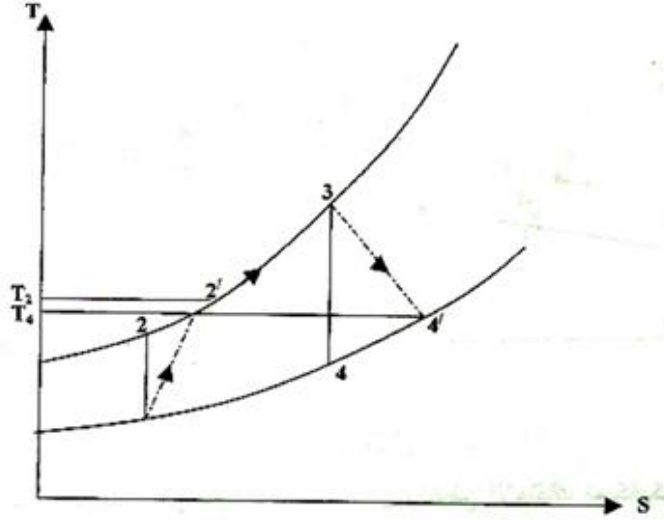
بالرجوع للشكل رقم (4.21):

$$c_{p_g} (T_4 - T_2') = \text{الحرارة المكتسبة بالوقود (بدون مبادل حراري).}$$

$$c_{p_g} (T_4 - T_3) = \text{الحرارة المكتسبة بالوقود (بمبادل حراري).}$$

يمكن فقط استخدام مبادل حراري إذا كان هنالك فرق درجة حرارة كبير كافٍ بين الغازات المغادرة للتوربينة، والهواء المغادر للضاغط . كمثال، في الدورة الموضحة في الشكل (4.21) لا يمكن استخدام مبادل حراري لأنَّ درجة حرارة غازات العادم T_4' تكون أقلَّ من درجة حرارة الهواء المغادرة للضاغط ، T_2' . عملياً، بما أنَّ درجة حرارة الغاز يمكن أن تكون أكبر من درجة حرارة الهواء للضاغط ، لا يكون هنالك فرق درجة حرارة كبير بكفاية ليبيِّر التكلفة الرأسمالية الإضافية والصيانة التابعة المطلوبة لمبادل حراري. أيضاً، عندما يكون فرق درجة الحرارة صغيراً في مبادل حراري ، يجب زيادة مساحة أسطح المبادل الحراري لكي يتم انجاز قيمة عالية معقولة للنسبة الحرارية. في التوربينات الغازية للطائرة ، حيث تكون نسبة القدرة/الوزن أكثر أهمية من النسبة الحرارية أو العمر الطويل، لا يتم استخدام مبادل حراري، ويتم الحصول علي قدرة إضافية باستخدام نسب ضغط أعلى، درجات حرارة قصوى وبإعادة التسخين. لوحدات توربينة غاز صغيرة (e.g. لوحدة الضخ أو للسيارات) يجب تصميم مبادل حراري مكثرت (compact heat exchanger) قبل أن تأمل

مثل هذه الوحدات في أن تصبح منافساً اقتصادياً لمحركات الاحتراق الداخلي التقليدية ذات القدرة المكافئة. يتم عادة استخدام مبادل حراري في وحدات توربين الغاز الضخم للدفع البحري أو القدرة الصناعية.



شكل (4.21) مخطط درجة الحرارة ضد القصور الحراري للمحطة حيث لا يمكن استخدام مبادل حراري

4.5 أمثلة محلولة في التوربينات الغازية:

(Solved Examples in Gas Turbines)

مثال (4): حساب الكفاءة الحرارية، نسبة الشغل للمحطة وسريان الكتلة بتجاهل فقد الضغط

وحدة توليد توربينة غازية ذات قدرة مقدارها 5000 kw تعمل بمرحلتين من الضواغط بتبريد بيني بين المراحل، تكون نسبة الضغط مساوية لـ 9/1 . يتم استخدام توربينة ذات ضغط عالي لإدارة الضواغط، وتوربينة ذات ضغط منخفض لإدارة المولد. تكون درجة حرارة الغازات عند مدخل التوربينة الضغط العالي هي 650°C ، ويتم إعادة تسخين الغازات إلي 650°C بعد التمدد في التوربينة الأولى. يتم تمرير غازات العادم المغادر لتوربينة الضغط المنخفض خلال مبادل حراري لتسخين الهواء المغادر لضواغط مرحلة الضغط العالي. للضواغط نسب ضغط متساوية ويكون

التبريد البيئي كاملاً بين المراحل. تكون درجة حرارة الهواء المدخلة للوحدة مساوية لـ 15°C وتكون كفاءة ثابت القصور الحراري لكل مرحلة ضاغط هي 0.8، وكفاءة ثابت القصور الحراري لكل مرحلة توربينة هي 0.85. تكون النسبة الحرارية للمبادل الحراري مساوية لـ 75% . يمكن افتراض كفاءة ميكانيكية مقدارها 98% لكل من عمود القدرة وعمود توربينة الضاغط. متجاهلاً جميع فقودات الضغط والتغيرات في طاقة الحركة، احسب الكفاءة الحرارية ونسبة الشغل للمحطة، وسريان الكتلة بالـ kg/s . للهواء خذ $c_p = 1.005 \text{ kJ / kg K}$ و $\gamma = 1.4$ ، وللغازات في غرفة الاحتراق وفي التوربينات والمبادل الحراري خذ $c_p = 1.15 \text{ kJ / kg K}$ و $\gamma = 1.333$. تجاهل كتلة الوقود .

الحل:

يتم توضيح المحطة تخطيطياً في الشكل (4.22) ، ويتم تمثيلها علي مخطط T-S في الشكل (4.23). بما أن نسبة الضغط وكفاءة ثابت القصور الحراري لكل ضاغط هي نفسها، بالتالي فإن الشغل المطلوب لكل ضاغط هو نفسه بما أن للضاغطين نفس درجة حرارة الهواء المدخل، i.e.

$$T_2' = T_4' \text{ و } T_1 = T_3$$

من المعادلة،

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{(\gamma-1)/\gamma} \text{ و } \frac{P_2}{P_1} = \sqrt{9} = \underline{\underline{3}}$$

$$\therefore T_2 = 288 \times 3^{0.4/1.4} = \underline{\underline{394 K}}$$

بالتالي من المعادلة،

كفاءة ثابت القصور الحراري لضاغط الضغط المنخفض،

$$\eta_{\text{isen, L.P.C}} = \frac{T_2 - T_1}{T_2' - T_1} = 0.8$$

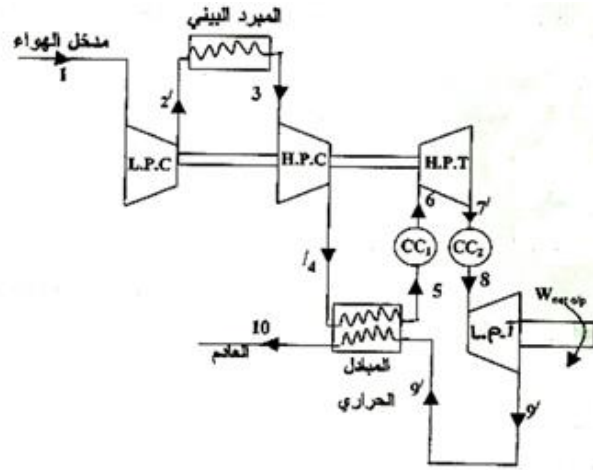
$$\therefore T_2' - T_1 = \frac{394 - 288}{0.8} = \frac{106}{0.8} = \underline{\underline{132.5 K}}$$

i.e. $T'_2 = 288 + 132.5 = \underline{420.5 \text{ K}}$

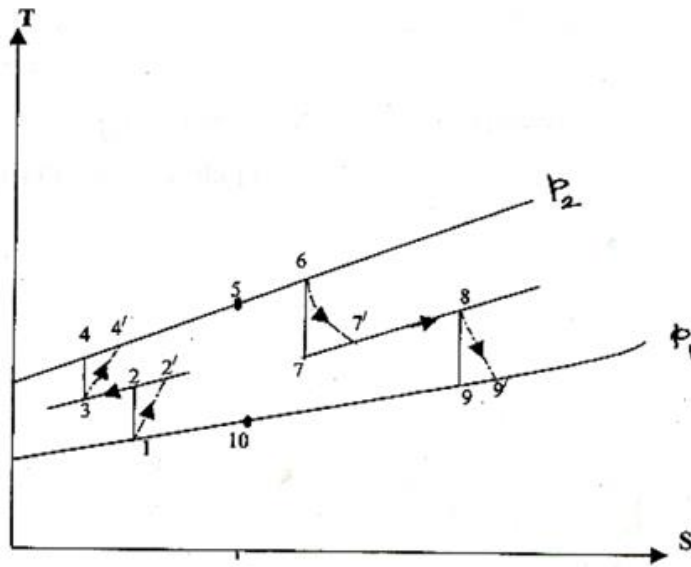
أيضاً، بما أن نسبة الضغط لكل مرحلة ضاغط هي نفسها بالتالي،

شغل الدخل لكل مرحلة ضاغط $= c_{p_a} (T'_2 - T_1)$

$= 1.005 \times 132.5 = \underline{133.1 \text{ kJ/kg}}$



شكل (4.22) المخطط الوظيفي للمحطة في المثال (4)



شكل (4.23) مخطط درجة الحرارة ضد القصور الحراري (T-S) للمحطة في المثال (4)

مطلوب من توربينة الضغط العالي إدارة كلاً الضاغطين وتخطي الاحتكاك الميكانيكي.

$$\text{i.e. شغل خرج توربينة الضغط العالي} = \frac{2 \times 133.1}{0.98} = 272 \text{ kJ/kg}$$

$$\therefore c_{p_g} (T_6 - T_7') = 272$$

$$\text{i.e. } 1.15(923 - T_7') = 272$$

$$\therefore 923 - T_7' = \frac{272}{1.15} = \underline{236.5 \text{ K}}$$

$$\text{i.e. } T_7' = 923 - 236.5 = \underline{686.5 \text{ K}}$$

من المعادلة،

$$\eta_{\text{isen, H.P.T}} = \frac{T_6 - T_7'}{T_6 - T_7} = 0.85$$

$$\therefore T_6 - T_7 = \frac{236.5}{0.85} = \underline{278 \text{ K}}$$

$$\text{i.e. } T_7 = 923 - 278 = \underline{645 \text{ K}}$$

بالتالي باستخدام المعادلة،

$$\frac{P_6}{P_7} = \left(\frac{T_6}{T_7} \right)^{\gamma/(\gamma-1)} = \left(\frac{923}{645} \right)^{1.333/0.333} = \underline{4.19}$$

بالتالي،

$$\frac{P_8}{P_9} = \frac{9}{4.19} = 2.147$$

مستخدماً المعادلة،

$$\frac{T_8}{T_9} = \left(\frac{P_8}{P_9} \right)^{(\gamma-1)/\gamma} = 2.147^{0.333/1.333} = \underline{1.211}$$

$$\therefore T_9 = \frac{923}{1.211} = \underline{762.6 \text{ K}}$$

بالتالي مستخدماً المعادلة،

$$\eta_{\text{isen, L.P.T}} = \frac{T_8 - T'_9}{T_8 - T_9} = 0.85$$

$$\therefore T_8 - T'_9 = 0.85 \times (923 - 762.6) = 0.85 \times 160.4 = \underline{136.3 K}$$

$$\text{i.e. } T'_9 = 923 - 136.3 = \underline{786.7 K}$$

عليه،

$$\text{صافي شغل الخرج} = c_{p_g} (T_8 - T'_9) \times 0.98$$

$$= 1.15 \times 136.3 \times 0.98 = 153.7 \text{ kJ/kg}$$

من المعادلة (4.2) ،

$$\text{النسبة الحرارية للمبادل الحراري، TR} = \frac{T_5 - T'_4}{T'_9 - T'_4} = \underline{0.75}$$

$$\text{i.e. } T_5 - 420.5 = 0.75(786.7 - 420.5) = 0.75 \times 366.2 = \underline{274.7 K}$$

$$\therefore T_5 = 420.5 + 274.7 = \underline{695.5 K}$$

الآن،

$$\text{الحرارة المكتسبة} = c_{p_g} (T_6 - T_5) + c_{p_g} (T_8 - T'_7)$$

$$= 1.15(923 - 695.2) + 1.15(923 - 686.5)$$

$$\text{i.e. } \text{الحرارة المكتسبة} = 1.15(227.8 + 236.5) = \underline{534 \text{ kJ/kg}}$$

بالتالي من المعادلة،

$$\text{الكفاءة الحرارية، } \eta_{th} = \frac{W}{Q} = \frac{153.7}{534} = \underline{0.288} \text{ أو } \underline{28.8\%}$$

شغل توربينة الضغط المنخفض + شغل توربينة الضغط العالي = إجمالي الشغل للمحطة

$$\text{i.e. } W_{\text{gross}} = 272 + \frac{153.7}{0.98} = \underline{429 \text{ kJ/kg}}$$

عليه ،

$$\text{نسبة الشغل، WR} = \frac{\text{صافي شغل الخرج}}{\text{إجمالي شغل الخرج}} = \frac{153.7}{429} = \underline{0.358}$$

يكون الخرج الكهربائي 5000 kw . اجعل سريان الكتلة يكون \dot{m} kg /s وبالتالي ،

$$5000 = \dot{m} \times 153.7$$

$$\text{i.e. } \dot{m} = \frac{5000}{153.7} , \dot{m} = \underline{\underline{32.6}} \text{ kg /s}$$

$$\text{i.e. معدل سريان الهواء} = \underline{\underline{32.6}} \text{ kg/s}$$

في هذا المثال تم تجاهل جميع فقودات الضغط. في وحدة توربين غاز فعلية هنالك فقودات للضغط نتيجة للاحتكاك والاضطراب أو التشويش في المبرّد البيئي، في جانب الهواء للمبادل الحراري، في كلا غرفتي الاحتراق، وفي جانب الغاز للمبادل الحراري، وفي ماسورة العادم. يقود معدّل انتقال الحرارة العالي إلى زيادة واضحة في السرعة في ماسورة ذات مقطع عرضي ثابت تقريباً مما يتسبّب في فقد إضافي للضغط بالإضافة لذلك الناتج عن الاحتكاك واضطراب المائع.

مثال (5): حساب كفاءة الدورة، نسبة الشغل ونسبة الضغط الإجمالية الجديدة للانضغاط باعتبار

فقد الضغط

للتوربين الغازي في المثال (4) أعد حساب كفاءة الدورة ونسبة الشغل، بأخذ فقودات الضغط التالية في الاعتبار:

$$0.3 \text{ bar} = \text{جانب الهواء للمبادل الحراري}$$

$$0.05 \text{ bar} = \text{جانب الغاز للمبادل الحراري وماسورة العادم}$$

$$0.15 \text{ bar} = \text{المبرّد البيئي}$$

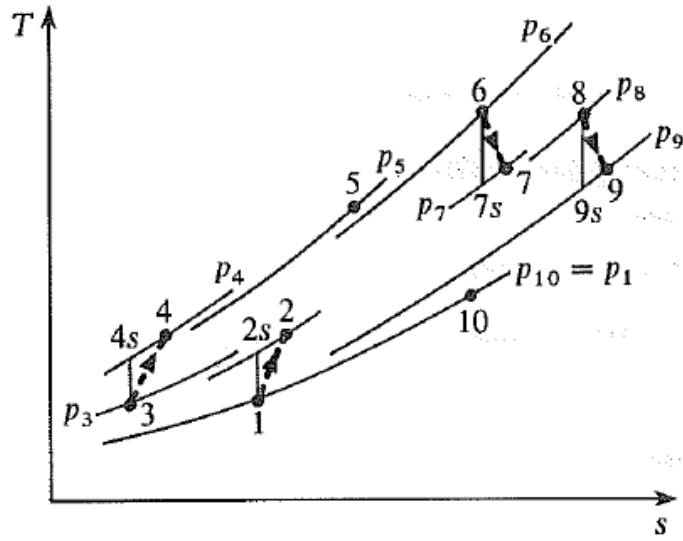
$$0.2 \text{ bar} = \text{كل واحدة من غرف الاحتراق}$$

خذ الضغط السائد ك 1.01 bar ، نسبة الضغط لكل ضاغط 3:1 كما تمّ حسابها سابقاً، وأوجد نسبة الضغط الإجمالية الجديدة للانضغاط. اعتبر جميع البيانات الأخرى ثابتة.

الحل:

بالرجوع لمخطط T – S الموضّح في الشكل (4.24) أدناه، كما سابقاً:

$$T_2 = 288(3)^{0.286} = 394 \text{ K}$$



شكل (4.24) مخطط درجة الحرارة ضد القصور الحراري (T - S)

الذي يوضح فقودات الضغط للمثال (5)

وباستخدام كفاءة ثابت القصور الحراري،

$$T'_2 = 420.5 \text{ K} = T_4$$

أيضاً، كما موضّح سابقاً،

$$= 133.1 \text{ kJ / kg} = \text{شغل الخرج لكل مرحلة ضاغط}$$

الضغط عند مدخل ضاغط الضغط العالي، P_3 ، يتم الآن اعطاؤه بـ $2.88 \text{ bar} = 0.15 -$

(3×1.01) ، وعند المخرج من ضاغط الضغط العالي، P_4 ، يعطى بـ $8.64 \text{ bar} = 3 \times 2.88$.

بالتالي فإن نسبة الضغط الإجمالية الجديدة تعطى بـ $8.555 = 8.64 / 1.01$ ، مقارنة بـ 9 سابقاً.

الضغط عند مدخل توربين الضغط العالي، P_6 ، يكون الآن مساوياً لـ $8.14 \text{ bar} = 0.3 -$

$8.64 -$

شغل الخرج لتوربين الضغط العالي يتم إعطاؤه كما سابقاً بـ $272 \text{ kJ / kg} = (133.1 / 0.98) \times$

(2) ، وبالتالي فإن درجات الحرارة T_7 و T'_7 تكون هي نفسها كما سابقاً وعليه فإن النسبة $4.19 =$

P_6 / P_7 وهي أيضاً كنفس القيم السابقة، $P_7 = P_6 / 4.19 = 8.14 / 4.19 = 1.943 \text{ bar}$ i.e.

$$P_8 = (P_7 - 0.2) = 1.743 \text{ bar} \quad \text{عليه،}$$

$$P_{10} = P_1 = 1.01 \text{ bar} \quad \text{الآن،}$$

$$P_9 = 1.01 + 0.05 = 1.06 \text{ bar} \quad \text{وبالتالي،}$$

$$P_8 / P_9 = 1.743 / 1.06 = 1.644$$

$$T_9 = T_8 / (1.644)^{0.333/1.333} = 923 / 1.132 = 815.4 \text{ K} \quad \text{عليه،}$$

$$T'_9 = 923 - (923 - 815.4) \times 0.85 = 831.5 \text{ K} \quad \text{وبالتالي،}$$

$$\text{صافي شغل الخرج} = c_{p_g} (T_8 - T'_9) = 1.15(923 - 831.5) = 105.2 \text{ kJ/kg} \quad \text{عليه،}$$

من بعد مستخدماً المعادلة أدناه للنسبة الحرارية للمبادل الحراري كما سابقاً، نحصل على،

$$T_5 = 420.5 + 0.75 (831.5 - 420.5) = 728.8 \text{ K}$$

$$\text{الحرارة المكتسبة} = c_{p_g} (T_6 - T_5) + c_{p_g} (T_8 - T'_7) \quad \text{من بعد،}$$

$$= 1.15(923 - 728.8) + 1.15(923 - 686.5) = 495.3 \text{ kJ/kg}$$

عليه، فإنَّ كفاءة الدورة تُعطي كالاتي:

$$\text{كفاءة الدورة} = 105.2 / 495.3 = \underline{21.2} \%$$

قارن هذه القيمة بالقيمة السابقة % 28.8 عندما يتم تجاهل فقودات الضغط.

إجمالي الشغل للمحطة يُعطي بـ :

$$\text{إجمالي الشغل للمحطة} = (105.2 / 0.98) + 277 = 384.3 \text{ kJ/kg}$$

عليه، فإنَّ نسبة الشغل تُعطي بـ :

$$\text{نسبة الشغل} = 105.2 / 384.3 = \underline{0.274}$$

قارن هذه القيمة بالقيمة السابقة 0.358 عندما يتم تجاهل فقودات الضغط.

4.6 مسائل إضافية في التوربينات الغازية

(Additional problems in Gas Turbines)

ملحوظة: لجميع المسائل في هذا الفصل يمكن اخذ C_p و γ و K و 1.005 kJ/kgK و 1.4 لجميع إجراءات الانضغاط ، و 1.15 kg/kgK و 1.333 لجميع إجراءات الاحتراق والتمدد.

مسألة (1): إيجاد الكفاءة الحرارية ونسبة الشغل لتوربينة غازية بتجاهل التغيرات في طاقة

الحركة وفقد الضغط في غرفة الاحتراق

توربينة غاز لها نسبة ضغط إجمالي مقداره $5/1$ ودرجة حرارة قصوى مقدارها 550°C . تدير التوربينة الضاغط ومولداً كهربائياً، وتكون الكفاءة الميكانيكية للإدارة هي 97% . تكون درجة الحرارة السائدة هي 20°C وكفاءات ثابت القصور الحراري للضاغط والتوربينة هما 0.8 و 0.83 علي الترتيب . احسب قدرة الخرج بالكيلو واط لسريان هواء مقداره 15 kg/s . احسب أيضاً الكفاءة الحرارية ونسبة الشغل للتوربينة. تجاهل التغيرات في طاقة الحركة ، وفقد الضغط في غرفة الاحتراق.

Ans. {655kw; 12% ; 0.168}

مسألة (2): إيجاد الكفاءة الحرارية وقدرة العمود لتوربينة غازية بتجاهل تغيرات طاقة الحركة

وفقد الضغط في الاحتراق

في وحدة توربينة غاز بحرية تدير توربينة مرحلة الضغط العالي الضاغط، وتدير توربينة مرحلة الضغط المنخفض عمود الدفع خلال مجموعة تروس مناسبة. تكون نسبة الضغط الإجمالي $4/1$ ، وتكون درجة الحرارة القصوى هي 650°C . كفاءات ثابت القصور الحراري للضاغط، توربينة الضغط العالي، وتوربينة الضغط المنخفض، هي 0.8 ، 0.83 ، 0.85 علي الترتيب، وتكون الكفاءة الميكانيكية لكلا العمودين 98% . احسب الضغط بين مرحلتي التوربين عندما تكون حالات

سحب الهواء هي 1.01 bar و 25°C أحسب أيضاً الكفاءة الحرارية وقدرة العمود عندما يكون معدّل سريان الكتلة 60 kg/s . تجاهل تغيرات طاقة الحركة ، وفقد الضغط في الاحتراق .

Ans. {1.57 bar ; 14.9% ; 4560 kw }

مسألة (3): إيجاد الكفاءة الحرارية التي يتم الحصول عليها عندما يتم تركيب مبادل حراري للوحدة في المسألة (2)، احسب الكفاءة الحرارية التي يتم الحصول عليها عندما يتم تركيب مبادل حراري. افترض نسبة حرارية مقدارها 0.75 .

Ans. {23.4% }

مسألة (4): إيجاد قدرة الخرج بالكيلو واط، الكفاءة الحرارية، معدّل سريان ماء التبريد المطلوب للمبردات البيئية والنسبة الحرارية للمبادل الحراري بتجاهل فقودات الضغط وتغييرات طاقة السرعة في محطة توليد بتوربينة غازية تكون نسبة الانضغاط الإجمالية 12/1، ويتم أدائها في ثلاث مراحل بنسب ضغط مقدارها 2.5/1، 2.4/1، و 2/1 علي الترتيب. تكون درجة حرارة الهواء المدخل إلي المحطة هي 25°C ويُخفّض التبريد البيئي بين المراحل درجة الحرارة إلي 40°C. تدير توربينة الضغط العالي ضواغط مرحلتي الضغط العالي والضغط المتوسط؛ وتُدير توربينة الضغط المنخفض ضاغط مرحلة الضغط المنخفض ومولّد التيار المتناوب. يتم إمرار الغازات المغادرة لتوربينة الضغط المنخفض خلال مبادل حراري يقوم بتسخين الهواء المغادر لضاغط مرحلة الضغط العالي. تكون درجة الحرارة عند مدخل توربينة الضغط العالي هي 650°C، ويرفع إجراء إعادة التسخين بين مرحلتي التوربين درجة الحرارة إلي 650°C. تغادر الغازات المبادل الحراري عند درجة حرارة مقدارها 200°C. كفاءة ثابت القصور الحراري لكل مرحلة ضاغط هي 0.83 ، وكفاءات ثابت القصور الحراري لتوربينات الضغط العالي والضغط المنخفض هي 0.85 و 0.88 علي الترتيب. خذ الكفاءة الميكانيكية لكل عمود ك 98%. تكون سريان كتلة الهواء مساوية لـ 140kg/s. احسب قدرة الخرج بالـ kw ، الكفاءة الحرارية، وسريان ماء التبريد المطلوب للمبردات

البينية عندما لا يجب أن يزيد الارتفاع في درجة حرارة الماء عن 30K . تجاهل فقودات الضغط والتغيرات في طاقة السرعة ، وخذ سعة الحرارة النوعية للماء ك 4.19 kJ/kgK . احسب أيضاً النسبة الحرارية للمبادل الحراري.

Ans. { 25,300 kw ؛ 33.7% ؛ 223 kg/s ؛ 0.825 }

مسألة (5): إيجاد قدرة الخرج بالكيلو واط والكفاءة الحرارية الإجمالية للمحطة

في مجموعة توليد بتوربينة غاز يتم استخدام مرحلتي انضغاط بمبرد بيني بين المراحل. تدير توربينة الضغط العالي ضاغط الضغط العالي، وتدير توربينة الضغط المنخفض ضاغط الضغط المنخفض ومولد التيار المتناوب. يتم إمرار العادم من توربينة الضغط المنخفض خلال مبادل حراري يقوم بنقل الحرارة للهواء المغادر لضاغط الضغط المنخفض. هنالك غرفة احتراق لإعادة التسخين بين مرحلتي التوربينة تقوم برفع درجة حرارة الغاز إلي 600°C ، التي هي أيضاً درجة حرارة الغاز عند مدخل توربينة الضغط العالي . تكون نسبة الضغط الإجمالية مساوية لـ 10/1 ، حيث يكون لكل ضاغط نفس نسبة الضغط ، وتكون درجة حرارة الهواء عند مدخل الوحدة مساوية لـ 20°C . بافتراض كفاءات ثابت قصور حراري مقدارها 0.8 لكلا مرحلتي الضاغط، و 0.85 لكلا مرحلتي التوربين، ويتم استخدام 2% من الشغل لكل توربينة في تجاوز الاحتكاك، احسب قدرة الخرج بالكيلو واط لسريان كتلة مقدارها 115 kg/s . يمكن أخذ النسبة الحرارية للمبادل الحراري ك 0.7 ، ويكون التبريد البيني كاملاً بين مرحلتي الضاغط. تجاهل جميع الفقودات في الضغط، وافترض أن التغيرات في السرعة تكون صغيرة بحيث يتم تجاهلها . احسب أيضاً الكفاءة الحرارية الإجمالية للمحطة.

Ans. { 14,460 kw ؛ 25.7% }

مسألة (6): إيجاد الكفاءة الحرارية الإجمالية، القدرة المنتجة، واستهلاك الوقود النوعي بتجاهل

فقدوات الضغط والتغيرات في طاقة الحركة

وحدة توربينة غاز لمحرك سيارة لديها ضاغطا طرد مركزي موصلان علي التوالي ليعطيا نسبة ضغط إجمالية مقدارها 6/1 . يتم إمرار الهواء المغادر لضاغط الضغط العالي خلال مبادل حراري قبل الدخول إلي غرفة الاحتراق. يتم التمدد في مرحلتي توربين، تُدير المرحلة الاولي الضواغط، وتدير المرحلة الثانية السيارة خلال مجموعة تروس. تُمرَّر الغازات المغادرة لتوربينة الضغط المنخفض خلال مبادل حراري قبل استنفادها إلي الجو. تكون درجة حرارة مدخل توربينة الضغط العالي مساوية لـ 800°C ودرجة حرارة الهواء المدخل للوحدة مساوية لـ 15°C . كفاءة ثابت القصور الحراري للانضغاط هي 0.8 ، وتلك لكل توربينة هي 0.85 ؛ تكون الكفاءة الميكانيكية لكل عمود هي 98% . بتجاهل فقدوات الضغط والتغيرات في طاقة الحركة ، احسب الكفاءة الحرارية الإجمالية والقدرة المنتجة عندما تكون سريان كتلة الهواء مساوية لـ 0.7 kg/s . يتم افتراض النسبة الحرارية للمبادل الحراري مساوية لـ 0.65 . احسب أيضاً استهلاك الوقود النوعي عندما تكون القيمة الحرارية للوقود المستخدم هي 42600 kJ/kg وكفاءة الاحتراق 97% .

Ans. {28.7 % ؛ 94.3kw ؛ 0.303 kg/kwh}

مسألة (7): إيجاد قدرة الخرج النوعية والكفاءة الحرارية بتجاهل فقد الضغط في غرفة الاحتراق

في محرك دفع توربيني (turbo-propeller engine) تكون نسبة الضغط للضاغط هي 6/1 ودرجة الحرارة القصوى في الدورة هي 760°C . تكون كفاءات ثابت القصور الحراري للضاغط والتوربينة هي 0.85 و 0.88 علي الترتيب، والكفاءة الميكانيكية هي 90% . كفاءة نفق أو ماسورة السحب هي 0.9 . احسب قدرة الخرج النوعية بالـ kw لكل kg/s والكفاءة الحرارية عندما تسافر الطائرة بسرعة 725 kw/h عند ارتفاع تكون عنده درجة الحرارة المحيطة مساوية لـ 7°C - .

تجاهل فقد الضغط في غرفة الاحتراق ، وافترض أن الغازات في التوربينة تتمدد أسفل إلى الضغط الجوي ، وتغادر الطائرة عند سرعة مقدارها 725 kw/h بالنسبة للطائرة.

Ans. { 166.7 kw per kg/s, 27.8% }

مسألة (8): قدرة الخرج النوعية والكفاءة الحرارية عندما لا يتم تجاهل فقد الضغط

يكون الفقد في الضغط الكلي في إجراء الاحتراق في المسألة (7) هو 3% من ضغط المدخل الكلي إلى الغرفة . احسب قدرة الخرج النوعية والكفاءة الحرارية عندما لا يتم تجاهل فقد الضغط .

Ans. { 164 kw per kg/s ؛ 27.3% }

مسألة (9): إيجاد معدّل سريان الهواء، نسبة الشغل، درجة حرارة الهواء المدخل إلى غرفة

الاحتراق الأولى، والكفاءة الإجمالية للدورة

في محطة توربين غازي يدخل الهواء الضاغط عند حالات جوية مقدارها $15^{\circ}C$ و 1.0133 bar ويتم انضغاطه خلال نسبة ضغط مقدارها 10. يُمرّر الهواء المغادر للضاغط خلال مبادل حراري قبل إدخاله إلى غرفة الاحتراق. تغادر الغازات الساخنة غرفة الاحتراق عند $800^{\circ}C$ وتتمدد خلال توربين ضغط عالي يقوم بإدارة الضاغط. عندما تغادر الغازات توربين الضغط العالي يتم تمريرها خلال غرفة احتراق إعادة تسخين والتي بدورها ترفع درجة حرارة الغازات إلى $800^{\circ}C$ قبل تمديدها خلال توربينة القدرة، ومن بعد إلى المبادل الحراري حيث تتساقب بسريان مضاد أو متعاكس مع الهواء المغادر للضاغط. مستخدماً البيانات أدناه، ومتجاهلاً معدّل سريان كتلة الوقود وتغييرات السرعة خلال الدورة، احسب الآتي:

(i) معدّل سريان الهواء المطلوب لصافي قدرة خرج مقدارها 10Mw.

(ii) نسبة الشغل في الدورة.

(iii) درجة حرارة الهواء المدخلة إلى غرفة الاحتراق الأولى.

(iv) الكفاءة الإجمالية للدورة.

بيانات:

كفاءة ثابت القصور الحراري للضاغط = 80%.

كفاءات ثابت القصور الحراري لتوربين الضغط العالي ولتوربين القدرة = 87% و 85% .

الكفاءة الميكانيكية للإدارة في توربين الضغط العالي / الضاغط = 92%.

الكفاءة الميكانيكية للإدارة في توربين القدرة = 94%.

النسبة الحرارية للمبادل الحراري = 0.75 .

هبوط الضغط على جانب الهواء في المبادل الحراري = 0.125 bar .

هبوط الضغط في غرفة الاحتراق الأولى = 0.100 bar .

هبوط الضغط في غرفة احتراق إعادة التسخين = 0.080 bar .

هبوط الضغط على جانب الغاز في المبادل الحراري = 0.100 bar .

Ans. { 91.0 kg/ s; 0.25 ; 611° C ; 18.9 % }

مسألة (10): إيجاد معدّل سريان كتلة الهواء المدخل إلى الضاغط، درجة حرارة الهواء المدخلة

إلى غرفة الاحتراق والكفاءة الإجمالية للدورة

محطة توربين غاز مفتوح الدورة يُستخدم لتوليد قدرة في مصفاة بترول. تُدير وحدة توربين الغاز

مولدًا يقوم بدوره بإمداد محرك كهربائي بقدرة مقدارها 2400 kw . الكفاءة الإجمالية الميكانيكية

والكهربائية هي 92%. بعض من غاز العادم من التوربين عند 530° C يتم إمداده إلى فرن في

المصفاة بمعدّل سريان مقداره 2kg/s ، ما تبقي من غاز يتم تمريره بسريان متعاكس خلال مبادل

حراري حيث يقوم بتسخين الهواء المغادر للضاغط، ومن بعد يُمرّر إلى الجو عند 400° C .

لضاغط نسبة ضغط مقدارها 8 ويكون الهواء عند مدخل الضاغط عند 1.013 bar و 20 °C .

هبوط الضغط في جانب الهواء للمبادل الحراري يساوي 0.16 bar ، وهبوط الضغط في غرفة

الاحتراق يساوي 0.12 bar ، وهبوط الضغط في جانب الغاز للمبادل الحراري يساوي 0.05 bar

. كفاءات ثابت القصور الحراري للضاغط والتوربين هما على التوالي 0.85 و 0.92 . متجاهلا

فقودات الحرارة في المبادل الحراري، ومعَدّل سريان كتلة الوقود، احسب:

(i) معَدّل سريان كتلة الهواء المدخل إلى الضاغط.

(ii) درجة حرارة الهواء المدخلة إلى غرفة الاحتراق.

(iii) الكفاءة الاجمالية للدورة.

Ans. { 10.82 kg/s ; 421.0 ° C ; 34.2% }

مسألة (11): إيجاد الكفاءة الإجمالية لدورة مغلقة لتوربين غازي

محطة توربين غاز ذو دورة مغلقة تستخدم الهيليوم كمائع تشغيل يتم استخدامها في مبادل حراري تجريبي. يتم انضغاط الهيليوم في مرحلتين بمبرّد بيني بين المرحلتين. قبل تمريره خلال سخّان حيث يتم تسخينه خارجياً بمائع تبريد المفاعل، يتم تسخين الهيليوم ابتدائياً في مبادل حراري حيث يُمرّر بسريان متعاكس مع الهيليوم المغادر للتوربين. يتم تبريد الهيليوم المغادر للتوربين في المبادل الحراري قبل إمراره خلال مُبرّد حيث يتم تبريده بماء تبريد إلى درجة حرارة المدخل المطلوبة إلى الضاغط، وبالتالي تكتمل الدورة. مستخدماً البيانات أدناه، احسب الكفاءة الإجمالية للدورة.

بيانات:

الضغط ودرجة الحرارة عند مدخل الضاغط الأول = 18 bar و 30 °C .

نسبة الضغط لكل ضاغط = 2.

درجة حرارة الهيليوم المغادر للمبرّد البيني = 30 °C .

درجة حرارة الهيليوم المدخل إلى التوربين = 800 °C .

كفاءة ثابت القصور الحراري لكل ضاغط = 0.83 .

كفاءة ثابت القصور الحراري للتوربين = 0.86 .

فاعلية المبادل الحراري = 0.8 .

فقد الضغط كنسبة مئوية من الضغط المدخل إلى كُليّ مكوّنة:

المبرّد البيني والمبرّد الخارجي = 1% .

كُليّ جانب من المبادل الحراري = 2% .

السحّان الخارجي = 3% .

خذ γ للهيليوم مساوية لـ 1.666 .

Ans. {32.6% }

الكتب والمراجع

الكتب والمراجع العربية:

1. أسامة محمد المرضي سليمان ، "مذكرات انتقال الحرارة الجزء الأول، الثاني والثالث" ، جامعة وادي لنيل ، كلية الهندسة والتقنية ، قسم الهندسة الميكانيكية، (2000م).
2. أسامة محمد المرضي سليمان ، "مذكرات انتقال الكتلة بالانتشار والحمل الجزء الأول، الثاني" ، جامعة وادي لنيل ، كلية الهندسة والتقنية ، قسم الهندسة الميكانيكية، (2005م).
3. أسامة محمد المرضي سليمان ، "مذكرات ديناميكا حرارية(1) و ديناميكا حرارية(2)" ، جامعة وادي لنيل ، كلية الهندسة والتقنية ، قسم الهندسة الميكانيكية، (2007م).
4. برهان محمود العلي ، أحمد نجم الصبحة ، بهجت مجيد مصطفى ، " ترجمة كتاب أساسيات انتقال الحرارة" ، مديرية دار الكتب للطباعة والنش ، جامعة لموصل ، الجمهورية العراقية (1988م).

الكتب والمراجع الإنجليزية

1. T. D. Eastop and A. McConkey, "Applied Thermodynamics for Engineers and Technologists", Longman Singapore Publishers, 1994.
2. Eastop T. D. and Craft D. R., "Energy Efficiency", Longman, 1990.
3. Douglas J. F., Gasiorek J. M. and Swaffield J. A., "Fluid Mechanics", 2nd Edition, Longman, 1986.
4. Rogers G. F. C. and Mayhew Y. R., "Engineering Thermodynamics, Work and Heat Transfer", 4th Edition, Longman, 1992.
5. National Engineering Labrotary, "Steam Tables", HMSO, 1964.
6. Haywood R. W., "Analysis of Engineering Cycles", Pergamon, 1991.

7. Walker G., "Stirling Engines", Oxford University Press, 1980.
8. Harker J. H. and Bachurst J. R., "Fuel and Energy", Academic Press, 1981.
9. Hickson D. C. and Taylor F. R., "Enthalpy – Entropy Diagram for Steam", Basil Blackwell, 1980.
10. Eastop T. D. and Watson W. E., "Mechanical Services for Buildings", Longman, 1992.
11. Cohen H., Rogers G. F. C. and Saravanamuttoo H. I. H., "Gas Turbine Theory", 3rd Edition, Longman, 1987.
12. Shapiro A. H., "The Dynamics and Thermodynamics of Compressible Flow", Volumes 1 and 2, Kreiger, 1983.
13. Dixon S. L., "Fluid Mechanics, Thermodynamics of Turbomachinery", 3rd Edition, Pergamon, 1978.
14. Kearton W. J., "Steam Turbine Theory and Practice", Pitman, 1960.
15. Heywood J. B., "Thermal Combustion Engines Fundamentals", McGraw-Hill, 1988.
16. Taylor C. F., "The Internal Combustion Engine in Theory and Practice", Volumes 1 and 2, MIT Press, 1977.
17. Watson N. and Janota M. S., "Turbo charging the IC Engines", Macmillan, 1984.
18. Dossat R. J., "Principles of Refrigeration", 2nd Edition, Wiley, 1990.
19. Reay D. A. and Macmichael D. B. A., "Heat Pumps", 2nd Edition, Pergamon, 1987.
20. Rogers G. F. C. and Mayhew Y. R., "Thermodynamics and Transport Properties of Fluids", 4th Edition, Basil Blackwell, 1987.
21. Kemp D. D., "Global Environmental Issues", Routledge, 1990.

22. Threlkeld J. L., "Thermal Environmental Engineering", 2nd Edition, Prentice, 1970.
23. Jones W. P., "Air Conditioning Engineering", 3rd Edition, Edward Arnold, 1985.
24. Welty J. R., "Fundamentals of Momentum, Heat and Mass Transfer", 3rd Edition, John Wiley, 1984.
25. Craft D. R. and Lilley D. G., "Heat Transfer Calculations Using Finite Difference Equations", Pavic Publications, 1986.
26. Incropera F. P. and De Witt D. P., "Fundamentals of Heat and Mass Transfer", 3rd Edition, John Wiley, 1990.
27. Eckert E. R. and Drake R. M., "Analysis of Heat and Mass Transfer", Taylor and Francis, 1971.
28. Kern D. Q., "Process Heat Transfer", McGraw – Hill, 1950.
29. Walker G., "Industrial Heat Exchangers", 2nd Edition, McGraw – Hill, 1990.
30. Kays W. M. and London A. L., "Compact Heat Exchangers", 3rd Edition, McGraw – Hill, 1984.
31. McAdams W. H., "Heat Transmission", 3rd Edition, McGraw – Hill, 1954.
32. Dunn P. D., "Renewable Energies: Sources, Conversion, and Applications", Peter Peregrines, 1986.
33. Culp(jr) A. R., "Principles of Energy Conversion", McGraw – Hill, 1980.
34. Mohammed Elmardi Osama, "Solution of Problems in Heat Transfer, Transient Conduction or Unsteady Conduction", Lambert Academic Publishing, 2017.

35.Mohammed Elmardi Osama, "Further Experimental research work on water Current Turbines, Case Study On Atbara Water Turbine", Lambert Academic Publishers, 2015.

نبذة عن المؤلف:



أسامة محمد المرضي سليمان وُلِدَ بمدينة عطبرة بالسودان في العام 1966م. حاز على دبلوم هندسة ميكانيكية من كلية الهندسة الميكانيكية - عطبرة في العام 1990م. تحصّل أيضاً على درجة البكالوريوس في الهندسة الميكانيكية من جامعة السودان للعلوم والتكنولوجيا - الخرطوم في العام 1998م ، كما حاز على درجة الماجستير في تخصص ميكانيكا المواد من جامعة وادي النيل -

عطبرة في العام 2003م ودرجة الدكتوراه من جامعة وادي النيل في العام 2017م. قام بالتدريس في العديد من الجامعات داخل السودان، بالإضافة لتأليفه لأكثر من ثلاثين كتاباً باللغة العربية ولعشرة كتب باللغة الإنجليزية بالإضافة لخمسين ورقة علمية منشورة في دور نشر ومجلات عالمية إلى جانب إشرافه على أكثر من ثلاثمائة بحث تخرج لكل من طلاب الماجستير، الدبلوم العالي، البكالوريوس، والدبلوم العام. يشغل الآن وظيفة أستاذ مساعد بقسم الميكانيكا بكلية الهندسة والتقنية - جامعة وادي النيل. بالإضافة لعمله كاستشاري لبعض الورش الهندسية بالمنطقة الصناعية عطبرة. هذا بجانب عمله كمدير فني لمجموعة ورش الكمالي الهندسية لخرطة أعمدة المرافق واسطوانات السيارات والخرطة العامة وكبس خراطيش الهيدروليك.