مـذكـرة محاضـرات ديناميـكا حـرارية (2)

Lecture Notes on Thermodynamics (2)

بروفيسـور مساعـد أسـامة محـمد المرضـي سليمان خـيال

Professor Assistant Osama Mohammed Elmardi Suleiman Khayal

2017

بسم الله الرحمن الرحيم

جامعة وادي النيل – كلية الهندسة والتقنية

قسم الهندسة الميكانيكية

برنامج بكلاريوس الشرف في الهندسة الميكانيكية

الفصل السادس

جامعة البحر الأحمر – كلية الهندسة

Nile Valley University
Faculty of Engineering and Technology
Mechanical Engineering Department

حرارية 2

Thermo-dynamics II

osama Mohammed Elmardi suleiman
Khayal

updated in March 2017

إعداد: أستاذ مساعد
أسامة محمد المرضي
سليمان

الفصل الخامس
الاحتراق
الوحدة الثانية في مقرر الديناميكا الحرارية

5.0 **الاحتراق** [Combustion] :

الكيمياء الأساسية [Basic chemistry] :

من المهم فهم تركيب واستخدام الصيغ الكيميائية قبل الدخول إلى الاحتراق ويشمل هذا المبادىء 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 التغيير الكيميائي . إذا انشطرت الذرة كما في التفاعل النووي [nuclear reaction] فإنها لا تحافظ على خواصها الكيميائية الأصلية.

الجزيئات [molecules]: نادراً ما توجد العناصر في الطبيعة كذرات مفردة. بعض العناصر توجد ذراتها كأزواج وكل زوج يشكّل 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 تكون متناهية في الدقة [Infinitesimally small] فيتم استخدام نسب الكتل. للذرات أو الجزيئات

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

الكتلة الذرية النسبية للمادة: هي كتلة كيان مفرد من المادة منسوباً إلى كيان مفرد من الكربون – 12.

يُعطى الجدول رقم(1) أدناه 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 تشكّل الجزيء. في الصيغة الكيميائية فإن ذرة واحدة لعنصر يتم تمثيلها برمز العنصر. i.e. ذرة الهيدروجين تكتب H. أما إذا وجدت المادة كجزيء يحتوي على ذرتين تكتب H_2 . وجزيئين للهيدروجين يتم تمثيلها كالآتي $2H_2$ ، etc .

يبين الجدول رقم (2) حساب الكتلة الجزيئية النسبية من الكتل الذرية النسبية للعناصر.

جدول رقم (2) المركبات وكتلتها الجزيئية النسبية

المركب	الصيغة	الكتلة الجزيئية النسبية
ماء ، بخار	H_2O	2 x 1 + 1 x 16 = 18
أول أكسيد الكربون	CO	1 x 12 + 1 x16 = 28
ثاني أكسيد الكربون	CO_2	1x12+2x16 = 44
ثاني أكسيد الكبريت	SO_2	1 x 32 + 2 x 16 = 64
الميثان	CH_4	1 x 12+4 x 1 = 16
الإيثان	C_2H_6	2 x 12 + 6 x 1 = 30
البروبان	C_3H_8	3 x 12 + 8 x 1 = 44
البيوتان	C_4H_{10}	4 x 12 + 10 x 1 = 58
الإيثلين	C_2H_4	2 x 12 + 4 x 1 = 28
البروبلين	C_3H_6	3 x 12 + 6x1 = 42
البنتين	C_5H_{12}	5 x 12 + 12 x 1 = 72
البنزين	C_6H_6	6 x 12+6 x 1 = 78
التولين (toluene)	C_7H_8	7 x 12+ 8 x 1 = 92
الأوكتان	C_8H_{18}	8 x 12 + 18 x 1 = 114

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 رقم (3) .

جدول رقم (3) : تحليل الوقودات الصلبة :

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

تكون التحاليل متشابهة ولكنها يمكن أن تختلف من عينة لأخرى خلال المجموعة. هنالك تحليل آخر للفحم يسمّى بالتحليل الملازم [Proximate analysis] حيث يعطى النسب المئوية للرطوبة، المادة الطيّارة ، المادة الصلبة القابلة للاحتراق (تسمى بالكربون المثبت) والرماد.

يوجد الكربون المثبّت كبقايا لخصم النسب المئوية للكميات الأخرى. تشمل المادة الطيّارة الماء المشتق من التفكك 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 الطور 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 معطى بالتحليل الأقصى (المطلق). يعطى الجدول رقم (4) 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 رقم (4) تحليلات الوقودات السائلة

الوقود	الكربون	الهيدروجين	الكبريت	الرماد	الخ
100 octane petrol	85.1	14.9	0.01	–	
Motor petrol	85.5	14.4	0.1	–	
Benzole	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	

معادلات الاحتراق [Combustion equations] :

تدخل الكتل المتناسبة من الهواء والوقود إلى غرفة الاحتراق حيث يتم التفاعل الكيميائي وتمر نواتج الاحتراق خلال ماسورة العادم إلى الخارج. حسب قانون بقاء الكتلة فإنّ 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 فإن الأرقام الجزيئية النسبية للمادة المتفاعلة والناتجة تُعطى التحليل المولى أو الحجمى للمكونات الغازية .

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

غالباً ما نأخذ مكونات الهواء في حسابات الاحتراق بالكتلة كالآتي :-

$23.3\%\ O_2\ , 76.7\%\ N_2$

وبالحجم كالآتي :-

$21\%\ O_2\ , 79\%\ N_2$

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

اعتبر المعادلة التالية للهيدروجين

$$2H_2 + O_2 \rightarrow 2H_2O \text{ --------- (1)}$$

وهذا يعني أنّ:-

a/ يتفاعل الهيدروجين مع الأكسجين ليُعطي البخار أو الماء .

b/ يتفاعل جزيئين من الهيدروجين مع جزيء واحد من الأكسجين ليُعطي 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 تمّ تبريد الناتج بصورة كافية حتى يتكثف .

ويمكن الحصول على التناسب بالكتلة باستخدام الكتل الذرية النسبية .

$$i.e. 2H_2 + O_2 \rightarrow 2H_2O$$

$$2\times(2\times1) + 2\times16 \rightarrow 2(2\times1+16)$$

$$i.e. 4kgH_2 + 32kgO_2 \rightarrow 36kgH_2O$$

أو $1kgH_2 + 8kgO_2 \rightarrow 9kgH_2O$

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

$$H_2 + \frac{1}{2}O_2 \rightarrow H_2O$$

يمكن ملاحظة التالي من المعادلة (1) ،

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

الحجم الكلي للمادة الناتجة = 2 حجم

عليه يكون هنالك انكماش حجمي عند الاحتراق .

بما أنّ الأكسجين يكون مصاحباً بالنيتروجين عند إمداد الهواء للاحتراق ، فيجب تضمين النيتـــروجين في المعادلة .

وبما أن النيتروجين يكون خاملاً خلال التفاعل الكيميائي فسيظهر على جانبي المعادلة •لكل مول من الأكسجين هنالك 79/21 مول من النيتروجين.

عليه تصبح المعادلة (1) كالآتي :-

$$2H_2 + O_2 + \frac{79}{21}N_2 \rightarrow 2H_2O + \frac{79}{21}N_2$$

يمكن إيجاد معادلات مشابهة لاحتراق الكربون.

a/ **الاحتراق الكامل للكربون ليتحول إلى ثاني أكسيد الكربون**

$$C + O_2 \rightarrow CO_2$$

وبتضمين النيتروجين

$$C + O_2 + \frac{79}{21} N_2 \rightarrow CO_2 + \frac{79}{21} N_2$$

باعتبار حجوم المواد المتفاعلة والمواد الناتجة

صفر حجم من C + 1 حجم من O_2 + $\frac{79}{21}$ حجم من N_2 ← 1 حجم من CO_2 + $\frac{79}{21}$ حجم من N_2

لقد تمّ اعتبار حجم الكربون يساوي صفراً لأنّ الحجم الصلد يمكن تجاهله مقارنة بحجم الغاز ،

التحليل بالكتلة ،

$$12\,kgC + (2\times 16)kgO_2 + \frac{79}{21}(2\times 14)kgN_2 \rightarrow$$

$$(12 + 2\times 16)kgCO_2 + \frac{79}{21}(2\times 14)kgN_2$$

$$ie.\ 12\,kgC + 32\,kgO_2 + 105.3\,kgN_2 \rightarrow 44\,kgCO_2 + 105.3\,kgN_2$$

أو $1kgC + \frac{8}{3}kgO_2 + \frac{105.3}{12}kgN_2 \rightarrow \frac{11}{3}kgCO_2 + \frac{105.3}{12}kgN_2$

b/ **الاحتراق غير الكامل للكربون :- [Incomplete Combustion of Carbon]**

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

وبتضمين النيتروجين

$$2C + O_2 \rightarrow 2CO$$

$$2C + O_2 + \frac{79}{21} N_2 \rightarrow 2CO + \frac{79}{21} N_2$$

التحليل بالكتلة ،

$$(2\times 12)kgC + (2\times 16)kgO_2 + \frac{79}{21}(2\times 14)kgN_2 \rightarrow$$

$$2(12+16)kgCO + \frac{79}{21}(2\times 14)kgN_2$$

$$i.e.\ \ 24kgC + 32kgO_2 + 105.3kgN_2 \rightarrow 56kgCO + 105.3kgN_2$$

أو

$$1kgC + \frac{4}{3}kgO_2 + \frac{105.3}{24}kgN_2 \rightarrow \frac{7}{3}kgCO + \frac{105.3}{24}kgN_2$$

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

$$2CO + O_2 + \frac{79}{21}N_2 \rightarrow 2CO_2 + \frac{79}{21}N_2$$

وبالكتلة،

$$56kgCO + 32kgO_2 + \frac{79}{21}\times 28kgN_2 \rightarrow 88kgCO_2 + \frac{79}{21}\times 28kgN_2$$

أو $1kgCO + \frac{4}{7}kgO_2 + \frac{105.3}{56}kgN_2 \rightarrow \frac{11}{7}kgCO_2 + \frac{105.3}{56}kgN_2$ أو

نسبة هواء إلى وقود متكافئة أو صحيحة كيميائياً:-

[stoichiometric , or chemically correct , air fuel ratio]

الخليط المتكافىء [stoichiometric mixture] للهواء والوقود هو الخليط الذي يحتوي على أكسجين كاف فقط للاحتراق الكامل للوقود.

الخليط الذي يحتوي على كميات زائدة من الهواء يسمّى بالخليط الضعيف [weak mixture] والخليط الذي يحتوي على كميات ناقصة من الهواء يسمى بالخليط الغني [rich mixture] .

النسبة المئوية للهواء الزائد يمكن إعطاؤها بالمعادلة التالية:-

النسبة المئوية للهواء الزائد = (نسبة الA/F الفعلية – نسبة ال A/F المتكافئة) / (نسبة ال A/F المتكافئة) --------(2)

للوقود الغازي فإنّ النسب يتم التعبير عنها بالحجم وللوقود الصلب والسائل فإنّ النسب يتم التعبير عنها بالكتلة .

تُعطى 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 الغازية (Gas turbines) فإن النسبة تكون أكبر من 300% ضعيف . تقابل المحركات البترولية أحوالاً مختلفة من الحمولة والسرعة وتشتغل في مدي واسع من متانة الخلائط.

(متانة) قوة الخليط = (نسبة ال A/F المتكافئة) / (نسبة ال A/F الفعلية) ------- (3)

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

تحليل غاز العادم [Exhaust and Flue gas analysis] :

الغازات هي نواتج الاحتراق الرئيسية. عندما يتم أخذ عينّة من الغاز للتحليل غالباً ما يتم تبريدها إلى درجة حرارة ما دون درجة حرارة التشبع للبخار .

لا يضمّن المحتوى البخاري في هذه الحالة في التحليل الذي يتم تصنيفه على أنه تحليل للنواتج الجافة. بما أنّ النواتج هي غازات فإنه غالباً ما يتم التحليل بالحجم . أما التحليل الذي يشمل البخار في العادم يسمّى بالتحليل الرطب.

أمثلة محلولة :

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

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

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

الكتلة لكل kg فحم	معادلة الاحتراق	الأكسجين المطلوب لكل kg من الفحم	النواتج لكل kg من الفحم
0.9	$C+O_2 \rightarrow CO_2$ $12kg+32kg \rightarrow 44kg$	$0.9\times\frac{32}{12}=2.4kg$	$0.9\times\frac{44}{12}=3.3kgCO_2$
0.03	$2H_2+O_2 \rightarrow 2H_2O$ $1kg+8kg \rightarrow 9kg$	$0.03\times 8=2.24kg$	$0.03\times 9=0.27kgH_2O$
0.025	-	$-0.025kg$	-
0.01	-	-	$0.01kgN_2$
0.005	$S+O_2 \rightarrow SO_2$ $32kg+1kg \rightarrow 64kg$ **32**	$0.005\times\frac{32}{32}=0.005kg$	$0.005\times\frac{64}{32}=0.01kgSO_2$
0.03	-	-	-
	-	الجملة 2.620kg	

من الجدول :-

الأكسجين O_2 المطلوب لكل kg من الفحم = 2.62kg

∴ الهواء المطلوب لكل kg من الفحم = $\frac{2.62}{0.233}$ = 1.125kg

(بما أن الهواء يحتوي على 23.3% أكسجين (O_2) بالكتلة).

النيتروجين N_2 المتحد مع هذا الهواء = 0.76 x 11.25 = 8.63kg

جملة النيتروجين N_2 في النواتج = 8.63 + 0.01 = 8.64kg

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

باستخدام المعادلة (2)

النسبة المئوية للهواء الزائد =(نسبة ال A/F الفعليـة)-(نسـبة ال A/F المتكافئـة)/(نسـبة الA/F المتكافئة)

من المعادلة (2)

نسبة ال A/F الفعلية = نسبة ال A/F المتكافئة + النسبة المئويـة للهـواء الزائـد × نسـبة ال A/F المتكافئة

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

عليه فإنّ إمداد النيتروجين N_2 ،

0.767 x 13.5=10.36kg

أيضاً ، إمداد الأكسجين O_2 ،

0.233x13.5=3.144kg

في النواتج ،

$$N_2=10.36+0.01=10.37kg$$

والأكسجين الزائد O_2

$$O_2=3.144-2.62=0.524kg$$

التحليل بالحجم :-

المنتج Product	Mass/kg Coal	% by Mass	M Kg/kmol	kmol/kg Coal	% byvol. Wet	% by VOL dry
1	2	3	4	5	6	7
CO_2	3.3	22.8	44	0.075	15.77	16.3
H_2O	0.27	1.87	18	0.015	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
	14.47kg		Total wet	0.4764	100.16	100.14
			$-H_2O$	0.015		
			Total dry	0.4614		

2/ تحليل إمداد من غاز الفحم كالآتي :-

$H_2$49.4%;CO18%;$CH_4$20%;$C_4H_8$2%;$O_2$0.4%,$N_2$6.2%;$CO_2$4%

أحسب نسبة ال A/F المتكافئة. أوجد أيضاً التحليل الرطب والجاف لنواتج الاحتراق إذا كان الخليط الفعلي 20% ضعيف .

هذا المثال يتم حله بطريقة الجدولة ، يتم توضيح عينّة من الحسابات فيما يلي ل CH_4

$$CH_4 + 2O_2 \rightarrow CO_2 + 2H_2O$$

$$i.e. 1kmol CH_4 + 2Kmol O_2 \rightarrow 1kmol Co_2 + 2Kmol H_2O$$

هنالك 0.2kmol من الميثان CH_4 لكل kmol من غاز الفحم ، عليه

$$o.2kmol CH_4 + 0.2 \times 2kmol O_2 \rightarrow 0.2kmo CO_2 + 0.2 \times 2kmol H_2O$$

عليه فإنّ الأكسجين المطلوب للميثان CH_4 في غاز الفحم هو 0.4kmol لكل kmol من غاز الفحم.

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

	Kmol/kmol fuel	Combustion Eqn	$O_2 kmol/kmol$ fuel	Products CO_2	Products H_2O
1	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	$CH_4 + CO_2 \rightarrow CO_2 + 2H_2O$	0.4	0.20	0.40
C_4H_8	0.02	$C_4H_8 + 6O_2 \rightarrow 2CO_2 + 4H_2O$	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

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

(حيث أنّ الهواء يحتوي على 21% من O_2 بالحجم)

i.e نسبة الA/F المتكافئة = 4.06/1 بالحجم

لخليط 20% ضعيف ، وباستخدام المعادلة(2)

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

النيتروجين المتحد = 4.872 x 0.79 =3.85 (kmol لكل kmol من الوقود)

الأكسجين الزائد ،

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

ال kmol الكلي للنايتروجين N_2 في النواتج ،

3.85 + 0.062 = 3.912 kmol/kmol fuel

يتم توضيح التحليل بالحجم للنواتج الرطبة والجافة في الجدول التالي :-

الناتج product	Kmol/kmol Fuel	% by vol. (dry)	% by vol.(wet)
CO_2	0.5	10.90	9
H_2O	0.974	-	17.5
O_2	0.171	3.72	3.08
N_2	3.912	85.4	70.4
	Total wet =5.557	100.02	99.98
	$-\ H_2O$=0.974		
	Total dry =4.583		

في المثالين (1) و (2) يمكن ملاحظة أنّ حاصل جمع التحاليل لا يكون بالضبط 100%، وعليه فإنّ الدقة الموضحة كافية و لا يوجد زمن لتضييعه في سبيل الوصول إلى تحاليل مضبوطة .

3/ أوجد نسبة A/F المتكافئة لاحتراق الكحول الإثيلي (C_2H_6O) في محرك بترولي. أحسب نسب 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 الإثيلي كالآتي :-

$$C_2H_6O + 3O_2 \rightarrow 2CO_2 + 3H_2O$$

بما أنّ هنالك ذرتين من الكربون في كل مول من C_2H_6O فسيكون هنالك مولان من CO_2 في النواتج ، لتعطي ذرتين من الكربون في كل جانب من المعادلة. بالمثل وبما أن هنالك ستة ذرات من الهيدروجين في كل مول من الكحول الأثيلي فسيكون هنالك ثلاثة مولات من H_2O في النواتج لإعطاء ستة ذرات من الهيدروجين على جانبي المعادلة. وبموازنة ذرات الأكسجين ، نجد أن هنالك (2x2+3=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 الأثيلي ، يجب إضافة ستة ذرات من الأكسجين (أي ثلاثة مولات).

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

أ.ي. $$C_2H_6O + 3O_2 + 3\times\frac{79}{21}N_2 \rightarrow 2CO_2 + 3H_2O + 3\times\frac{79}{21}N_2$$

1kmol من الوقود يملك كتلة مقدارها $46kg = (2\times12+6\times1+1\times16)$

3kmol من الأكسجين يملك كتلة مقدارها (3x2x16) = 96 kg

عليه ،

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

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

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

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

= (8.96) / (نسبة ال A/F الفعلية) = 0.9

نسبة ال 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 المتكافىء

i.e. $C_2H_6O+1.11\left(3O_2+3\times\frac{79}{21}N_2\right)\rightarrow 2CO_2+3H_2O+0.11\times 3O_2+1.11\times 3\times\frac{79}{21}N_2$

والنواتج هي :-

$$2kmolCO_2+3kmolH_2O+0.33kmolO_2+12.54kmolN_2$$

الكيلومولات الكلية ،

2 + 3 + 0.33 + 12.54 = 17.87 kmol

التحليل الرطب ،

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

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

الكيلومولات الجافة الكلية ،

$$2+0.33+12.54 = 14.87kmol$$

عليه ، التحليل الجاف ،

$$\frac{2}{14.87}\times 100 = 13.45\%CO_2;\frac{0.33}{14.87}\times 100 = 2.22\%O_2$$

$$\frac{12.54}{14.87}x100 = 84.4\%N_2$$

120%

اعتبر متانة المزيج ، من المعادلة (3) ،

(نسبة ال A/F المتكافئة) / (نسبة ال A/F الفعلية) = 1.2

∴ نسبة ال 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 الهواء اللازم للاحتراق الكامل .

اجعل عدد الكيلومولات ل CO_2 في النواتج يساوي a

واجعل عدد الكيلومولات ل CO في النواتج يساوي b

عليه فإنّ معادلة الاحتراق ستكون كالآتي :-

$$C_2H_6O + 0.834\left(3O_2 + 3\times\frac{79}{21}N_2\right) \rightarrow aCO_2 + bCO + 3H_2O + 0.834\times\frac{79}{21}N_2$$

لإيجاد قيم a , b يجب عمل موازنة لذرات الكربون والأكسجين .

i.e. موازنة الكربون : $2 = a + b$

موازنة الأكسجين: $1+0.834 \times 3 = 2a+b+3$

بطرح المعادلتين نتحصل على ،

$a = 1.004$

و $b = 2 - 1.004 = 0.996$

i.e. النواتج هي :-

$$1.004kmolCO_2 + 0.996kmolCO + 3kmolH_2 + 9.41kmdN_2$$

عدد الكيلومولات الكلية الجافة ،

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

عليه ، التحليل الجاف

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

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

4/ أحسب للمزيج المتكافيء في المثال (3) ، حجم الخليط لكل kg من الوقود عند درجة حرارة $65C^o$ وضغط 1.013 bar . أحسب أيضاً حجم نواتج الاحتراق لكل kg من الوقود بعد التبريد إلي درجة حرارة $120C^o$ عند ضغط 1 bar .

الحل :-

$$C_2H_6O + 3O_2 + 3\times\frac{79}{21}N_2 \rightarrow 2CO_2 + 3H_2O + 3\times\frac{79}{21}N_2$$

عليه ، عدد الكيلومولات الكلية للمواد المتفاعلة ،

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

ومن المعادلة المميزة للغازات ،

$$PV = nR_oT$$

$$V = \frac{nR_oT}{P} = \frac{15.3\times10^3\times8.314\times338}{10^5\times1.013} = 424.4m^3/kmol$$

$R_u = 8.314kj/kmolk$ (molar gas constant) (ثابت الغاز المولاري)

(حيث $T = 65 + 273 = 338k$)

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

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

عندما يتم تبريد النواتج إلى 120^oC فإن الماء H_2O يوجد كبخار ، لأنّ درجة الحرارة تكون أعلى من درجة حرارة التشبع نتيجة للضغط الجزيئي للماء H_2O

يكون العدد الكلي لكيلومولات النواتج مساوياً ل $\left(2+3+3\times\frac{79}{21}\right) = 16.3kmol$

من المعادلة ، $PV = nR_oT$

$$\therefore V = \frac{16.3\times10^3\times8.314\times393}{10^5\times1} = 533.8m^3/kmol\ of\ fuel$$

(حيث $T = 120 + 273 = 393K$)

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

/5 إذا تمّ تبريد النواتج في المثال (4) إلى 15^oC عن ضغط ثابت ، أحسب كمية الماء الذي سيتكثف لكل kg من الوقود.

الحل :- عند 15^oC ، ولأنّ هنالك بعض التكثيف فإنّ البخار المتبقي (جاف مشبع) يظل على التصاق مع السائل. ضغط التشبع عند 15^oC هو 0.01704 bar ، وهذا هو الضغط الجزئي للبخار الجاف المشبّع.

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 13.3kmol ، عليه

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

$$\therefore\ n_s = \left(\frac{0.01704\times13.3}{1-0.01704}\right) = 0.2305$$

i.e. عدد الكيلومولات للبخار الجاف المشبّع المتبقي عند 15^oc - 0.2305

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

I kmol من H_2O يحتوي على (2+16 = 18 kg). عليه فإنّ كتلة الماء المتكثف هي 2.77 x 18 kg لكل kmol من الوقود .

∴ كتلة الماء المتكثف لكل kg من الوقود = $\frac{2.77\times18}{46}=1.084kg$

/6 يكون التحليل بالقياس الوزني [Gravimetric analysis] لعينة من الفحم هو كالآتي :-

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

الحل: 1kg من الفحم يحتوي على 0.8 kg C و 0.12 kg H

∴ 1 kg من الفحم يحتوي على $0.12kmolH,\frac{0.8}{12}kmolC$

اجعل الأكسجين المطلوب للاحتراق الكامل يكون xkmol ، يكون النيتروجين المصاحب للأكسجين هو $3.76xkmol$ ~~$x\frac{79}{21}$~~.

لـ 1kg من الفحم تكون معادلة الإحتراق كالآتي ،

$$\frac{0.8}{12}C+0.12H+xO_2+3.76xN_2\rightarrow aCO_2+bH_2O+3.76xN_2$$

عليه ،

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

موازنة الهيدروجين:- $\therefore b=0.06kmol,0.12=2b$

موازنة الأكسجين :- $\therefore x=0.097kmd,2x=2a+b$

كتلة 1kmol من الأكسجين هي 32 kg ، عليه فإنّ كتلة الأكسجين O_2 لكل kg من الفحم هي : 32 x 0.097

i.e نسبة ال A/F المتكافئة = $\frac{32\times0.097}{0.233}=13.3/1$

جملة كيلومولات النواتج ،

$$= a + b + 3.76x$$
$$= 0.067 + 0.06 + 3.76 \text{ x } 0.097 = 0.492 \text{ kmol}$$

عليه فإنّ التحليل الرطب ،

$$\frac{0.067}{0.492}\times100=13.6\%CO_2;\frac{0.06}{0.492}\times100=12.2\%H_2;$$
$$\frac{0.365}{0.492}\times100=74.2\%N_2$$

/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 أنّ نسبة ال A/F المتكافئة أقلّ من 6.5/1 .

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

$$0.536H_2 + 0.09CO + 0.25CH_4 + 0.03C_4H_8 + 0.004O_2 + 0.03CO_2 + 0.06N_2$$
$$+0.21\times 6.5O_2 + 0.79\times 6.5N_2 \rightarrow aCO_2 + bH_2O + CO_2 + dN_2$$

عليه ،

موازنة الكربون : $0.09 + 0.25 + 0.12 + 0.03 = a$ $\therefore a = 0.49$

موازنة الهيدوجين : $0.536\times 2 + 0.25\times 4 + 0.03\times 8 = b$ $\therefore b = 1.26$

موازنة الأكسجين : $0.09+0.004\times 2+0.03\times 2+0.21\times 6.5\times 2 = 2a+b+2c$ $\therefore c = 0.378$

موازنة النيتروجين: $0.06\times 2 + 0.79\times 6.5\times 2 = 2d$ $\therefore d = 5.2$

عليه ، جملة الكيلومولات للنواتج الجافة ،

$$0.49 + 0.378 + 5.2 = 6.068$$

ويكون التحليل بالحجم كالآتي ،

$$\frac{0.49}{6.068}\times 100 = 8.08\%CO_2; \frac{0.378}{6.068}\times 100 = 6.22\%O_2; \frac{5.2}{6.068}\times 100 = 85.7\%N_2$$

التحليل العملي لنواتج الاحتراق :- (Practical analysis of combustion products)

يتطلب التحقق المختبري لإجراء الاحتراق تحليل نواتج الاحتراق حيث تؤخذ 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 تمّ امتصاصها بأخذ الفرق بين الحجوم قبل وبعد الامتصاص .

أمثلة محلولة :-

/1 أوضح تحليلاً للعادم (باستخدام جهاز أورسات) لمحرك يعمل بوقود البنزول (benzole)

أنّ محتوى CO_2 هو 15% ، وليس هنالك CO. افترض أنّ باقي العادم يحتوي على أكسجين ونيتروجين فقط ، أحسب نسبة ال A/F للمحرك. يكون التحليل المطلق للبترول هو 90%C و 10%H .

الحل : 1 kg من الوقود يحتوي على 0.9 kg من C و 0.1 kg من H ، يمكن كتابته كالآتي :

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

يمكن كتابة معادلة الاحتراق كالآتي :-

$$x\left(\frac{0.9}{12}C + 0.1H\right) + yo_2 + \frac{79}{21}yN_2 \rightarrow 0.15CO_2 + aO_2 + (0.85 - a)N_2 + bH_2O$$

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

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

a = هي عدد كيلومولات الأكسجين الزائد لكل كيلو مول من غاز العادم الجاف .

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

عليه ، موازنة الكربون :- $\frac{0.9}{12}x = 0.15$ ∴ x = 2.0

موازنة الهيدروجين :- $0.1x = 2b$ ∴ b = 0.1

موازنة الأكسجين :- $2y = 2 \times 0.15 + 2a + b$ ∴ y = 0.2 + a ——— (1)

موازنة النيتروجين:- $3.76 \times 2 \times y = 2 \times (0.85 - a)$

$\therefore y = 0.226 - 0.266a$ ——(2)

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

$0.226 - 0.266a = 0.2 + a$

$\therefore a = 0.0206$

$\therefore y = 0.2 + 0.0206 = 0.221kmol$

∴ الأكسجين الذي يتم إمداده ،

$0.221 \times 32kg/kmol$ D.E.G

الهواء الذي يتم إمداده ،

$$\frac{0.221 \times 32}{0.233} = 30.4kg/kmol \text{ D.E.G}$$

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

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

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

$$4.5\%O_2, 1\%H_2, 4\%CH_4, 2\%CO, 12\%CO_2$$

والمتبقي نيتروجين . أحسب التناسب بالكتلة للكربون إلى الهيدروجين في الوقود ، بافتراض أنه هيدروجين نقي .

الحل:

اجعل 1kg من الوقود يحتوي على x kg C و y kg H .

عليه وباعتبار 1kmol من D.E.G وبإدخال X, Y كما معرّف في المثال السابق ،

يمكن كتابة ،

$$X\left(\frac{xc}{12}+yH\right)+YO_2+\frac{79}{21}YN_2 \rightarrow 0.12CO_2+0.02CO+0.04CH_4+0.01H_2+0.045O_2+aH_2O+0.765N_2$$

عليه ،

موازنة النيتروجين :- $\therefore Y = 0.2035 \ , 3.76\,Y = 0.765$

موازنة الأكسجين :- $0.2035 = 0.12 + \frac{0.02}{2} + 0.045 + \frac{a}{2}$

$$\therefore a = 0.057$$

موازنة الكربون :- $\frac{Xx}{12} = 0.12 + 0.02 + 0.04$

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

موازنة الهيدوجين : $Xy = 4 \times 0.04 + 2 \times 0.01 + 2 \times 0.057$

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

وبقسمة (1) % (2)

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

∴ نسبة الكربون إلى الهيدروجين في الوقود ،

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

الفصل السادس
ماكينات الإزاحة الموجبة

6/ ماكينات الازاحة الموجبة (positive displacement m/cs):وظيفة الضاغط هى سحب كمية محددة من مانع (عادة غاز ، وغالبا هواء) وتصريفها عند ضغط مطلوب . الماكينة الاكثر كفاءة هى تلك التى ستكمل هذا بأدنى شغل ميكانيكى مدخل . تستخدم كل من ماكينات الازاحة الموجبة الترددية والدوارة لاغراض متنوعة . يمكن التمييز بينهما على اساس الاداء بتعريف النوع الترددى كذلك الذى يمتلك معدل سريان كتلة منخفض ونسب ضغط عالية ، والنوع الدوار كذلك الذى يمتلك معدل سريان كتلة عالى ونسب ضغط منخفضة .

يكون مدى الضغط من الجوى الى حوالى 9bar مشتركا لكلا النوعيين .

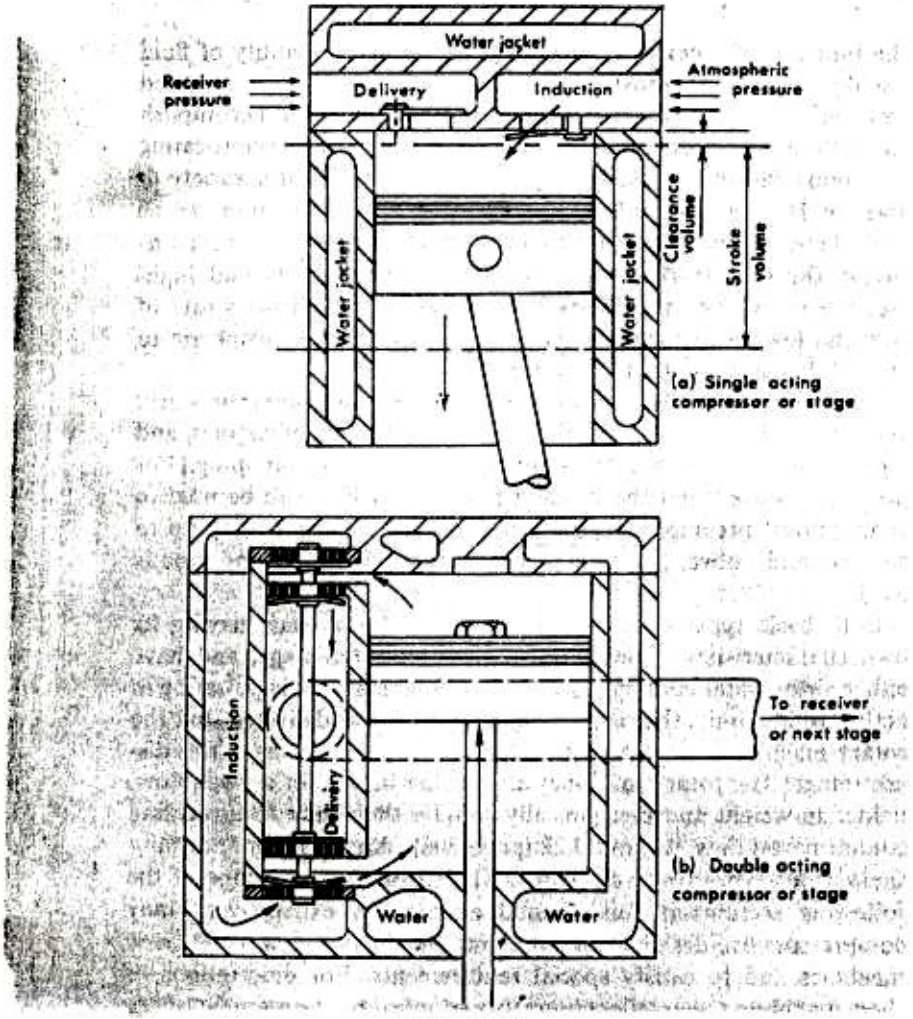
تكون بعض الماكينات الدوارة مناسبة فقط لشغل ذو نسبة ضغط منخفضة ويتم تطبيقها للنظافة (الكنس) والشحن الفوقى للمحركات، والتطبيقات المتنوعة للاستنفاذ (العادم) والضخ الفراغى. لضغوط فوق 9bar يمكن استخدام الماكينة الدوارة ذات الريشة (vane-type rotary m/c) لامداد ضغوط تعزيزية ، لكن لشغل ذو ضغط عال محتمل حتى 485bar فما فوق ، لأغراض خاصة ، يتم استخدام النوع الترددى .

كلا النوعان الاساسيان يوجد فى اشكال مختلفة كل بمميزاته الخاصة . يمكن أن يكونا مفردى أو متعددى المرحلة ، واما أن يملكا تبريدا هوائيا أومائيا . تكون الماكينة الترددية نبضية فى حركتها مما يحد من معدل تصريف المائع خلالها ، بينما تكون الماكينة الدوارة متصلة فى حركتها . تكون الماكينات الدوارة أصغر فى حجمها لسريان معطى، أخف فى وزنها وأبسط ميكانيكا من رصيفتها الترددية.يوضح الشكل رقم (1) تخطيطيا الانواع المتباينة التى سيتم مناقشتها .

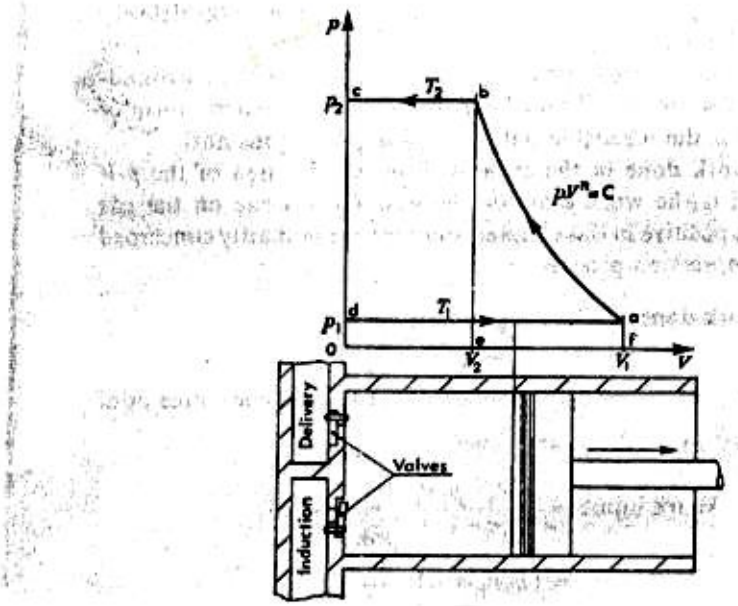
لضاغط يشتغل بأسلوب دورى أو نبضى ، مثل الضاغط الترددى ، فان الخواص عند المدخل والمخرج هى القيم المتوسطة المأخوذة فى الدورة،يتم اختبار حد حجم التحكم بحيث تكون الحالات 1و2 ثابته مع الزمن وتكون الاوضاع المنتخبة بعيدة عن اضطراب التنبيض (pulsating disturbance).

الماكينات الترددية (reciprocating m/cs)

تشتمل الالية على الكباس ، ذراع التوصيل ، المرفق ، وترتيبة الاسطوانة. ابتدائياً سيتم تجاهل حجم الخلوص فى الاسطوانة . أيضا سيتم افتراض أن مائع التشغيل هو غازاً مثالياً . تأخذ الدورة لفة واحدة للعمود المرفقى لتكتمل ويتم توضيح المخطط البيانى الاساسى فى الشكل رقم (2) يتم تصميم الصمامات المستخدمة فى معظم ضواغط الهواء بخيث تعطى فعل ذاتى وتكون من النوع المحمّل بالياياات التى تشتغل بفرق ضغط صغير عبرها ، يعطى ضغط الباى الخفيف فعل اغلاق سريع .



الشكل (1)



الشكل (2)

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

في الشكل رقم (2) يمثل الخط d-a شوط السحب . تزداد الكتلة في الاسطوانة من صفر عند d الى تلك المطلوبة لملء الاسطوانة عندa . تكون درجة الحرارة ثابته عند T_1 لهذا الاجراء ولايكون هنالك تبادل حرارة مع البيئة المحيطة في الحالة المثالية . يبدأ السحب عندما يكون فرق الضغط عبر الصمام كاف لفتحة.يمثل الخط a-b-c الانضغاط وشوط التصريف عندما يبدا الكباس شوط رجوعه يرتفع الضغط في الاسطوانة ويغلق صمام الدخول . يستمر صعود الضغط بالكباس الراجع كما موضح بالخط a-b حتى يتم الوصول الى الضغط الذى يفتح عنده صمام التصريف (قيمة يتم تحديدها بالصمام والضغط في المستقبل (receiver)) .

يحدث التصريف كما موضح بالخط b-c ، الذى يكون اجراءاً عند درجة خرارة ثابتة T_2 ، ضغط ثابت P_2 ، تبادل حرارة صغرى وكتلة متناقصة . تعاد الدورة عند نهاية هذا الشوط .

تعتمد قيمة درجة حرارة التصريف على قانون الانضغاط بين b,a الذى بدوره يعتمد على تبادل الحرارة مع البيئة المحيطة اثناء هذا الاجراء . يمكن افتراض أن الشكل العام للانضغاط هو متعدد الانتحاء انعكاسي (reversible polytropic) . $(i.e.\ \ PV^n = cons\tan t)$

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 باجراء الانضغاط . الشغل المبذول البياني على الهواء للدورة = المساحة abcd =المساحة abef + المساحة bcoe – المساحة ado f

بأستخدام المعادلة التالية ، للمساحة abef ،

i.e. شغل الدخل $= \dfrac{p_2v_b - p_1v_a}{n-1} + p_2v_b - p_1v_a$

$$= (p_2v_b - p_1v_a)\left(\frac{1}{n-1} + 1\right).$$

$$= (p_2v_b - p_1v_a)\left(\frac{1+n-1}{n-1}\right).$$

$$= \frac{n}{n-1}(p_2v_b - p_1v_a).....(1)$$

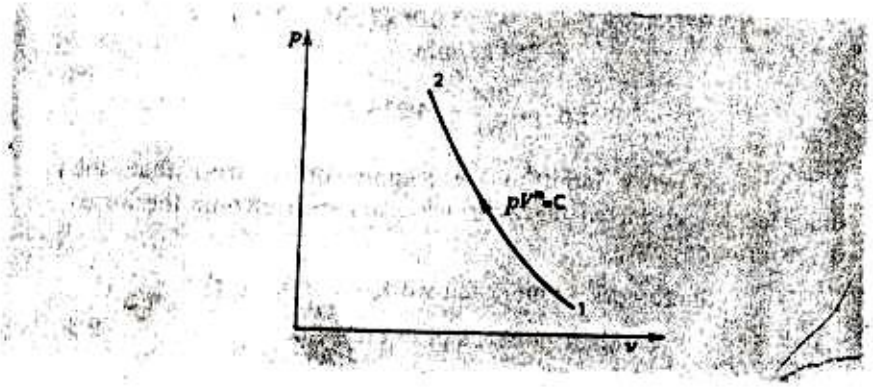
من المعادلة التالية يمكن كتابة

$$p_1 v_a = \dot{m} R T_1 \quad , \quad P_2 V_b = \dot{m} R T_2$$

(حيث $\dot{m}$ هى الكتلة السحوبة والمصرفة فى الدورة)وبالتالى :-

$$\text{شغل الدخل للدورة} = \frac{n}{n-1} \dot{m} R(T_2 - T_1) _____ (2)$$

يكون الشغل المبذول على الهواء لوحدة زمن مساويا للشغل المبذول بالدورة مضروباً فى عدد الدورات لوحدة زمن . يستخدم معدل سريان الكتلة اكثر تكراراً من الكتلة فى الدورة . يغير مانع التشغيل حالته بين b,a فى الشكل رقم (2) ، من P_1 و T_1 الى T_2, P_2 ، يتم توضيح التغير فى الشكل رقم (3) الذى هو مخطط خواص (v ضد p i.e.)



شكل رقم (3)

تعطى درجة حرارة التصريف بالمعادلة التالية $i.e. \quad T_2 = T_1 \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{(n-1)/n}$

مثال (1) :-

ضاغط ترددى مفرد المرحلة يسحب $1m^3$ من الهواء فى الدقيقة عند 1.013bar و 15c° ويصرفه عند 7bar . مفترضا أن قانون الانضغاط يكون $pv^{1.35} = const.$ ، وأن الخلوص يتم تجاهله ، أحسب القدرة البيانية .

الحل :-

الكتلة المصرفة فى الدقيقة $\dot{m} = \frac{P_1 v_1}{RT_1} = \frac{1.013X1X10^5}{287X288} = 1.226 kg/\min$

(حيث $T_1 = 15 + 273 = 288K$).

درجة حرارة التصريف $T_2 = T_1\left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{(n-1)/n} = 288\left(\frac{7}{1.013}\right)^{(1.35-1)/1.35}$

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

من المعادلة (2)

الشغل البياني $= \frac{n}{n-1} m^{\cdot} R(T_2 - T_1) kj/\min$

(حيث $\dot{m}$ معدل صدك سريان الكتلة بال kg/min.)

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

$= 254 kj/min$

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

يكون شغل الدخل الفعلي للضاغط اكبر من الشغل البياني ، نتيجة للشغل الضروري لتخطي الفقودات الناشئة من الاحتكاك ، etc •

i.e. شغل العمود = الشغل البياني + الشغل الإحتكاكي

أو $S.P = i.p + f.p$ _____(3)

تعطي الكفاءة الميكانيكية للماكينة بـ

الكفاءة الميكانيكية للضاغط = الشغل البياني او القدرة البيانية / شغل العمود او قدرة العمود _____(4)

لتحديد قدرة الدخل المطلوبة يجب اعتبار كفاءة محرك الادارة بالاضافة للكفاءة الميكانيكية .

بالتالي،

قدرة الدخل = S.P. / كفاءة المحرك والادارة _____(5)

مثال (2) :-

اذا تمت ادارة الضاغط للمثال (1) بسرعة 300rev/min لماكينة مفردة التشغيل ، مفردة الاسطوانة ، احسب قطر الاسطوانة المطلوب ، مفترضاً نسبة طول شوط الى قطر اسطوانة مقداره 1.5/1 . احسب قدرة المحرك المطلوبة لادارة الضاغط اذا كانت الكفاءة الميكانيكية للضاغط تعادل 85% وتلك لنقل قدرة المحرك 90%.

الحل:-

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

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

i.e. حجم الاسطوانة $= 0.00333 m^3$

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

(حيث d = قطر الاسطوانة ; L= طول الشوط)

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

$$\therefore d^3 = 0.00283 m^3$$

i,e قطر الاسطوانة $d = 141.5mm$

قدرة الدخل للضاغط $= \frac{4.23}{0.85} = 4.98kw$

$\therefore$ قدرة المحرك $= \frac{4.98}{0.9} = 5.53kw$

مبتدئاً بالمعادلة (2) ، يمكن اشتقاق تعبيرات اخرى للشغل البياني

القدرة البيانية $= \frac{n}{n-1} m^{\cdot} R(T_2 - T_1) = \frac{n}{n-1} m^{\cdot} RT_1 \left(\frac{T_2}{T_1} - 1 \right)$

أيضاً من المعادلة التالية ، $(n-1)/n$

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{P_2}{P_1} \right)$$

عليه

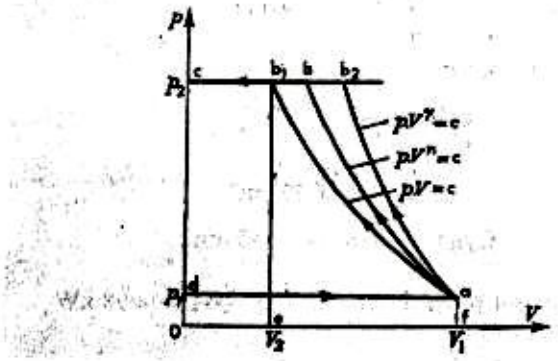
القدرة البيانية $= \frac{n}{n-1} m^{\cdot} RT_1 \left\{ \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{(n-1)/n} - 1 \right\}$ _____(6)

$$\text{القدرة البيانية او} = \frac{n}{n-1} p_1 \dot{V} \left\{ \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{(n-1)/n} - 1 \right\} \quad \text{_____(7)}$$

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

<u>شرط الحصول على ادنى شغل (The condition for minimum work)</u>

يعطي الشغل المبذول على الهواء بمساحة المخطط البياني ، وسيكون الشغل المبذول ادنى عندما تكون مساحة المخطط ادنى . يتم تثبيت ارتفاع المخطط بنسبة الضغط المطلوبة (عندما تكون P_1 مثبتة) ، ويتم تثبيت طول الخط da بحجم الاسطوانة الذي يتم تثبيته بالسحب المطلوب من الغاز . الاجراء الوحيد الذي يمكن ان يؤثر على مساحة المخطط هو الخط ab . يتم تحديد موضع هذا الخط بقيمة الاس n ; الشكل رقم(4) ادناه يوضح المحددات للاجراءات الممكنة .



شكل رقم (4)

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

يكون الانضغاط ثابت درجة الحرارة هو الاجراء الاكثر تفضيلاً بين b,a ، معطياً الشغل الادنى المبذول على الهواء . هذا يعني انه في ضاغط فعلي يجب الحفاظ على درجة حرارة الغاز بحيث تكون اقرب ما يمكن لقيمتها الاولية وهذا يتطلب توفير وسيلة لتبريد الغاز اما بالهواء او بالماء . يعطي الشغل المبذول البياني عندما يتم انضغاط الغاز بثبات درجة الحرارة بالمساحة ab_1cd .

المساحة adof- المساحة بالمساحة $+ b_1coe$ المساحة $= ab_1ef$ المساحة ab_1cd

المساحة $= b_2 v_{b_2} \log_e \frac{P_2}{P_1}$. ab_1ef

i.e. الشغل البياني في الدورة $= P_2V_{a1}\log_e\frac{P_2}{P_1} + P_2V_{a1} - P_1V_a$

ايضا $P_1V_a = P_2V_{a1}$ ، بما ان الاجراء ab_1 ثابت درجة الحرارة .

∴ الشغل البياني في الدورة $= P_2V_{a1}\log_e\frac{P_2}{P_1}$ _____(8)

$= P_1V_a\log_e\frac{P_2}{P_1}$ _____(9)

$= m^*RT\log_e\frac{P_2}{P_1}$ _____(10)

كفاءة ثابت درجة الحرارة : (Isothermal efficiency)

بالتعريف المؤسس على مخطط البيان ،

كفاءة ثابت درجة الحرارة = الشغل ثابت درجة الحرارة / الشغل البياني _____(11)

مثال (3) :-

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

الحل:-

من المعادلة (10)،

القدرة ثابتة درجة الحرارة $= m^*RT\log\frac{P_2}{P_1} = 1.226\times0.287\times288\times\log_e\frac{7}{1.013} = 196kj/min$

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

بالتالي مستخدماً المعادلة (11) عاليه ،

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

الصورة الاقل تفصيلا للانضغاط في الضواغط الترددية هي تلك التي تعطي بالاجراء ثابت القصور الحراري (انظر الشكل (4)) . ستكون الصورة الفعلية للانضغاط عادة بين هذين الحدين . يتم تمثيل الاجراءات الثلاث على مخطط T-S في الشكل (5) .

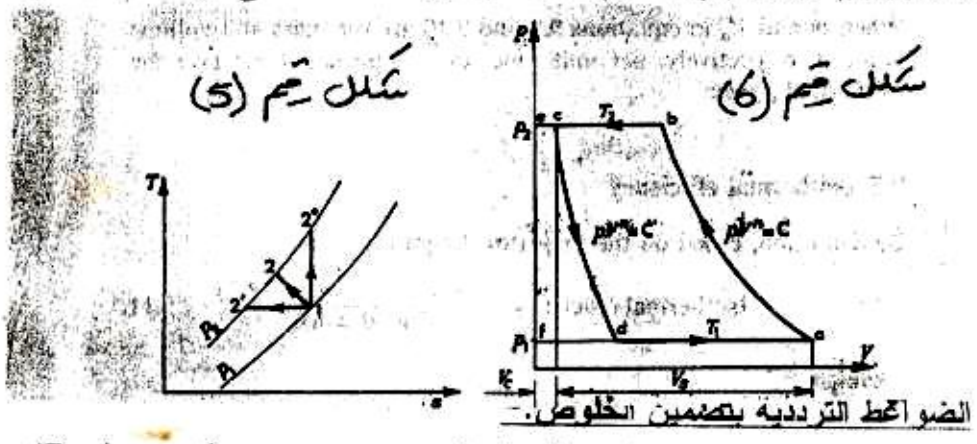
1 – 2' يمثل انضغاطا ثابت درجة الحرارة

1 – 2 يمثل انضغاطا ثابت القصور الحراري

1 - 2 يمثل انضغاطا طبقا لقانون $PV^n = const$

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

يكون الاسلوب الرئيسي المستخدم لتبريد الهواء باحاطة الاسطوانة بغلاف ماء (Water jacket).والتصميم للنسبة الافضل لمساحة السطح الى حجم الاسطوانة .



الضواغط الترددية بتضمين الخلوص.

(Reciprocating compressors including clearance)

يكون الخلوص ضرورياً في ضاغط لاعطاء حرية ميكانيكية لاجزاء التشغيل ويسمح بالفراغ الضروري لتشغيل الصمامات .

يوضح الشكل (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 ان يصبح حوالي 2% ، لكن هنالك ايضاً 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 حالماً يصل الضغط الى P_1 ، سيبدأ سحب غاز طازج ويستمر لنهاية هذا الشوط عند a . من بعد يتم انضغاط الغاز طبقاً للقانون . $PV^n = const$ (عموماً) ، ويبدا التصريف عند b حسب تحكم الصمامات . يكون تأثير الخلوص هو خفض الحجم المسحوب عند P_1 و T_1 من V_s الى $(V_s - V_c)$. تكون كتل الغاز عند النقاط الاربع الرئيسية بحيث ان ، $m_a^* = m_d^*$. $m_b^* = m_c^*$ ، تعطي الكتلة المصرفة في الدورة بـ $(m_b^* - m_c^*)$ ، والتي تكون مساوية لتلك المسحوبة المعطاة بـ $(m_a^* - m_d^*)$. تتغير خواص مائع التشغيل في الاجراءات a-b , c-d كما موضح في الشكل (7) ، بالرجوع للشكل رقم (6) يعطي الشغل المبذول البياني بمساحة المخطط p-v.

الشغل البياني= المساحة abcd

= المساحة abef - المساحة cefd

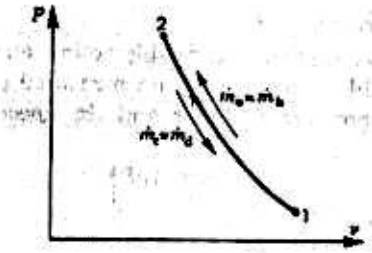
بالتالي ، مستخدماً المعادلة (2) ،

$$\text{القدرة البيانية} = \frac{n}{n-1} m_a^{\bullet} R(T_2 - T_1) - \frac{n}{n-1} m_d^{\bullet} R(T_4 - T_1)$$

$$\text{i.e. القدرة البيانية} = \frac{n}{n-1} R(m_a^{\bullet} - m_d^{\bullet})(T_2 - T_1)$$

$$= \frac{n}{n-1} Rm^{\bullet}(T_2 - T_1) _____ (12)$$

(حيث $m^{\bullet}$ هي الكتلة المسحوبة لوحدة زمن $= (m_a^{\bullet} - m_d^{\bullet})$)



الشكل (7)

توضح المقارنة بين المعادلات (12) و (2) انهما متطابقتان . الشغل المبذول لانضغاط كتلة الغاز $m^{\bullet}$ (او $m_d^{\bullet}$) على الانضغاط a-b ، يتم ارجاعه عندما يتمدد الغاز من C الى d . بالتالي فان الشغل المبذول لوحدة كتلة من الهواء المصرف لا يتاثر بمقياس حجم الخلوص .

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

$$\text{القدرة البيانية} = \frac{n}{n-1} p_1 v_1^{\bullet} \left\{ \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{(n-1)/n} - 1 \right\}$$

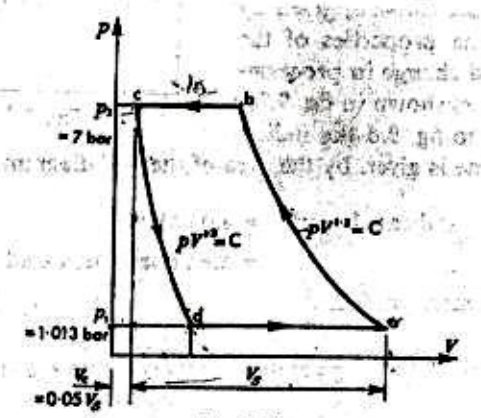
$$\therefore \text{القدرة البيانية} = \frac{n}{n-1} p_1 (v_a - v_d) \left\{ \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{(n-1)/n} - 1 \right\} _____ (13)$$

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 لاحد الجانبين يكون شوطاً للانضغاط للجانب الآخر (انظر الشكل رقم (1)).

مثال (4) :-

ضاغط هواء مفرد المرحلة مزدوج التشغيل مطلوب منه تصريف $14m^3$ من الهواء في الدقيقة مقاساً عند 1.013 bar و $15^{\circ}c$. يكون ضغط التصريف 7 bar والسرعة

300rev/min . خذ الحجم الخلوصي كـ 5% من الحجم المكتسح بأس انضـغاط مقـداره n=1.3 . احسب الحجم المكتسح للاسطوانة ، درجة حرارة التصريف والقدرة البيانية .



شكل (8)

بالرجوع للشكل (8)

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

$$\text{حجم الخلوص} \quad v_c = 0.05v_s \quad \text{و}$$

$$v_a = 1.05v_s$$

$$\text{الحجم المسحوب في الدورة} = (v_a - v_d)$$

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

(عدد الدورات في اللفة × عدداللفات في الدقيقة = عدد الدورات في الدقيقة)

الآن

$$V_a = 1.05v_s \quad , \quad V_d = V_c\left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{1}{n}} = 0.05v_s\left(\frac{7}{1.013}\right)^{\frac{1}{1.3}}$$

$$\text{i.e.} \qquad V_d = 0.221v_s$$

$$\therefore (V_a - V_d) = 1.05v_s - 0.221v_s = 0.0233m^3$$

$$\therefore V_s = \frac{0.0233}{0.829} = \underline{0.028/m^3}$$

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

و $T_1 = 15 + 273 = 288k$

$$i.e.\quad T_2 = 288\left(\frac{7}{1.013}\right)^{(1.3-1)/1.3} = 288\times 6.91^{0.230}$$

$$= 288\times 1.563 = 450k$$

∴ درجة حرارة التصريف $= 177^{\circ}c$

مستخدماً المعادلة (13) ،

القدرة البيانية $\frac{n}{n-1}P_1(V_1 - V_2)\left\{\left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{(n-1)/n} - 1\right\}$

$$= \frac{1.3}{0.3}\times\frac{1.013\times10^3\times14}{10^3\times60}\left\{\left(\frac{7}{1.013}\right)^{(1.3-1)/1.3} - 1\right\}kw$$

i.e. القدرة البيانية $= 57.65kw$

بطريقة اخرى :

$$m^{\bullet} = \frac{1.013\times14\times10^3}{0.287\times288\times10^3} = 17.16kg/\min$$

بالتالي ، مستخدماً المعادلة (12)

القدرة البيانية $= \frac{n}{n-1}m^{\bullet}R(T_2 - T_1)$

$$= \frac{1.3}{0.3}\times17.16\times0.287(450-288)$$

$$= 3459kj/\min$$

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

الكفاءة الحجمية (Volumetric efficiency) : η_v

لقد تم توضيح ان احد تاثيرات الخلوص هو خفض الحجم المسحوب الى قيمة اقل من ذلك الحجم المكتسح . هذا يعني انه ولسحب مطلوب يجب زيادة مقاس الاسطوانة فوق ذلك الذي يتم حسابه بافتراض خلوص صفري .

يتم يتم تعريف الكفاءة الحجمية كالآتي:

η_v = كتلة الهواء المصرف مقسومة على كتلة الهواء التي ستملأ الحجم المكتسح عند حالات الهواء الطليق للضغط ودرجة الحرارة ــــــــــــــــــــ(14)

او ، η_v = حجم الهواء المصرف مقاساً عند ضغط ودرجة حرارة الهواء الطليق ، مقسوما على الحجم المكتسح للاسطوانة ــــــــــــــــ(15)

يمكن توضيح ان المعادلتان (14) و(15) تكونا متطابقان ،

i.e. اذا كان تصريف الهواء الطليق F.A.D هو V ، عند P و T ، بالتالي تكون الكتلة المصرفة $m^{\bullet} = \frac{PV}{RT}$.

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

$$m_s^{\bullet} = \frac{PV_s}{RT}$$

عليه بالمعادلة (14) ،

$$\eta_v = \frac{m^{\bullet}}{m_s^{\bullet}} = \frac{pV}{RT} \times \frac{RT}{PV_s} = \frac{V}{V_s}$$

يمكن الحصول على الكفاءة الحجمية من مخطط البيان . بالرجوع للشكل (9) ،

الحجم المسحوب $= V_d - V_d = V_s + V_c - V_d$

وباستخدام المعادلة التالية ،

$$\frac{V_d}{V_c} = \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{1}{n}} \qquad i.e. \quad V_d = V_c\left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{1}{n}}$$

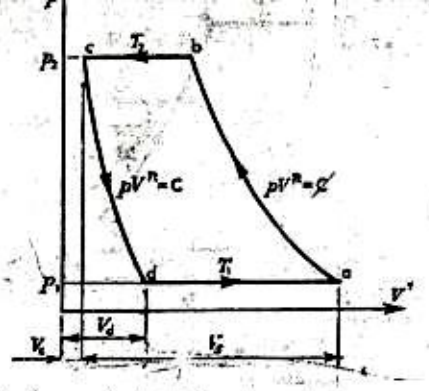
$$\therefore \text{الحجم المسحوب} \quad = V_s + V_c - V_c\left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{1}{n}}$$

$$= V_s - V_c\left\{\left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{1}{n}} - 1\right\} \text{_____(15)}$$

بالتالي مستخدماً المعادلة (15) ،

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

$$i.e. \quad \eta_v = 1 - \frac{V_c}{V_s}\left\{\left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{1/n} - 1\right\} \text{_____(16)}$$



شكل رقم (9)

من المهم ملاحظة ان هذا التعريف للكفاءة الحجمية يكون متسقا فقط مع المعادلتان (14) و(15) اذا كانت حالات الضغط ودجة الحرارة في الاسطوانة اثناء شوط السحب متطابقة مع تلك للهواء الطليق . حقيقة فأن الغاز سيتم تسخينه بواسطة جدران الاسطوانة ، وسيكون هنالك انخفاضا في الضغط نتيجة لانخفاض الضغط المطلوب لسحب الغاز الى الاسطوانة ضد مقاومة السريان الحتمية . تتطلب هذه التعديلات للحالة المثالية تطبيق بعناية اكثر الصيغ التي تم اشتقاقها مسبقاً.

كمثال ، كما في السابق اذا تم ترميز الـ F.A.D في الدورة بـ V عند P و T بالتالي :

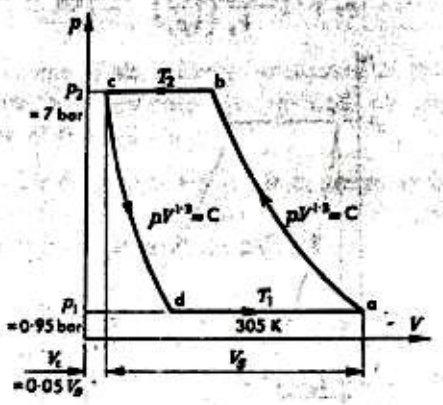
$$m = \frac{PV}{RT} = \frac{P_1(V_a - V_d)}{RT_1}$$

$$i.e.\quad F.A.D./cycle, V = (V_a - V_d)\frac{T}{T_1}.\frac{P_1}{P} \qquad \text{(17)}$$

(حيث P_1 و T_1 هما حالات السحب)

مثال (5) :

ضاغط هواء مفرد المرحلة ، مزدوج التشغيل لديه F.A.D. مقداره $14m^3/min$ مقاسا عند 1.013bar و 15°c . يكون الضغط ودرجة الحرارة في الاسطوانة اثناء السحب هما 0.95bar و 32°c . يكون ضغط التصريف 7bar واس الانضغاط والتمدد ، n=1.3 . احسب القدرة البيانية المطلوبة والكفاءة الحجمية . يكون حجم الخلوص مساوياً لـ 5% من الحجم المكتسح .



شكل (10)

يتم توضيح مخطط P-V في الشكل (10).

$m^{\bullet} = \frac{PV}{RT}$ الكتلة المصرفة في الدقيقة

(حيث الـ F.A.D. في الدقيقة هو V عند P و T)

$$i.e.\ m^{\bullet} = \frac{1.013\times14\times10^{5}}{0.287\times288\times10^{3}} = 17.16kg/\min$$

($T = 15+273 = 288K$ حيث)

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

$$i.e.\ T_2 = 305\times\left(\frac{7}{0.95}\right)^{(1.3-1)/1.3} = 305\times1.586 = 483.7k$$

(T_1=32+273=305k حيث)

من المعادلة (12) ،

$$\text{القدرة البيانية} = \frac{n}{n-1}m^{\bullet}R(T_2 - T_1)$$

$$= \frac{1.3}{0.3}\times17.16\times0.287(483.7-305)$$

$$= 3813kj/\min$$

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

كما في سابقه

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

$$i.e.\quad V_d = 0.05v_s\left(\frac{7}{0.95}\right)^{1/1.3} = 0.05V_s\times7.369^{0.769}$$

$$= 0.5V_s\times4.65 = 0.233V_s$$

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

مستخدما المعادلة (17)،

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

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

بالتالي من المعادلة (15)،

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

لوحظ انه اذا كانت الكفاءة الحجمية في المثال عالية يتم تقويمهـا باسـتخدام المعادلـة (16) بالتالي؟

$$\eta_v = 1 - \frac{V_c}{V_s}\left\{\left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{1}{n}} - 1\right\} = 1 - \frac{0.05V_s}{V_s}\left\{\left(\frac{7}{0.95}\right)^{\frac{1}{1.3}} - 1\right\}$$

$$i.e.\ \eta_v = 1 - 0.05(4.65 - 1) = 1 - 0.183 = 0.817 \text{ او } 81.7\%$$

يكون هنالك فرقاً معتبرا بين القيمتين ، بما ان الاجابة الاخيرة تتجاهل الفـرق فـي درجـة الحرارة والضغط بين حالات الهواء الطليق وحالات السحب .

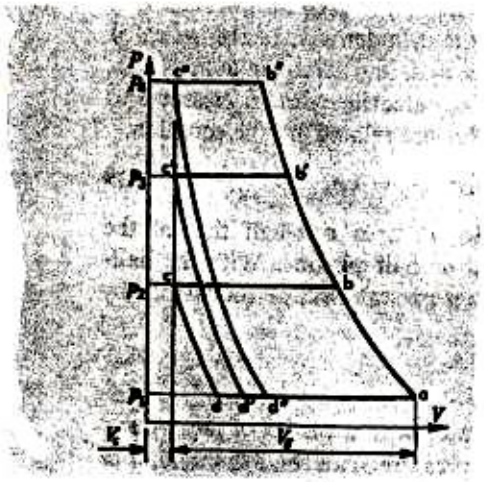
الانضغاط متعدد المرحلة :(Multi - Stage Compression)

لقد تم سابقا تأسيس أنه ولشغل أدنى يجب أن يكون اجراء الانضغاط ثابـت درجـة الحرارة . عموما فان درجة الحراره بعد الانضغاط تعطى بالمعادلـة $T_2 = T_1\left(P_2/P_1\right)^{(n-1)/n}$

تتزيد درجة حراره التصريف بزيادة نسبة الضغط . اضافيا ، من المعادلة (16)،

$$\eta_v = 1 - \frac{V_c}{V_s}\left[\left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{1}{n}} - 1\right]$$

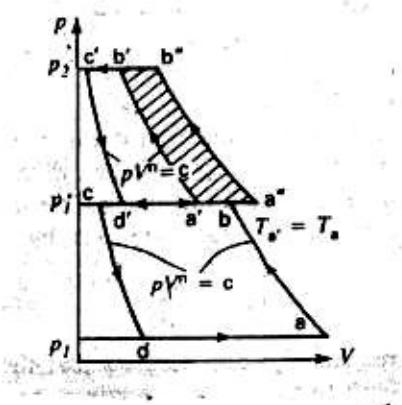
يمكن ملاحظة أنه كلما زادت نسبة الضغط نقصت الكفاءة الحجمية . هذه يتم توضحيها فـي الشكل رقم (11) أدناه



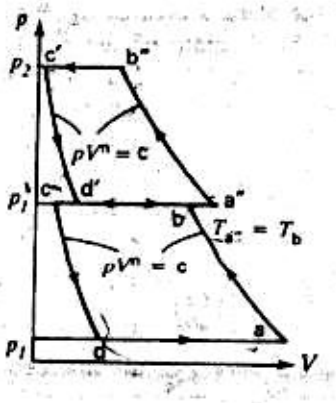
شكل رقم (11)

لإنضغاط من p_1 الى p_2 تكون الدورة abcd و الـF.A.D للدورة $V_a - V_d$ ؛ لانضغاط مـن p_1 الى p_3 تكون الدورة $ab'c'd'$ والـF.A.D للدورة $V_a - V_{d'}$ ، للانضغاط من p_1 الى p_4 تكون الدورة $ab''c''d''$ ويكون الـF.A.D للـدورة $V_a - V_{d''}$. عليـه لـــ F.A. D مطلوب سيزيد مقاس الاسطوانة كلما زادت نسبة الضغط .

يمكن تحسين الكفاءة الحجمية بتنفيذ الانضغاط فى مرحلتين . بعد المرحلة الاولى للانضغاط يتم تمرير المائع الى اسطوانة أصغر يتم فيها انضغاط الغاز الى الضغط النهائى المطلـــوب . اذا كانت هنالك مرحلتان للماكينة سيتم تصريف الغاز عند نهاية المرحلة ، لكن يمكن تصريفه الى اسطوانة ثالثة لنسب ضغط أعلى . تكون أسطوانات المراحل المتعاقبة متناسبة لاخذ حجم الغاز المصرف من المرحلة السابقة .

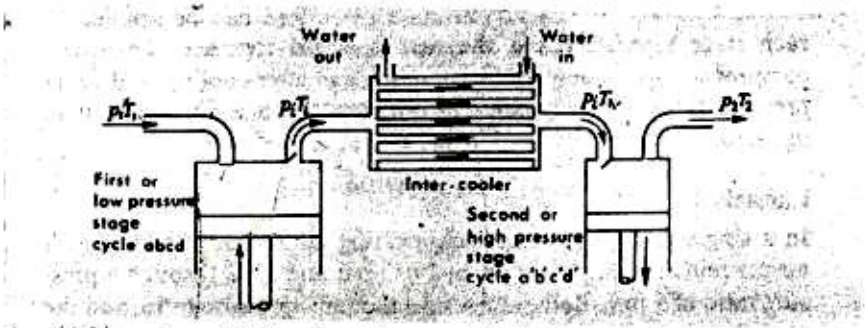


شكل (13a)



شكل (12)

شكل (13b)



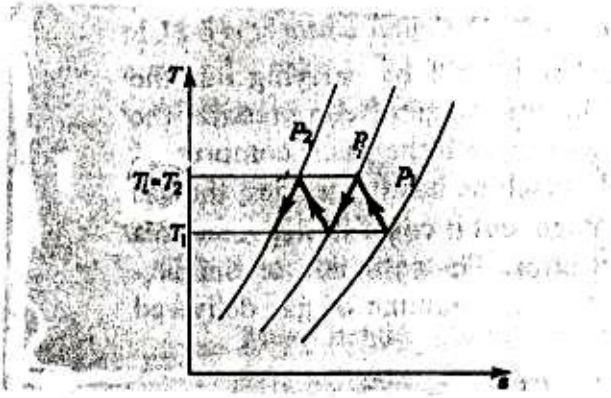
يتم توضيح مخطط البيان لماكينة ذات مرحلتين فى الشكل رقـم (12) . فـى هـذا المخطط يتم افتراض أن اجراء التصريف من المرحلة الاولى أو مرحلة الضغط المـنخفض واجراء السحب للمرحلة الثانيه أو مرحلة الضغط العالى ، يكونا عند نفس الضغط .

يمكن الحصول على انضغاط ثابت لدرجة الحراره مثالى فقط اذا كان التبريد المثالى متصلا . هذه من الصعوبة بمكان الحصول عليها اثناء الانضغاط العادى . بانضغاط متعدد المرحلة يتم تبريد الغـاز كلمـا يـتم نقلـه مـن اسـطوانة الـى اخـرى ، بتمريـره خـلال مبـرد بينى(intercooler).اذا كان التبريد كاملا ، سيدخل الغاز المرحلة الثانيه عند نفـس درجـة الحراره التى دخل بها المرحلة الاولى . يتم توضيح الشكل المتحصل عليه بالتبريـد البينـى بالمساحة المظللة فى الشكل رقم 13a ، ومخطط المحطة فى الشكل رقم 13b . يتم توضـيح مخططى البيان abcd و $a'b'c'd'$ بضغط مشترك ، p_i . هذا لايحدث فى ماكينة فعليـه

لان هنالك هبوط صغير فى الضغط بين الاسطوانتين . يمكن تركيب مبرد بعدى (after cooler) بعد اجراء التصريف لتبريد الغاز . تعطى درجات حرارة التصريف من المرحلتين بـ

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

على الترتيب . هذا يفترض أن الغاز يتم تبريده فى المبرد البينى الى درجة حراره المدخل ، ويسمى بالتبريد الكامل . لحساب الـ i.p يمكن تطبيق المعادلات (12) و(13) لكل مرحلة بانفصال واضافة النتائج لبعضها . يتم تمثيل الانضغاط ثنائى المرحلة بتبريد بينى كامل وتبريد بعدى ، ونسب ضغوط متساوية فى كل مرحلة على مخطط T-S فى الشكل رقم (14).



الشكل (14)

مثال 6:-

فى ضاغط هواء ترددى مفرد لتشغيل – ثنائى المرحلة يتم انضغاط 4.5kg من الهواء فى الدقيقة من 1.013bar و $15^{\circ}c$ خلال نسبة ضغط مقدارها 9/1 . كلا المرحلتين لها نفس نسبة الضغط ، ويكون قانون الانضغاط والتمدد فى كلا المرحلتين هو $PV^{1.3} = constant$. اذا كان التبريد البينى كاملا ، أحسب القدرة البيانيه والحجوم المكتسحة المطلوبة للاسطوانة . افترض ان حجوم الخلوص لكلا المرحلتين هما 5% من حجومهاالمكتسحه وأن الضاغط يشتغل بسرعة مقدارها 300rev/min .

يتم توضيح مخططا البيان متراكبين فى الشكل رقم (15) . تكون دورة مرحلة الضغط المنخفض هى abcd ودورة الضغط العالى هى $a'b'c'd'$

$$\therefore P_2 = 9P_1$$

$$P_i / P_1 = P_2 / P_i$$

$$\therefore P_i^2 = P_1 P_2 = P_1 9P_1$$

$$\therefore P_i^2 = 9.P_1^2 \quad \therefore \frac{P_i}{P_1} = \sqrt{9} = 3$$

مستخدما المعادلة التالية:-

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

(حيث $T_1 = 15 + 273 = 288K$ ، و T_1 هى درجة حراره الهواء الداخل للمبرّد البينى) .

$$i.e. \quad T_i = 288 \times 1.289 = 371K$$

الان بما أن n، $\dot{m}$ ، وفرق درجة الحرارة هى نفسها لكلا المرحلتين ، بالتالى فأن الشغل المبذول فى كل مرحلة هو نفسه ، i.e. ، مستخدما المعادلة (12)،

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

$$= 2 \times \frac{1.3}{1.3-1} \times 4.5 \times 0.287(371 - 288)$$

$$= 930 kj/\min$$

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

يلعب معدّل سريان الكتلة في الدورة دور

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

يتم تمرير الكتلة خلال كل مرحلة على الترتيب ،

لاسطوانة الضغط المنخفض ، بالرجوع للشكل (16) ،

$$V_a - V_d = \frac{\dot{m} R T_1}{P_1} = \frac{0.015 \times 287 \times 288}{1.013 \times 10^5} = 0.0122 m^3/cycle$$

مستخدما المعادلة (16) ،

$$\eta_v = \frac{V_a - V_d}{V_s} = 1 - \frac{V_c}{V_s}\left[\left(\frac{P_i}{P_1}\right)^{\frac{1}{n}} - 1\right] = 1 - 0.05\left(3^{0.769} - 1\right)$$

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

$$\therefore V_s = \frac{V_a - V_d}{0.934} = \frac{0.0122}{0.934} = 0.0131 m^3/cycle$$

i.e. الحجم المكتسح لاسطوانةالضغط المنخفض $= 0.0131 m^3$

لمرحلة الضغط العالى ، يتم سحب كتلة مقدارها 0.015kg/cycle عند 15c° وضغط مقداره

$$P_i = 3 \times 1.013 = 3.039 bar$$

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

$$= 0.00406 m^3/cycle$$

مستخدما المعادلة (16) لمرحلة الضغط العالى ،

$$\eta_V = 1 - \frac{V_C}{V_S}\left[\left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{1}{n}} - 1\right]$$

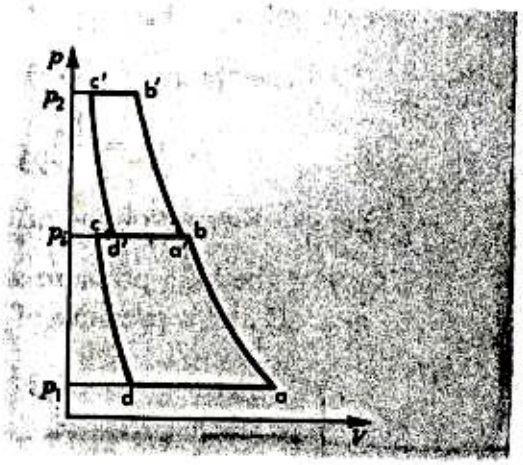
وبما أن V_C/V_S هى نفسها كما لمرحلة الضغط المخفض وايضا $P_2/P_1 = P_1/P_1$ وبالتالى η_V تكون 0.934 كما فى عاليه .

∴ الحجم المكتسح لمرحلة الضغط العالى $= \dfrac{0.00406}{0.934} = 0.00436 m^3$

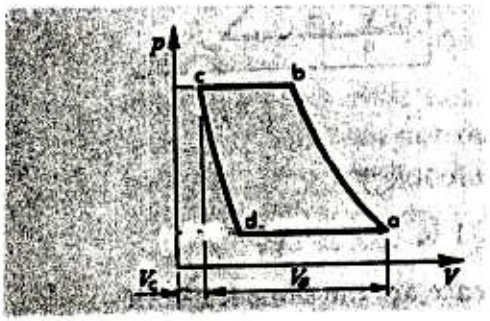
لاحظ أن نسبة الخلوص هى نفسها فى كل أسطوانة، ودرجات حراره السحب هى نفسها بما أن التبريد البينى يكون كاملاً ، عيه فان الحجوم المكتسحة تكون فى نسبة ضغوط السحب.

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

شكل (15)



شكل (16)

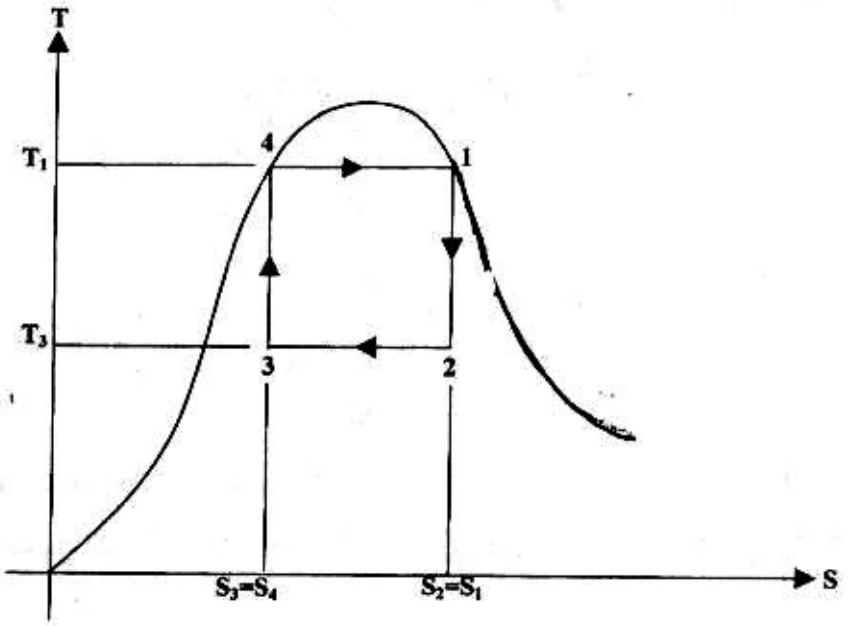


الفصل السابع
محطات القدرة البخارية

7-محطات القدرة البخارية {steampower plants} :-

أ/ دورة كارنو :- {carnot cycle}

هي الدورة الأكبر كفاءة بالنسبة لدرجات حرارة المصدر والغاطس . يمكن تطبيقها في حالة الغازات والبخار . يمكن متابعة دورة كارنو للبخار الرطب في الشكل رقم (1) أدناه ، الذي يمكن تلخيص الملامح الرئيسية له في الآتي :-



شكل رقم (1)

1-4 تسخين بثبات درجة الحرارة والضغط .e.g الفيزانات ، المولدات والمفاعلات النووية .

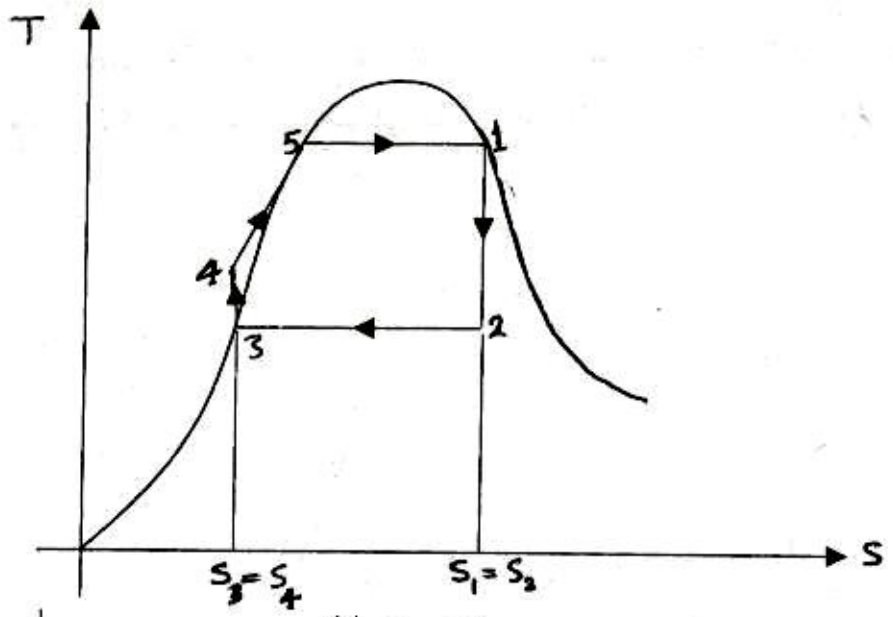
2-1 يتمدد البخار بإجراء انعكاسي ثابت القصور الحراري من الضغط العالي ودرجة الحرارة العالية إلى الضغط المنخفض وبهذا يكون قد أنتج شغلاً وهو الغرض الرئيسي من هذه الدورة .e.g الآلة البخارية أو التوربين البخاري .

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 الطلمبة أو الضاغط . وتتواصل الدورة .

ب/ دورة رانكن {Rankine Cycle} :-

يتم توضيح الدورة في الشكل رقم (2) أدناه .



شكل رقم (2)

1-4 الغلاية ، 5-4 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 .

1-5 تسخين بثبات درجة الحرارة والضغط .

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

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

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

من معادلة طاقة السريان المستقر (S.S.F.E.E) أدناه ،

$$h_1 + \frac{c_1^2}{2} + z_1 g + Q = h_2 + \frac{c_2^2}{2} + z_2 g + W \quad \text{_____(1)}$$

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

وأجعل التغير في طاقة الوضع يساوي صفراً i.e. $Z_2 g - Z_1 g = 0$

حيث تصبح المعادلة (1) كالآتي :-

$$h_1 + Q = h_2 + W _____ (2)$$

الغلاية :- من المعادلة (2) ،

$Q_{supp} = Q_{451} = (h_1 - h_4) + W$ الحرارة المكتسبة

وبما أن $W = 0$ ، $\therefore Q_{451} = h_1 - h_4$

التوربين :- من المعادلة (2) ،

$Q + (h_1 - h_2) = W_{o/p}$، شغل خرج التوربين .

وبما أن $Q = 0$ (تمدد أديباتي انعكاسي) ، $s_1 = s_2$

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

المكثف :- من المعادلة (2) ،

$Q_{rej} = Q_{23} = (h_2 - h_3) + W$، الحرارة المفقودة

وبما أن $W = 0$ ،

$\therefore Q_{rej} = Q_{23} = h_2 - h_3$ الحرارة المفقودة في المكثف

المضخة :- من المعادلة (2) ،

$\therefore W_{i/p} = W_{34} = (h_4 - h_3) + Q$، شغل الدخل للمضخة

وبما أن $Q = 0$ (تمدد أديباتي انعكاسي) ، $s_3 = s_4$

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

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

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

إذا تم تجاهل شغل مضخة التغذية ، نظراً لأن شغل خرج التوربين كبير جداً مقارنة بشغل المضخة ، فـــإن المعادلة (3) تصبح كالآتي ،

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

كفاءة دورة رانكن ، η_R = صافي شغل الخرج / الحرارة المكتسبة في الغلاية

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

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

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

وإذا تم اعتبار مضخة التغذية ،

$$\therefore W_{34} = h_4 - h_3$$

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

$$\therefore h_4 - h_3 = \nu(p_4 - p_3) \quad \text{_____ (6)}$$

لاثبات المعادلة (6) عاليه ، من معادلة طاقة اللاسريان

$$dQ = du + dw$$

ولأي إجراء انعكاسي ، $dw = pd\nu$

وللإجراء الاديباتي الانعكاسي ،

$$dQ = du + pd\nu = 0$$

وبما أن $h = u + p\nu$

بتفاضل المعادلة عاليه نحصل على ،

$$dh = du + pd\nu + \nu dp$$

وبإعادة ترتيبها،

$$du + pd\nu = dh - \nu dp$$

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

$$\therefore dh = \nu dp$$

بتكامل المعادلة عاليه فيما بين الحالتين 3 و4

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

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

∴ شغل دخل المضخة ،

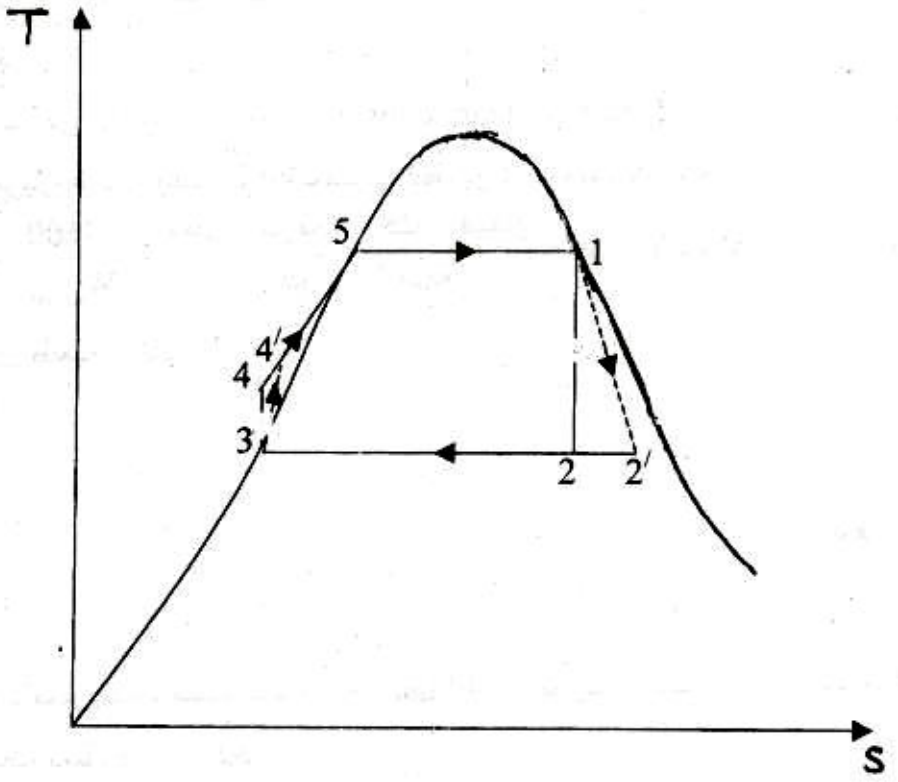
$$W_{34} = h_4 - h_3 = \nu(p_4 - p_3)$$

(تؤخذ قيمة ν من جداول البخار عند ضغط p_3)

ويمكن أخذها كقيمة متوسطة مساوية لـ $0.001 m^3/kg$

نسبة الكفاءة :- {Efficiency Ratio}

نسبة الكفاءة = كفاءة الدورة الفعلية / كفاءة دورة رانكن



شكل رقم (3)

في الشكل رقم (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 كالآتي :-

كفاءة ثابت القصور الحراري للتوربين (Isenfropic efficiency) = الشغل الفعلي / 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 ،

كفاءة ثابت القصور الحراري للضاغط = الشغل ثابت القصور الحراري / الشغل الفعلي

$$\text{i.e. } \eta_{isen,C} = \frac{W_{34}}{W_{34'}} = \frac{h_4 - h_3}{h_{4'} - h_3}$$

نسبة الشغل :- {Work Ratio}

يتم تعريفها كالآتي ،

صافي الشغل = WR نسبة الشغل

إجمالي الشغل

الاستهلاك النوعي للبخار :- (specific steam consumption)

هو معدل سريان البخار بالـ kg/hالمطلوب لتطوير قدرة مقدارها 1kw .

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

بتجاهل شغل طلمبة التغذية ،

$$h_4 - h_3 = 0$$

$$\therefore w = h_1 - h_2$$

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

مثال (1) :-

i / يتم إمداد بخار جاف مشبع عند ضغط 40 bar إلى توربينة حيث يكون ضغط المكثف 0.035 bar. إذا كانت المحطة تعمل بدورة رانكن ،

أحسب لكل kg من البخار الآتي :-

1/ الشغل الناتج متجاهلاً شغل مضخة التغذية .

2/ الشغل المطلوب لمضخة التغذية .

3/ كمية الحرارة المنتقلة إلى ماء التبريد بالمكثف ، وكمية ماء التبريد المطلوبة للمكثف إذا كان الارتفاع في درجة حرارة الماء هو 5.5k.

4/ كمية الحرارة المكتسبة .

5/ كفاءة دورة رانكن .

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

ii / لنفس حالات البخار السابقة ، أحسب الآتي :-

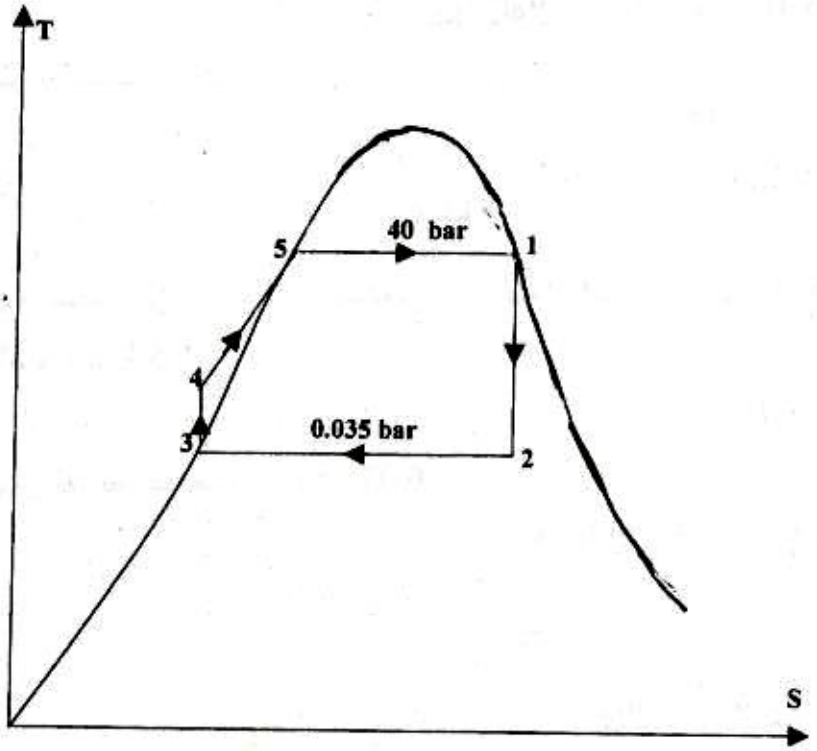
7 / كفاءة دورة كارنو .

8/ الاستهلاك النوعي للبخار .

لدورة كارنو تعمل في البخار الرطب .

الحل :- من الشكل رقم (4) أدناه ،

أ /



الشكل (4)

1/ الشغل الناتج متجاهلاً شغل مضخة التغذية ،

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

من جدول البخار المشبع عند ضغط 40 bar ،

$h_1 = h_g = 2801$ kj/kg

$s_g = s_1 = s_2 = 6.07$ kj/kgk

وعند ضغط 0.035 bar ،

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

$sf_2 = 0.391 kj/kgk, sfg_2 = 8.13 kj/kgk$

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

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

$\therefore h_2 = hf_2 + x_2 hfg_2$

$hf_2 = 112 kj/kg \ , \ hfg_2 = 2438 kj/kg$

$\therefore h_2 = 112 + 0.7 \times 2438 = \underline{1818.6} kj/kg$

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

2/ الشغل المطلوب لمضخة التغذية ،

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

$= \dfrac{1}{\ell}(p_4 - p_3) = \dfrac{0.001(40 - 0.035) \times 10^5}{10^3} = \underline{\underline{4}} kj/kg$

3/ كمية الحرارة المنتقلة إلى ماء التبريد بالمكثف ، وكمية ماء التبريد المطلوبة للمكثف إذا كان الارتفاع في درجة حرارة الماء هو 5.5 k .

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

من جداول البخار المشبع عند ضغط 0.035 bar و

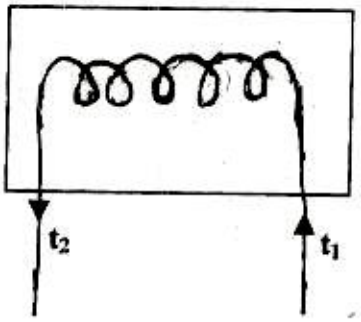
$T_2 = T_s = 26.7^\circ C = 26.7 + 273 = \underline{\underline{299.7}} k$

$s_2 = s_1 = 6.07 kj/kgk$

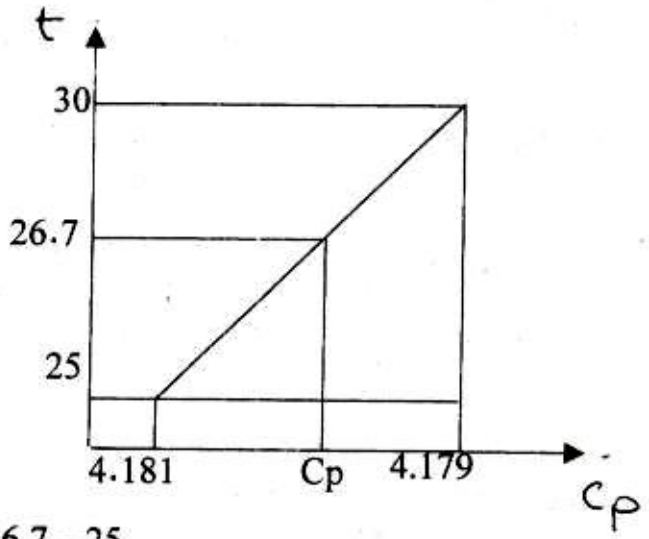
$s_3 = sf = 0.391 kj/kgk$

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

أيضاً $Q = m\, cp\, dT$.



يتم إيجاد قيمة Cp من جداول البخار المشبع عند درجة حرارة $26.7^\circ C$ باستخدام أسلوب الاستكمال (Interpolation) كالآتي ،



$$\therefore c_p = 4.181 + \frac{26.7-25}{30-25}(4.179-4.181) = \underline{4.18}\,kj/kgk$$

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

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

4 / كمية الحرارة المكتسبة ،

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

باستخدام المعادلة التالية لإيجاد h_4

$$W_{34} = h_4 - h_3 = \nu(p_4 - p_3) = 4\ kj/kg$$

من جدول البخار المشبع عند ضغط 0.035 bar ،

$$h_3 = h_f = 112kj/kg$$

$$\therefore h_4 = 4 + 112 = 116kj/kg$$

$$\therefore Q_{supp} = 2801 - 116 = \underline{2685}\,kj/kg$$

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)

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

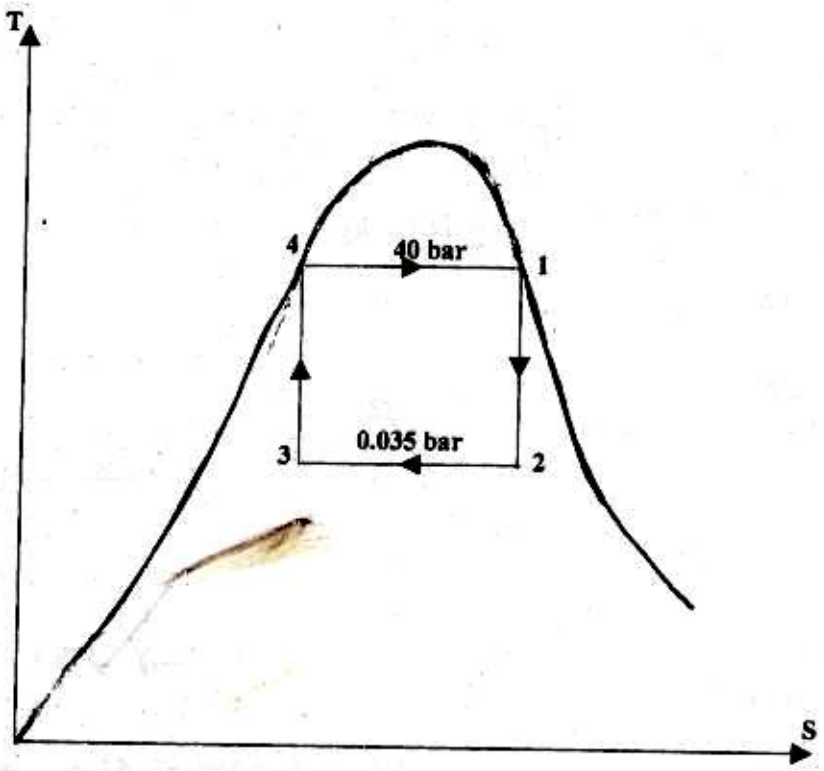
$$W_{net\,o/p} = W_{12} - W_{34}$$

بما ان $W_{34} = 0$

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

$$SSC = \frac{3600}{982.4} = \underline{3.66}\,kg/kwh$$

/ ii



7 / كفاءة دورة كارنو ،

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

من جداول البخار المشبع عند ضغط 40 bar ،

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

$$= 250.3 + 273 = 523.3k$$

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

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 جدول البخار المشبع عند ضغط 40 bar ،

$$h_4 = h_f = \underline{1087}\,kj/kg$$

$$s_4 = s_3 = s_f = \underline{2.797}\,kj/kgk$$

من جدول البخار المشبع عند ضغط 0.035 bar ،

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

$$sf_3 = 0.391\,kj/kgk \quad , \quad sfg_3 = 8.13\,kj/kgk$$

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

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

$$\therefore h_3 = hf_3 + x_3 hf_{g3}$$

$$hf_3 = 112\,kj/kg \quad , \quad hfg_3 = 2438\,kj/kg$$

$$\therefore h_3 = 112 + 0.296 \times 2438 = 833.65\,kj/kg$$

$$W_{34} = h_4 - h_3 = 1087 - 833.65 = 253.35\,kj/kg$$

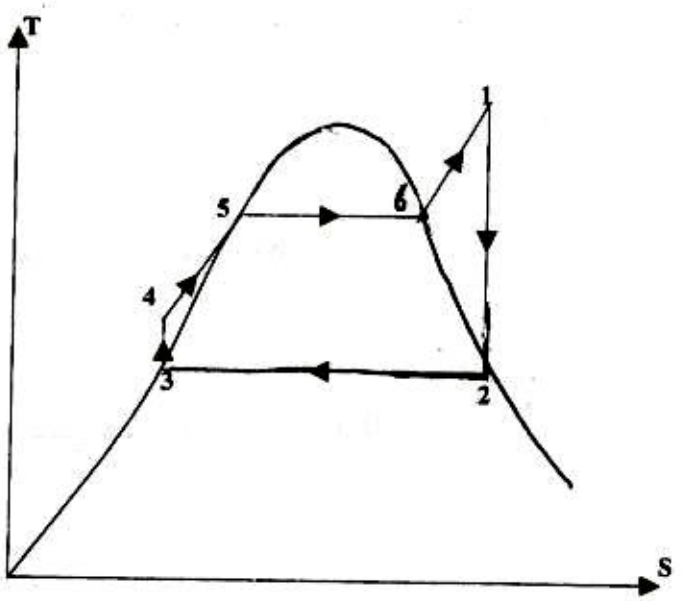
$$W_{net}\,o/p = 982.4 - 253.35 = 729.05\,kj/kg$$

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

تعديلات دورة رانكن :-{modificationsof Rankine cycle}

أ / دورة رانكن مع التحميص :- {Rankine cycle with superheat}

يمكن زيادة درجة 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 رقم (5)) أدناه .



شكل رقم (5)

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 وتمريره خلال مجموعة من المواسير بالقرب من مواسير التحميص أو باستخدام فرن إعادة تسخين (reheater) يوجد بالقرب من التوربينة .

من مخطط T-S أدناه شكل رقم (6) 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 :-

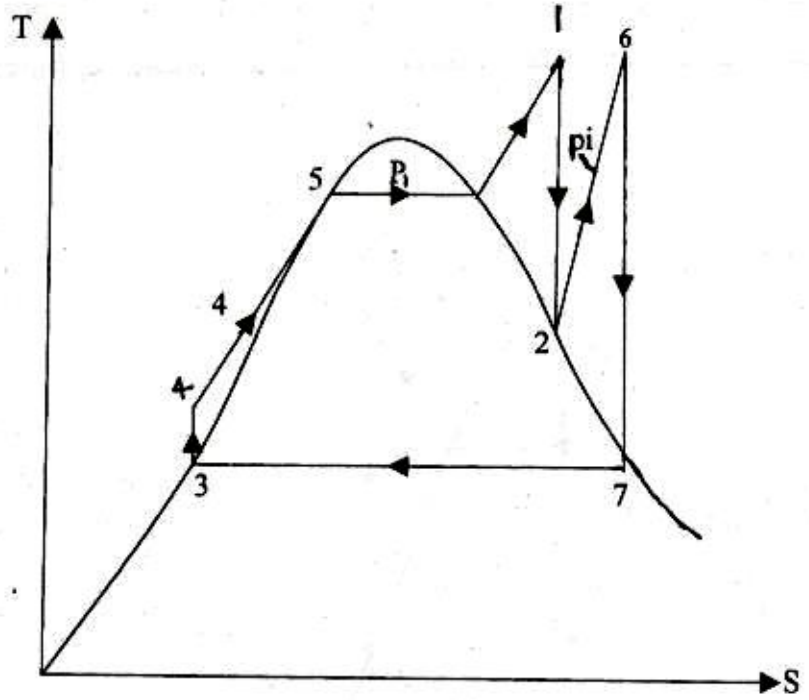
1/ تخفيض الرطوبة عند مخرج التوربين بحيث لا تتعدى نسبتها 10% .

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

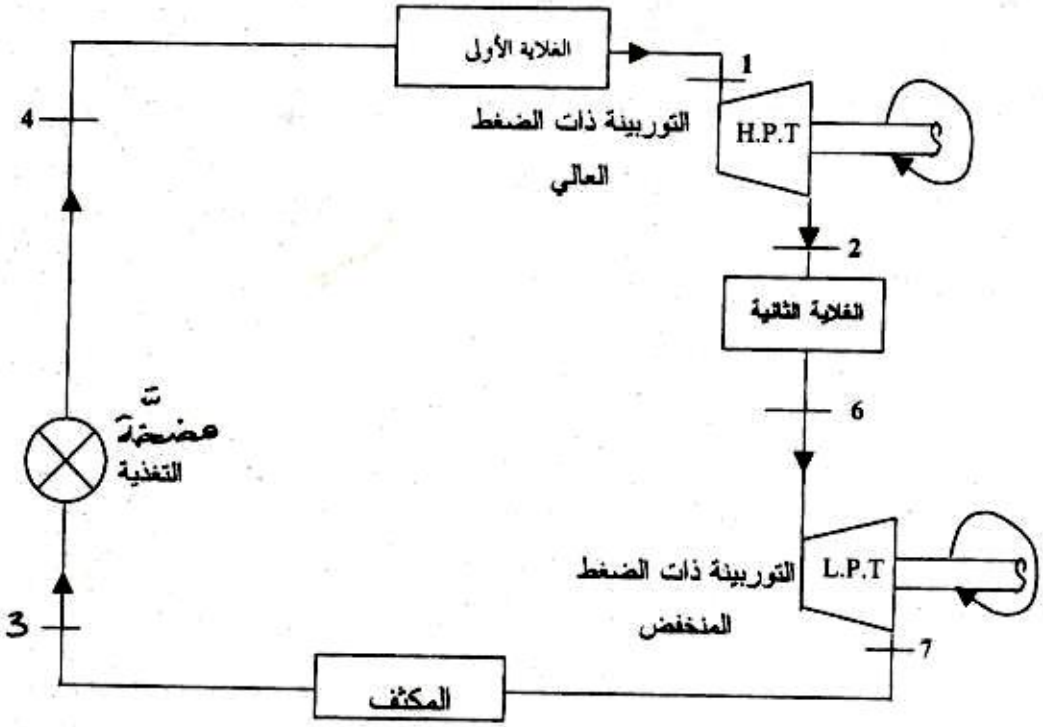
وذلك لأن التمدد إذا تم في مرحلة واحدة فان البخار الخارج من التوربينة سيحتوي على رطوبة ، عليه سيتم التمدد على مرحلتين .

3/ تحسين الاستهلاك النوعي للبخار

يتم توضيح المخطط الكتلي لدورة إعادة التسخين في الشكل رقم (7) أدناه .



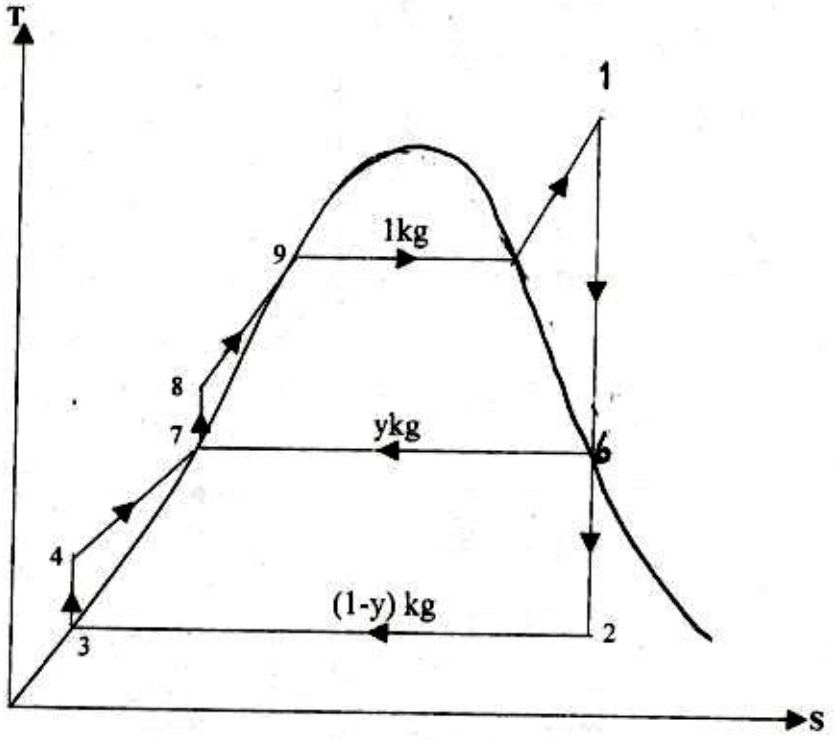
شكل رقم (6)



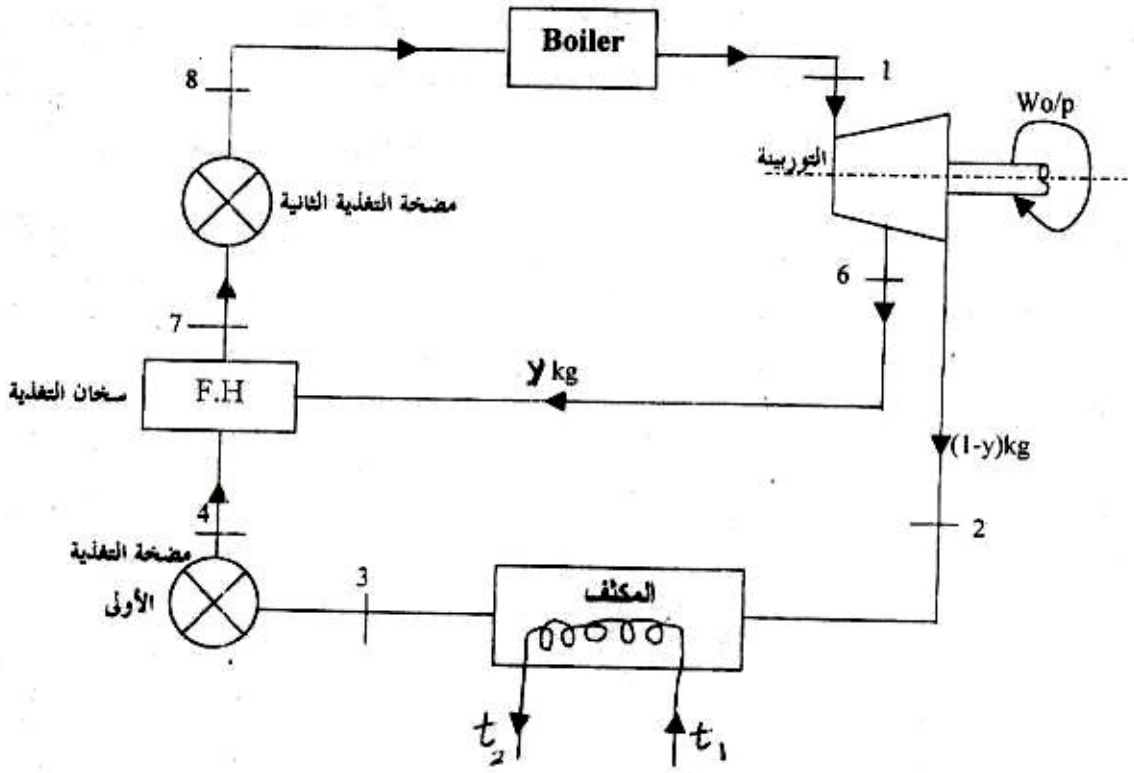
شكل رقم (7) مخطط دورة إعادة التسخين

ج / دورة الاسترجاع {Regenerative cycle} أو الدورة التجديدية :-

هي الدورة التي يتم فيها زيادة درجة حرارة الماء الداخلة إلى الغلاية وذلك بتنزيف بعض البخار عند ضغط وسيط من داخل التوربينة وخلطة مع الماء الخارج من المكثف في سخان تغذيـــة او خـــلاط {feed heater or mixer } يتم توضيح مخطط T-S والمخطط الكتلي للدورة فـــي الأشـــكال (8) و(9) علـــى الترتيب .



شكل رقم (8)



شكل رقم (9)

يتمدد البخار من الحالة (1) إلى الحالة (2) خلال التوربين . وعند ضغط وسيط P6 يتم استنزاف كمية من البخار من التوربينة بمقدار y kg لكل 1kg 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 ،

درجة حرارة النزيف $t_{bleed} = \frac{t_5 + t_2}{2}$

مثال(2):-

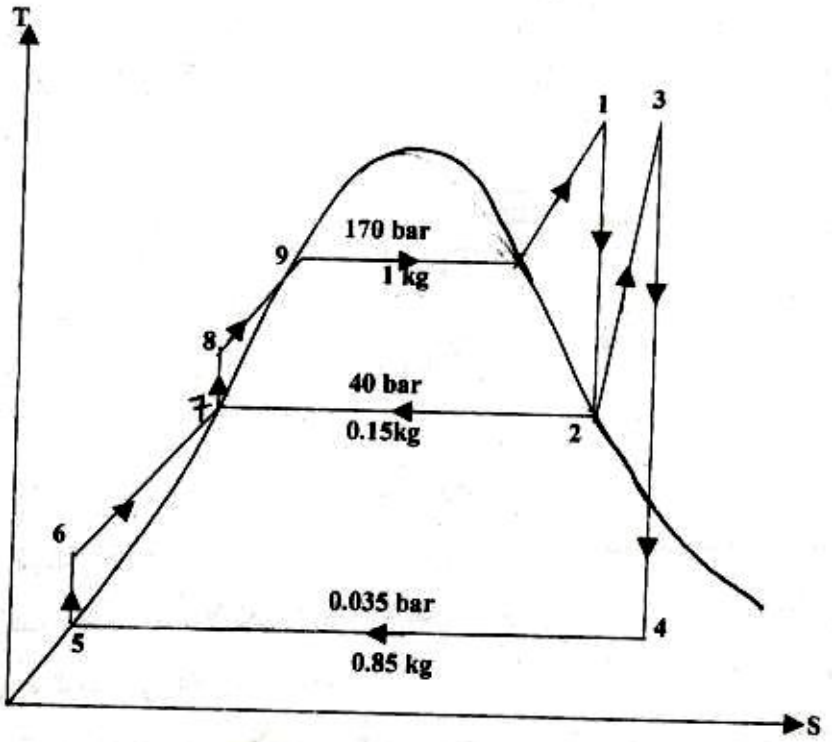
محطة توليد قدرة كهربائية تعطي خرجاً مقداره 200 MW . يكون الضغط المحمص الخارج من الغلاية هو 170 bar ودرجة الحرارة 600°C . بعد التمدد خلال توربينة المرحلة الأولى إلى ضغط 40 bar ، يتم استنزاف 15% من البخار إلى سخان التغذية ، والمتبقي يتم إعادة تسخينه إلى درجة حرارة

$600^{\circ}C$ ومن بعد يتمدد خلال توربينة المرحلة الثانية لضغط مكثف مقداره 0.035 bar.للحسابات الأوليـــة افترض أن الدورة الفعلية لها نسبة كفاءة مقدارها 70% ، وتكون الكفاءة الميكانيكية والكهربائية هي 95% . أحسب أقصى معدل سريان إلى الغلاية بالـــ kg/h .

الحل :-

$$Po/p = 200MW = 200 \times 10^6\,W$$

$$= \underline{200 \times 10^3\,KW}$$



من جدول البخار المحمص عند ضغط 170 bar ودرجة حرارة $600^{\circ}C$

$$h_1 = 3564\,kj/kg$$

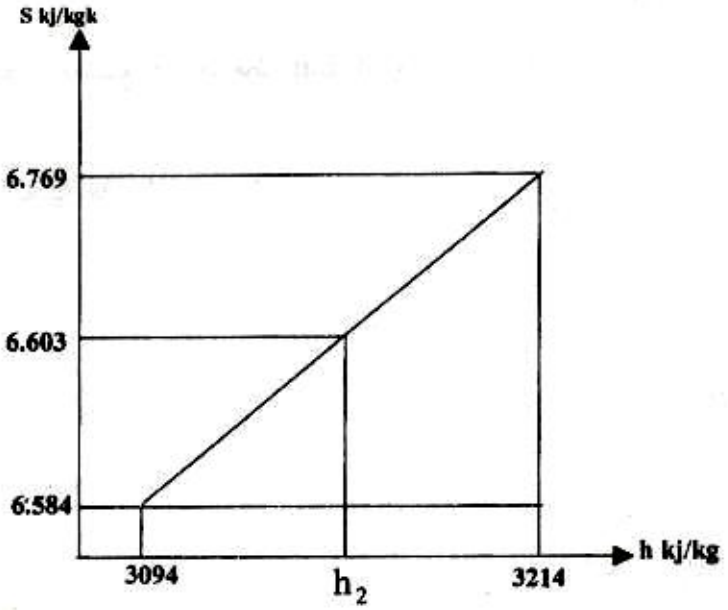
$$S_1 = 6.603\,kj/kgk = S_2$$

من جدول البخار المشبع عند ضغط 40 bar،

$$S_g = 6.07\,kj/kgk < S_2$$

عليه سيكون البخار محمصاً عند الحالة (2)

من جداول البخار المحمص عند ضغط 40 bar وقصور حـــراري 6.603 kj/kgk وباســتخدام طريقــة 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 المحمص عند الضغط 40 bar ودرجة حرارة 600°C ،

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

$$S_3 = S_4 = 7.368\text{kj/kgk}$$

من جدول البخار المشبع عند ضغط 0.035 bar ،

$$S_g = 8.521\text{kj/kgk} > S_4$$

عليه 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 0.035 bar ،

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

شغل مضخة التغذية الأولى ،

$$W_{56} = h_6 - h_5 = v(p_6 - p_5)$$

$$= \frac{0.001(40 - 0.035) \times 10^5}{10^3} = 4 kj/kg$$

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

من جداول البخار المشبع عند ضغط 40 bar ،

$$h_7 = h_f = 1087 kj/kg$$

شغل مضخة التغذية الثانية ،

$$W_{78} = h_8 - h_7 = v(p_8 - p_7)$$

$$= \frac{0.001(170 - 40) \times 10^5}{10^3} = 13 kj/kg$$

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

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

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

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

$$= 1(3564 - 3106.3) + 0.85(3674 - 2208.7) - 0.85 \times 4 - 1(13) = \underline{1686.8} kj/kg$$

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

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

$$= 2946.55 kj/kg$$

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

نسبة الكفاءة = كفاءة الدورة الفعلية = 0.7

كفاءة دورة رانكن

كفاءة الدورة الفعلية ، $\eta_{act} = 0.7 \times \eta_R = 0.7 \times 0.572 = 0.4$ او $\underline{40\%}$

صافي الشغل الفعلي في الدورة ،

$$W_{net\,o/p}\,act = \eta . Q_{supp} = 0.4 \times 2946.55 = \underline{1178.6} kj/kg$$

$$\therefore ssc = \frac{3600}{act.W_{net\,o/p}} = \frac{3600}{1178.6} = \underline{3.054} kg/kwh$$

معطى $\eta_{mech,elect} = 0.95$

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

بالتحليل البعدي ، معدل السريان إلى الغلاية m^* ،

$$m^{\bullet} = P_{\text{مرجع}} \times SSC = kw \times \frac{kg}{kwh} = kg/h$$

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

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

مسائل :-

1/ يتم إمداد بخار لتوربينة ذات مرحلتين عند 40 bar و 350°C يتمدد البخار في التوربينة الأولى حتى يصبح جافاً مشبعاً ، يتم إعادة تسخينه إلى 350°C ومن ثم يتمدد خلال توربينة المرحلة الثانية .

يكون ضغط المكثف 0.035 bar .أحسب شغل الخرج والحرارة المكتسبة لكل kg من البخار للمحطة ، مفترضا إجراءات مثالية ومتجاهلاً شغل طلمبة التغذية .أحسب أيضاً الاستهلاك النوعي للبخار وكفاءة الدورة .

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

2/ إذا كانت لإجراءات التمدد في التوربينات للمسألة (1) كفاءات ثابت 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 مشبع عند 40 bar ، ويستنفذ إلى مكثف عند 0.07 bar . يتم ضخ البخار المتكثف إلى ضغط 3.5 bar .عنده يتم خلطه مع البخار المستنزف من التوربينة عند 3.5 bar . يتم من بعد ضخ الماء الناتج الذي يكون عند درجة حرارة التشبع الى 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 40 bar و 500°C . يتمدد البخار في المرحلة الأولى بإجراء ثابت القصور الحراري إلى ضغط 3.0 bar 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 0.06 bar .يتطلب أن تكون قدرة الناتج الثانوي للمحطة مساوية لـ 6000kw أحسب مقدار البخار المطلوب من الغلاية ، والحرارة المكتسبة بالـ kw . تجاهل شغل مضخة التغذية ، وافترض أن البخار المستنزف يعود عند درجة حرارة التشبع ليختلط اديباتياً مع البخار المتكثف من المكثف . (15,000kg/h ; 15620kw) .

الفصل الثامن
التوربينات الغازية

8-التوربينات الغازية :-{Gas turbines}

تستخدم التوربينات الغازية عموماً في أيامنا الحاضرة في مجال صناعة الطائرات ، ويرجع الفضل لإختراع أول محرك نفاث للعالم (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 الكهربية وفي محركات الدفع البحري ولكن يكون استخدام محركات الزيت والتوربينات البخارية أكثر تكراراً في مثل هذه المجالات .

عدم الكفاية لإجراءات الانضغاط والتمدد يكون أكبر في الوحدات التوربينية الصغيرة ولذلك من الضروري استخدام مبادل حراري لتحسين الكفاءة الحرارية للتوربينات الغازية حتى تستطيع منافسة محركات الزيت الصغيرة والمحركات البترولية من الناحية الاقتصادية .

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

استخدام احتراق ثابت الضغط مع ضاغط دوار يتم أدارته بواسطة توربينة دوارة مركبة في عمود مشترك يُعطى توافقاً مثالياً لسريان كتلة مستقر في مدى تشغيل و اسع.

الدورة العملية للتوربينة الغازية :-

(The practical Gas turbine cycle)

وحدة التوربينة الغازية الأساسية الأكثر استخداما هي تلك التي تعمل بدورة مفتوحة الحلقة وتتكون من ضاغط دوار وتوربينة مركبين في عمود مشترك كما هو واضح في الشكل التخطيطي أدناه (شكل رقم (1)) يتم سحب الهواء إلى الضاغط C وبعد الانضغاط يُمرَّر إلى غرفة الاحتراق CC . يتم إمداد الطاقة في غرفة الاحتراق برش الوقود في جدول من الهواء ، وتتمدد الغازات الساخنة الناتجة خلال التوربينة T، إلى الهواء الجوي . ولتحقيق صافي شغل خرج من الوحدة ، يجب أن يكون شغل الخرج الإجمالي الناتج من التوربينة اكبر من الشغل المطلوب لتشغيل الضاغط وتجاوز الفقد الميكانيكي في الإدارة .

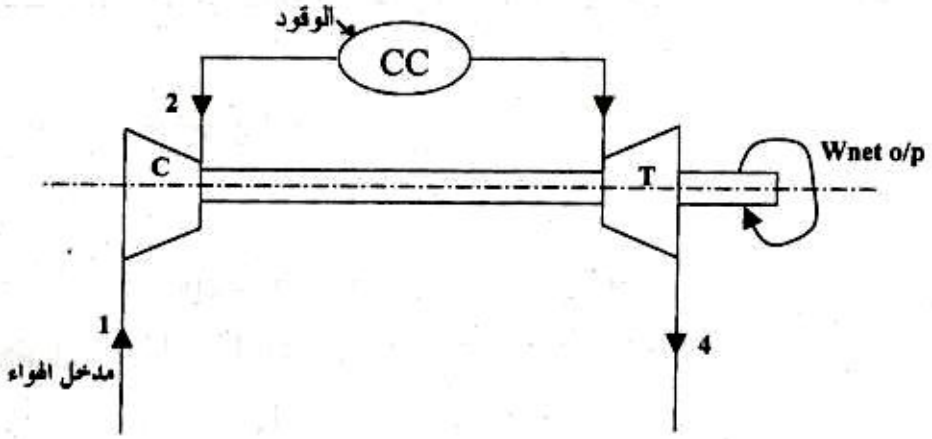
يمكن استخدام إما ضاغط طرد مركزي أو ضاغط سريان محوري ، حيث يكون إجراء الانضغاط لا انعكاسي ولكنه تقريباً أديباتي (كاظم للحرارة) وبالمثل فان إجراء التمدد في التوربينة يكون لا نعكاسياً ولكنه كاظم للحرارة .

ونتيجة لهذه اللاانعكاسية فإننا نحتاج لشغل اكبر لإجراء الانضغاط لنسبة ضغط معطاة، ولشغل ناتج أقل لإجراء التمدد . لتحسين تصميم الضاغط و التوربينة يجب بقدر الإمكان قطع اللاانعكاسية التي تبطئ تطوير وحدة التوربينة الغازية .

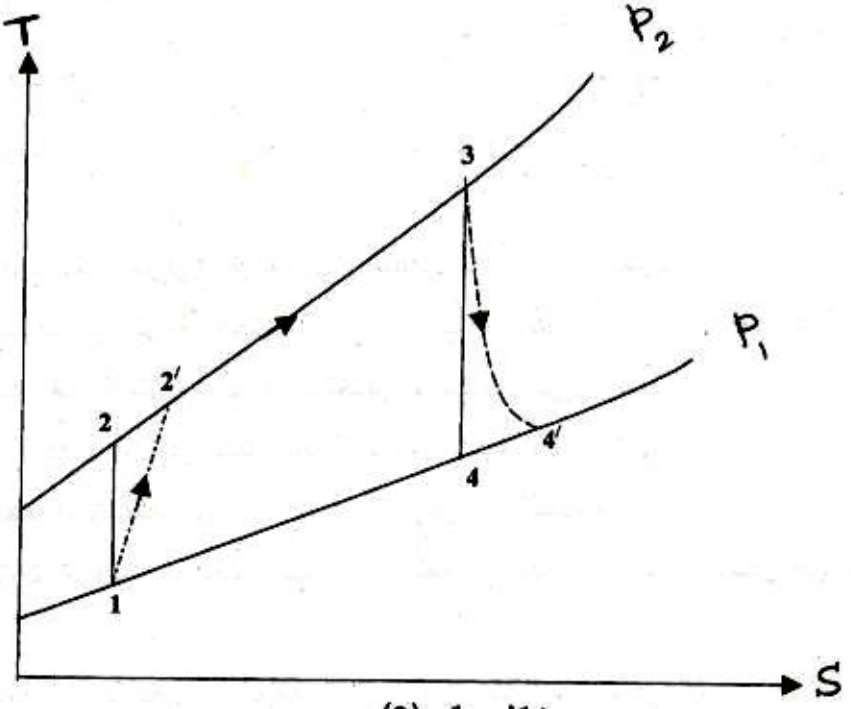
لا يمكن مقارنة التوربينة الغازية مفتوحة الحلقة مباشرة مع دورة الضغط الثابت المثالي فالدورة الفعلية تشتمل على تفاعل كيميائي في غرفة الاحتراق يتسبب في نواتج ذات درجة حرارة عالية متباينة كيميائياً عن

المواد المتفاعلة . لا يكون هنالك تبادل للطاقة مع البيئة المحيطة أثناء الاحتراق ونتيجة لذلك فسيكون هنـــالك انخفاض تدريجي في الطاقة الكيميائية مع زيادة مقابلة في المحتوى الحراري لمائع التشغيل .

سوف لن يتم تناول تفاعل الاحتراق بالتفصيل في هذا المنعطف وسيتم تبسيطة بافتراض أن الطاقة الكيميائيـة المتحررة من الاحتراق تساوى انتقال الحرارة عند ضغط ثابت لمائع التشغيل ثابت متوسط الحرارة النوعيـة . هذا التقارب المبسط يسمح بمقارنة الإجراء الفعلي مع المثالي وبإمكانية تمثيلة في مخطط T-S كما موضـح في الشكل رقم (2) أدناه .



شكل رقم (1)



شكل رقم (2)

الخط $2' - 1$ يُمثل انضغاطاً لاإنعكاسياً كاظم للحرارة .

الخط $2' - 3$ يُمثل إمداد حراري ثابت للضغط في غرفة الاحتراق

الخط $3 - 4'$ يُمثل تمدد لاإنعكاسي كاظم للحرارة .

الإجراء $1 - 2$ يُمثل انضغاط مثالي ثابت القصور الحراري بين الضغوط P_2, P_1

وبالمثل فان الأجراء $3 - 4$ يُمثل تمدد مثالي ثابت القصور الحراري بين الضغوط P_1, P_2 .

سيتم افتراض أنَّ التغير في طاقة الحركة في النقاط المختلفة للدورة صغير جداً بحيث يمكن تجاهله مقارنة بتغير المحتوى الحراري .

بتطبيق معادلة طاقة السريان للحالة المستقرة (S.S.F.E.E.) لكل جزء من الدورة لكل Kg نحصل على ،

$$h_1 + Q = h_2 + W$$

والمحتوى الحراري النوعي ، h ،

$$h = \int Cp\, dt$$

بالتالي ،

للضاغط :- $w_{i/p} = h'_2 - h_1 = cp(T'_2 - T_1)$ شغل الدخل

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

للتوربين :- $w_{o/p} = cp(T_3 - T'_4)$ شغل الخرج

بالتالي ،

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

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

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

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

لإجراء الاحتراق يمكن استخدام المخططات المعينة ، للحساب المبسط يمكن افتراض القيمة المتوسطة لـ Cp.

في التوربينة الغازية مفتوحة الحلقة يكون سريان كتلة الغازات في التوربينة اكبر من ذلك للضاغط وذلك نتيجة لكتلة الوقود المحترق ، يمكن تجاهل كتلة الوقود وذلك لان النسب المستخدمة للهواء إلى الوقود كبيرة . أيضا يتم في حالات كثيرة استنزاف هواء من الضاغط لأغراض التبريد حيث يستخدم الهواء المستنزف

لمنع التجه وتكييف 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 بين P_2, P_1 والشغل الفعلي المطلوب .

بتجاهل التغير في طاقة الحركة .

$\eta isen, C = \frac{Cp(T_2 - T_1)}{Cp(T_2' - T_1)} = \frac{T_2 - T_1}{T_2' - T_1}$ كفاءة ثابت القصور الحراري للضاغط

وبالمثل يمكن تعريف كفاءة ثابت القصور الحراري للتوربين كنسبة شغل الخرج الفعلي إلى شغل الخرج ثابت القصور الحراري بين P_1, P_2 .

بتجاهل التغير في طاقة الحركة ،

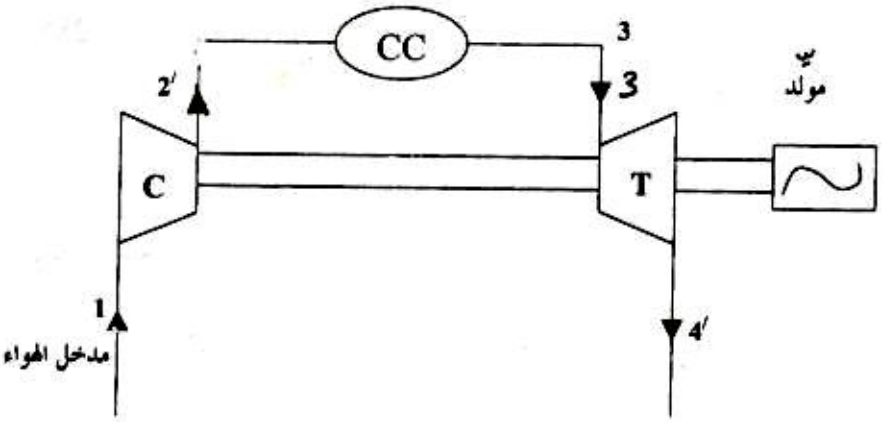
$\eta_{isen}, T = \frac{cp(T_3 - T_4')}{cp(T_3 - T_4)} = \frac{T_3 - T_4'}{T_3 - T_4}$ كفاءة ثابت القصور الحراري للتوربين .

مثال (1):-

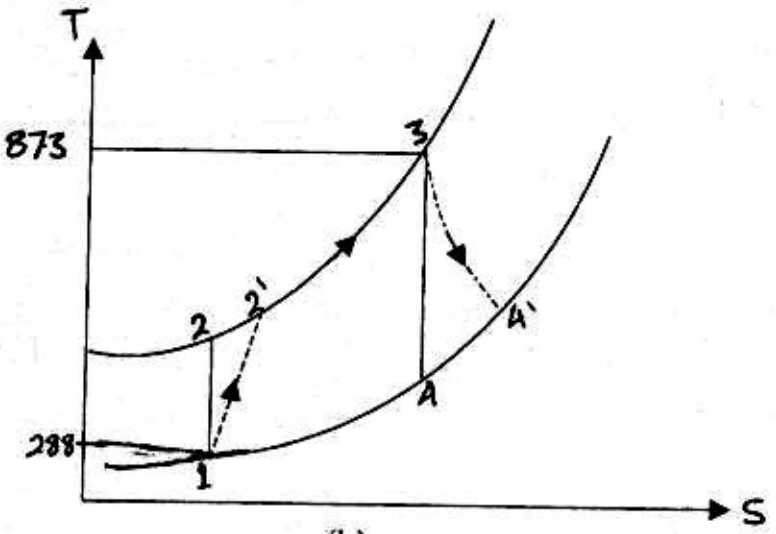
وحدة توربينية غاز لها نسبة ضغط مقدارها 6/1 ودرجة حرارة قصوى قدرها $600^{\circ}C$.

تكون كفاءات ثابت القصور الحراري للضاغط والتوربينة هي على الترتيب 0.82 و0.85 ، أحسب قدرة الخرج بالكيلو واط لمولد كهربائي معشّق مع التوربينة عندما يدخل الهواء إلى الضاغط عند $15^{\circ}C$ بمعدل سريان مقداره 15kg/s . خذ $cp = 1.005$ kj/kgk و $\gamma = 1.4$ لإجراء الانضغاط ، وخذ $Cp = 1.11$ kj/kgK

و $\gamma = 1.333$ لإجراء التمدد .



(a)



(b)

لحساب شغل صافي الخرج ، من الضروري حساب درجات الحرارة T_4', T_2'.لحساب T_2' يجب في البداية حساب T_2 وبعدها استخدام كفاءة ثابت القصور الحراري .

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

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

$$= 288 \times 6^{0.4/1.4} = 288 \times 1.67 = \underline{481K}$$

كفاءة ثابت القصور الحراري للضاغط $\eta_{isen}, C = \frac{T_2 - T_1}{T_2' - T_1} = \frac{481-288}{T_2'-288} = \underline{0.82}$

$$T_2' - 288 = \frac{193}{0.82} = \underline{235.5k}$$

$$\therefore T_2' = 288 + 235.5 = \underline{523.5k}$$

بالمثل ، بالنسبة للتوربينة

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

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

كفاءة ثابت القصور الحراري للتوربين $\eta_{isen}, T = \frac{T_3 - T_4'}{T_3 - T_4} = \frac{873 - T_4'}{873 - 558} = 0.85$

$873 - T_4' = 315 \times 0.85 = \underline{268k}$

$\therefore T_4' = 873 - 268 = 605k$

شغل الدخل للضاغط $W_{i/p} = CP_a(T_2' - T_1) = 1.005(523.5 - 288)$

$= 1.005 \times 235.5 = \underline{236.2}kj/kg$

شغل الخرج للتوربين $W_{o/p} = cp_g(T_3 - T_4') = 1.11(873-605) = 1.11 \times 268 = \underline{297.5}kj/kg$

شغل الخرج صافي $W_{neto/p} = W_{o/p} - W_{i/p} = 297.5 - 236.2 = \underline{61.3}kj/kg$

القدرة بالكيلوواط $P = W_{neto/p} \times \dot{m} = 61.3 \times 15 = 920kj/s = \underline{920}$ kw

مثال (2):-

أحسب الكفاءة الحرارية ونسبة الشغل للمحطة في المثال (1) ، بافتراض أن cp لإجراء الاحتراق تساوي 1.11kj/kgk .

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

الحرارة المكتسبة $Q_{supp} = CP_g(T_3 - T_2') = 1.11(873\text{-}523.5) = 1.11 \times 349.5 = 388kj/kg$

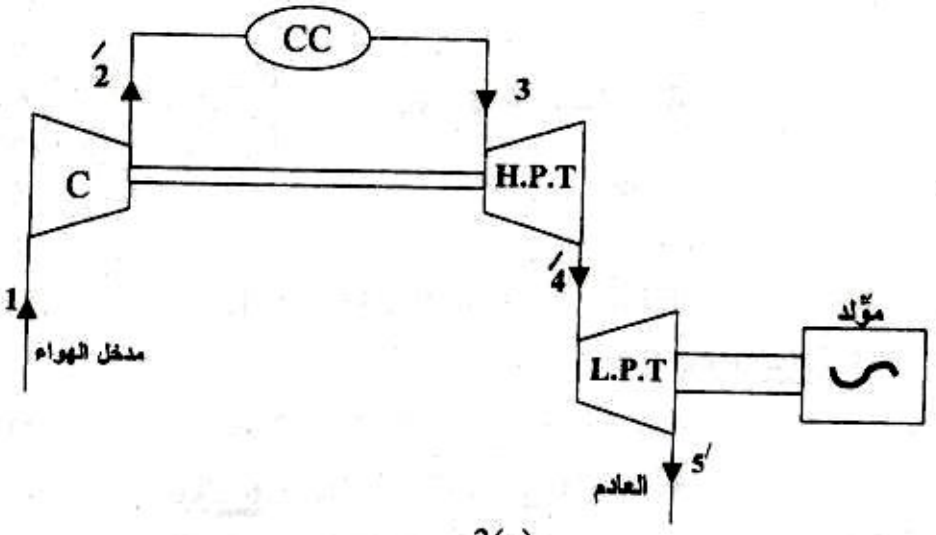
$\therefore \eta_{th} = \frac{61.3}{388} = 0.158$ او $\underline{15.8\%}$

نسبة الشغل من تعريف الشغل ،

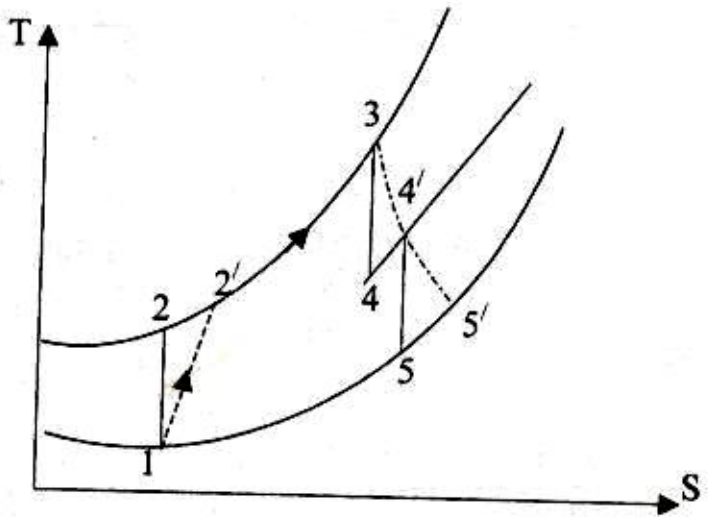
نسبة الشغل $WR = \frac{W_{neto/p}}{W_{crosso/p}} = \frac{61.3}{297.5} = \underline{0.206}$

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

يتم توضيح الترتيبة ومخطط T-S في الشكل رقم (3a) و (3b) على الترتيب .



3(a)



3(b)

افترض ان لكل توربينة كفاءة ثابت قصور حراري خاصة بها ، تجاهل التغير في طاقة السرعة ، شغل الدخل إلى الضاغط = شغل الخرج من توربينة الضغط العالي .

$$CPg(T_3 - T_4') = CPa(T_2' - T_1)$$

حيث CPg = سعة الحرارة النوعية بثبوت الضغط للغازات في التوربينة .

CPd = سعة الحرارة النوعية بثبوت الضغط للهواء في الضاغط .

عليه فان صافي شغل الخرج يعطي بتوربينة الضغط المنخفض كالآتي ،

i.e. $W_{net\,o/p} = Cpg(T_4' - T_5')$

مثال(3):-

وحدة توربينة غازية تأخذ الهواء عند 17°C و 1.01 bar ونسبة ضغط 8/1 . يُدار الضاغط بواسطة توربينة ضغط عالي وتُدير توربينة الضغط المنخفض عمود قدرة منفصل . تكون كفاءات للضاغط ، توربينة الضغط العالي وتوربينة الضغط المنخفض هي 0.8 ، 0.85 و 0.83 ، على الترتيب . أحسب الضغط ودرجة الحرارة للغازات الداخلة لتوربينة القدرة ، صافي القدرة المتولدة بالوحدة لكل kg/s من معدل السريان ، نسبة الشغل والكفاءة الحرارية للوحدة ، تكون درجة الحرارة القصوى في الدورة هي 650°C .لإجراء الانضغاط خذ $\gamma = 1.4, cp = 1.005 kj/kgk$ ولإجراء الاحتراق ، ولإجراء التمدد خذ $\gamma = 1.333, Cp = 1.15 kj/kgk$. تجاهل كتلة الوقود .

الحل:-

تكون الوحدة كما موضحة في الأشكال 3(a) و 3(b) .

للإجراء ثابت القصور الحراري في الضاغط

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

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

$$\eta_{isen}, C = \frac{T_2 - T_1}{T_2' - T_1} = \frac{525 - 290}{T_2' - 290} = 0.8 \quad \text{كفاءة ثابت القصور الحراري للضاغط}$$

$$\therefore T_2' - 290 = \frac{235}{0.8}$$

$$\text{i.e. } T_2' = 290 + 294 = \underline{584k}$$

$$\text{شغل الدخل للضاغط} = Cpa(T_2' - T_1) = 1.005(584 - 290)$$

$$= 1.005 \times 294 = 295.5 kj/kg$$

والآن فان شغل الخرج من توربينة الضغط العالي (H.P.T) يجب ان يكون كافيا لإدارة الضاغط .

شغل الخرج من توربينة الضغط العالي (H.P.T) $= Cpg(T_3 - T_4') = \underline{295.5 kj/kg}$

$$\therefore T_3 - T_4' = \frac{295.5}{1.15} = 257K$$

$$\therefore T_4' = T_3 - 257 = 923 - 257 = \underline{666K}$$

$$\eta isen,\ H.P.T = \frac{T_3 - T_4'}{T_3 - T_4} = \frac{923 - 666}{923 - T_4} = 0.85$$

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

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

للإجراء ثابت القصور الحراري في التوربينة $\frac{T_3}{T_4} = \left(\frac{P_3}{P_4}\right)^{(\gamma-1)/\gamma}$

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

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

عليه فان الضغط ودرجة الحرارة عند مدخل توربينة الضغط المنخفض (L.P.T) هي 1.65 bar و $393^\circ C$ $\left(t_4' = 666 - 273 = 393^\circ C\right)$.

لإيجاد قدرة الخرج من الضروري حساب T5′ ،

نسبة الضغط P_4/P_5 يمكن إيجادها كالآتي ،

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

بما أن ،

$P_3 = P_2$

و $P_5 = P_1$

فان المعادلة عاليه يمكن كتابتها كالآتي ،

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

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

$$\frac{T_4'}{T_5} = \left(\frac{P_4}{P_5}\right)^{(\gamma-1)/\gamma} = 1.63^{0.333/1.333} = \underline{1.131}$$

$$\eta_{isent,}LPT=\frac{T_4'-T_5'}{T_4'-T_5}=\underline{0.83}$$

$$T_4'-T_5'=0.83(666-588)=0.83\times 78=\underline{64.8K}$$

شغل الخرج من توربينة الضغط المنخفض . $W_{O/P}(LPT)=CPg(T_4'-T_5')=1.15\times 64.8=\underline{74.5kj/kg}$

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

نسبة الشغل $WR=\frac{W_{neto/p}}{W_{grosso/p}}=\frac{74.5}{74.5+295.5}=\frac{74.5}{370}=0.201$

الحرارة المكتسبة $Q_{supp}=Cpg(T_3-T_2')=1.15(923-584)$

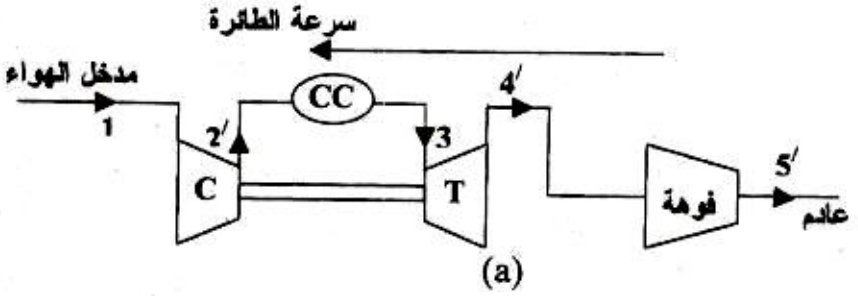
$=1.15\times 339=\underline{390}kj/kg$

الكفاءة الحرارية $\eta_{th}=\frac{W_{neto/p}}{Q_{supp}}=\frac{74.5}{390}=\underline{0.191}$ او $\underline{19.1\%}$

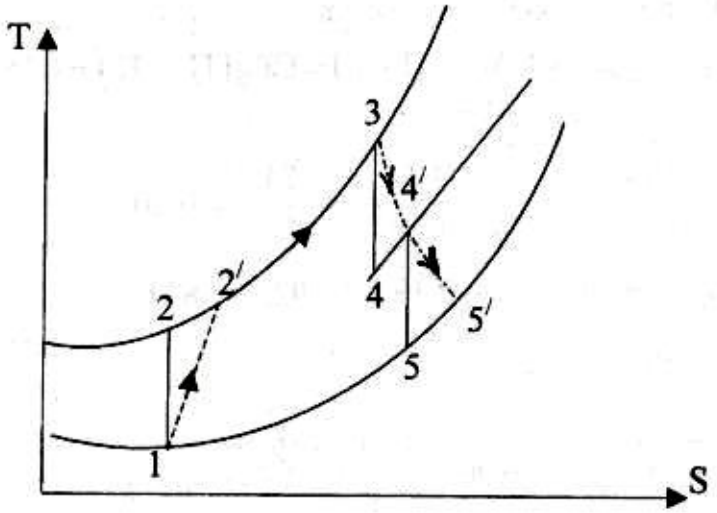
في المحركات النفاثة (Jet engines) فان فوهة الدفع تحل محل توربينة الضغط المنخفض كما هو واضح تخطيطيا في الشكل رقم 4(a) . يتم توضيح الدورة على مخطط T-S في الشكل رقم 4(b) ، والذي يلاحظ انه متطابق مع الشكل 3(b) . تستمد الطائرة قدرتها بالدفع الرد فعلي لنفث الغازات المغادر للفوهة ، ويتم الحصول على هذه السرعة العالية للنفث على حساب هبوط المحتوى الحراري من 4 إلى 5 .تولد التوربينة شغل يكفي فقط لادارة الضاغط وتجاوز الفقودات الميكانيكية . في محرك الرفع التوربيني ، تدير التوربينة الضاغط وأيضا اللولب الهوائي {air screw}عمود الرفع (propeller) ، كما موضح في الأشكال 5(a) , 5(b). يعطي صافي شغل المتاح لادارة عمود الرفع بـ ،

صافي الشغل $W_{net}=Cp(T_3-T_4')-Cp(T_2'-T_1)$

(بتجاهل الفقودات الميكانيكية) .

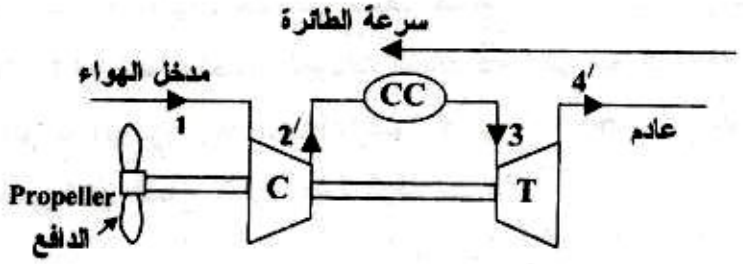


(a)

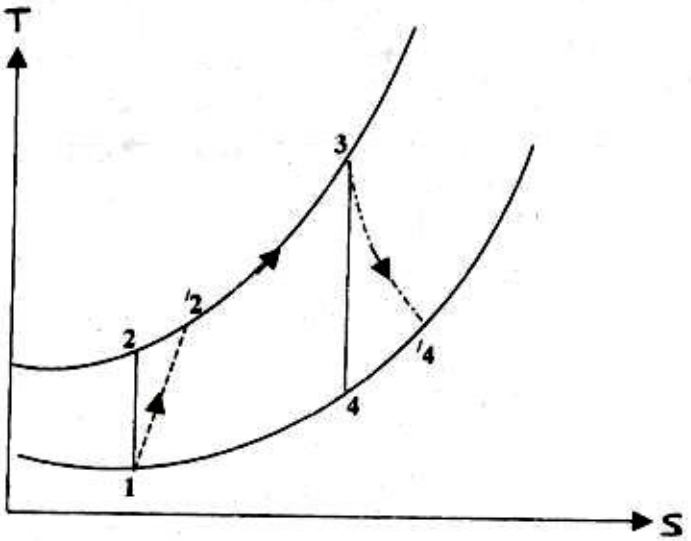


(b)

شكل رقم (4)

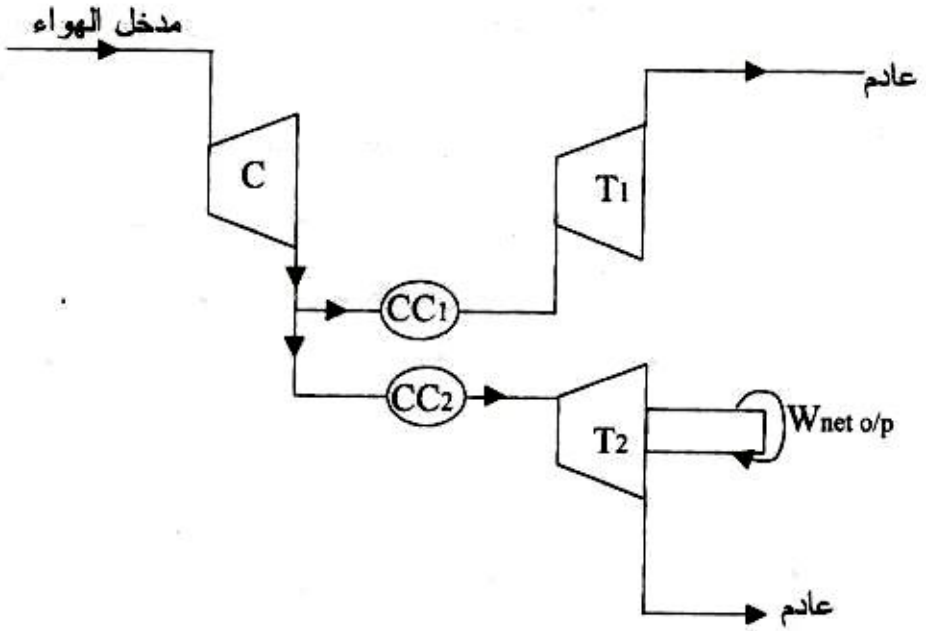


(a)



(b) (شكل رقم (5))

عمليا فان هنالك دفع نفثي صغير يتم إنتاجه في طائرات الدفع التوربيني . في بعض الوحدات الصناعية ووحدات التوربينة الغازية البحرية ، فان سريان الهواء ينشطر إلى جدولين بعد اكتمال إجراء الانضغاط .يمرر بعض الهواء إلى غرفة الاحتراق التي تمد الغازات الساخنة إلى التوربينة التي تدير الضاغط ، بينما يمرر باقي الهواء إلى غرفة الاحتراق الثانية ومنها لتوربينة القدرة . يتم توضيح المنظومة مخططيا في الشكل رقم (6) أدناه . وتسمى بوحدة السريان المتوازي (parallel flow unit) .



شكل رقم (6)

في هذه المنظومة فإن كل توربينة تمدد الغازات التي تستقبلها خلال نسبة الضغط الكاملة {Full pressure ratio } . توربينات السريان المتوازي ليست شائعة ، عليه فإننا لن نغوص في تفاصيلها .

تعديلات الدورة الأساسية :- {Modifications to the basic cycle}

a/ التبريد البيني {Intercooling}:-

عندما يتم أداء الانضغاط في مرحلتين بمبرد بيني بين المراحل ، بالتالي ينخفض شغل الدخل لنسبة ضغط وسريان كتلة معطيان . اعتبر نظاماً كما موضح في الشكل 7(a) ، يتم توضيح مخطط T-S للوحدة في الشكل رقم 7(b) . تكون إجراءات الدورة الفعلية هي $2' - 1$ في ضاغط الضغط المنخفض ، $3' - 2$ في المبرد البيني ، $4' - 3$ في ضاغط الضغط العالي ، $5 - 4'$ في غرفة الاحتراق ، و $6' - 5$ في التوربين . تكون الدورة المثالية لهذه الترتيبة هي $6 - 5 - 4 - 3 - 2 - 1$ ؛ يتم توضيح إجراء الانضغاط بدون تبريد بيني كـ $A' - 1$ في الحالة الفعلية ، و A-1 في الحالة المثالية ثابتة القصور الحراري .

يُعطى شغل الدخل بتبريد بيني بـ

$$\text{شغل الدخل بتبريد بيني} = cp(T_2' - T_1) + cp(T_4' - T_3)$$

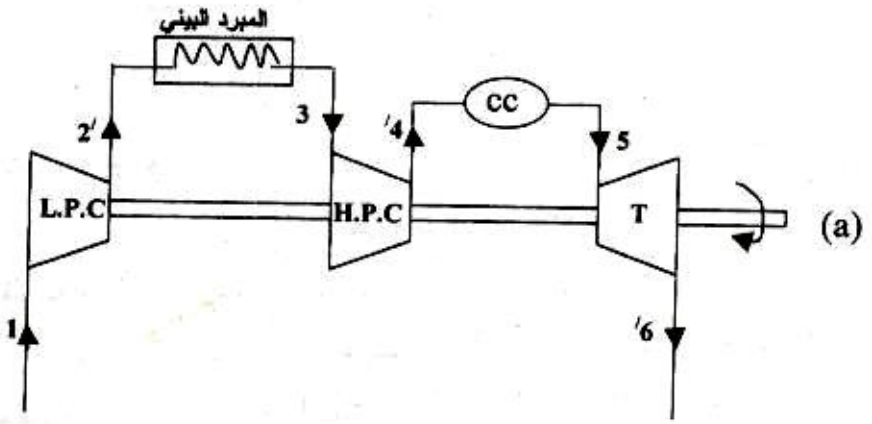
يعطي شغل الدخل بدون تبريد بيني بـــ

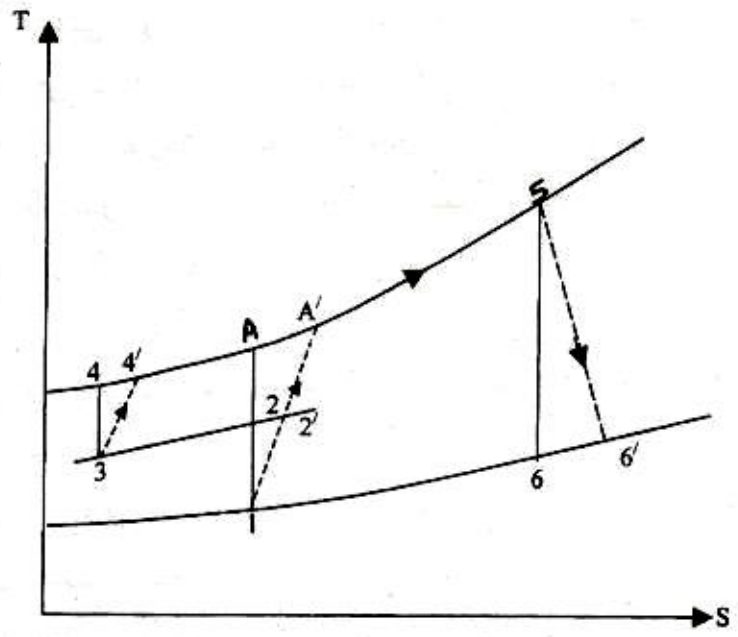
$$\text{شغل الدخل بدون تبريد بيني} = cp(T'_A - T_1)$$

$$= cp(T'_2 - T_1) + cp(T'_A - T'_2)$$

بمقارنة هذه المعادلة مع المعادلة السابقة ، يمكن ملاحظة ان شغل الدخل بتبريد بيني يكون أقل مـــن شـــغل الدخل بدون تبريد بيني ، عندما $cp(T'_4 - T_3)$ تكون أقل من $cp(T'_A - T'_2)$. هذا يكون كذلـــك إذا تـــم افتراض ان الكفاءات ثابتة القصور الحراري للضاغطين اللذين يشتغلا بانفصال ، تكون كل منهما مســـاوية لكفاءة ثابتة القصور الحراري لضاغط مفرد الذي سيكون مطلوبا إذا لم يتم استخدام تبريد بيني . بالتـــالي ، $(T'_4 - T_3) < (T'_A - T'_2)$ بما أن خطوط الضغط تتباعد من اليسار إلى اليمين على مخطط T-S.

يمكن توضيح ان الضغط البيني الأفضل هو ذلك الذي يعطي نسب ضغط متساوية في كـــل مرحلـــة للانضغاط ، بالرجوع للشكل 7(b) هذا يعني ان ، $P_2/P_1 = P_4/P_3$ يكون شغل الدخل المطلوب أدنـــى مـــا يمكن عندما تكون نسبة الضغط في كل مرحلة هي نفسها ، وعندما يتم تبريد درجة حرارة الهواء في المـــبرد البيني الى القيمة عند مدخل الوحدة (i .e بالرجوع للشكل 7(b) ، $T_3 = T_1$) .





الشكل رقم (7)

صافي شغل الخرج = نسبة الشغل

إجمالي شغل الخرج

شغل الانضغاط – شغل التمدد =

شغل التمدد

يتبع ذلك انه عندما يتم خفض شغل الدخل فان نسبة الشغل ستزيد . على أي حال ، بالرجوع للشكل رقم 7(b) ، فان الحرارة المكتسبة في غرفة الاحتراق عندما يتم استخدام تبريد بيني في الدورة يعطي بـــ ،

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

بينما تعطي الحرارة المكتسبة عندما لا يتم استخدام تبريد بيني بنفس درجة الحرارة القصوى في الـدورة T_5 بـــ ،

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

بالتالي فان الحرارة المكتسبة عندما يتم استخدام تبريد بيني تكون اكبر من تلك بدون استخدام تبريد بينـــي . بالرغم من زيادة صافي شغل الخرج بالتبريد البيني وُجِد عموما ان الزيادة في الحرارة المكتسبة تتسبب فـــي نقصان الكفاءة الحرارية .

a / إعادة التسخين {Reheat}:-

كما ذكر سابقا ، فان إجراء التمدد يتم أداؤه تكرارا في مرحلتي توربين منفصلتين ، توربين الضغط العـــالي الذي يدير الضاغط وتوربين الضغط المنخفض الذي يعطي خرج القدرة المستفاد . يمكن زيادة شغل الخـــرج لتوربينة الضغط المنخفض برفع درجة الحرارة عند مدخل هذه المرحلة . هذا يمكن عملـــه بوضـــع غرفـــة

احتراق ثانية بين مرحلتي التوربين لكي يتم تسخين الغازات المغادرة لتوربينة الضغط العالي . يتم توضيح المنظومة تخطيطيا في الشكل رقم 8(a) ، ويتم تمثيل الدورة على مخطط T-S في الشكل 8(b) . يُمثل الخط $A' - 4'$ التمدد في توربينة الضغط المنخفض إذا لم يتم استخدام إعادة التسخين .

كما سابقا ، فان شغل الخرج لتوربينة الضغط العالي يجب ان يكون بالضبط مساويا لشغل الدخل المطلوب للضاغط (بتجاهل الفقودات الميكانيكية) .

i.e. $cpa(T_2' - T_1) = cpg(T_3 - T_4')$

صافي شغل الخرج ، الذي هو شغل الخرج لتوربينة الضغط المنخفض ، يعطي بـ :-

صافي شغل الخرج $= CPg(T_5 - T_6')$

إذا لم يتم استخدام إعادة التسخين ، بالتالي يعطي شغل توربينة الضغط المنخفض بـ :-

صافي شغل الخرج بدون إعادة تسخين $= CPg(T_4' - T_A')$

بما ان خطوط الضغط تتباعد إلى اليمين على مخطط T-S ، يمكن ملاحظة أن فرق درجة الحرارة $(T_5 - T_6')$ ، يكون دائما أكبر من $(T_4' - T_A')$ بحيث أن إعادة التسخين تزيد صافي شغل الخرج .

أيضا ،

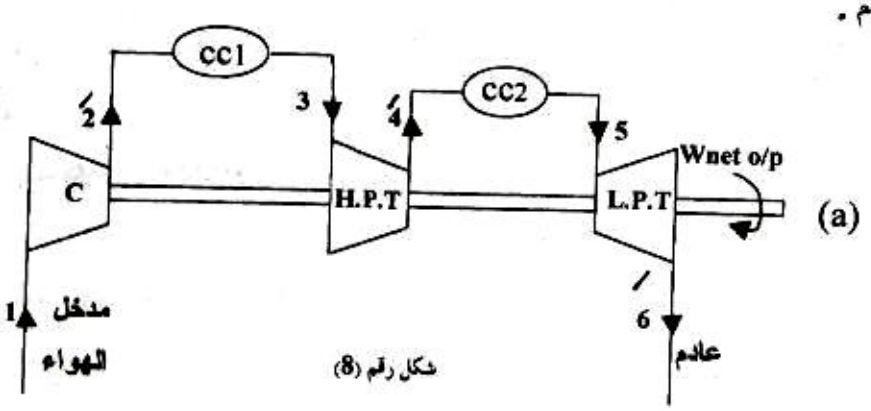
$$\text{نسبة الشغل} = \frac{\text{شغل الانضغاط} - \text{شغل التمدد}}{\text{شغل التمدد}}$$

$$\text{i.e.} \quad \text{نسبة الشغل} = 1 - \frac{\text{شغل الانضغاط}}{\text{شغل التمدد}}$$

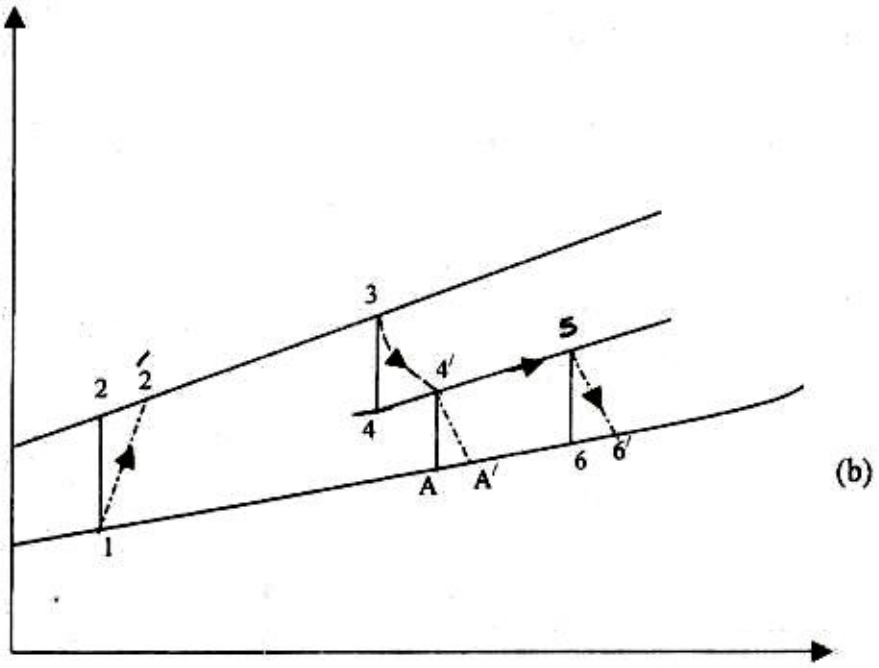
عليه ، عندما يتم زيادة شغل التمدد وعدم تغيير شغل الانضغاط ، فان نسبة الشغل ستزيد .بالرغم من أن صافي الشغل سيزاد بإعادة التسخين ، أيضا ستزاد الحرارة المكتسبة ، وتكون المحصلة هي خفض الكفاءة الحرارية .

i.e. الحرارة المكتسبة $= cpg(T_3 - T_2') + CPg(T_5 - T_4')$

على أي حال ، فان 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 لتمكين استخدام غازات العادم .



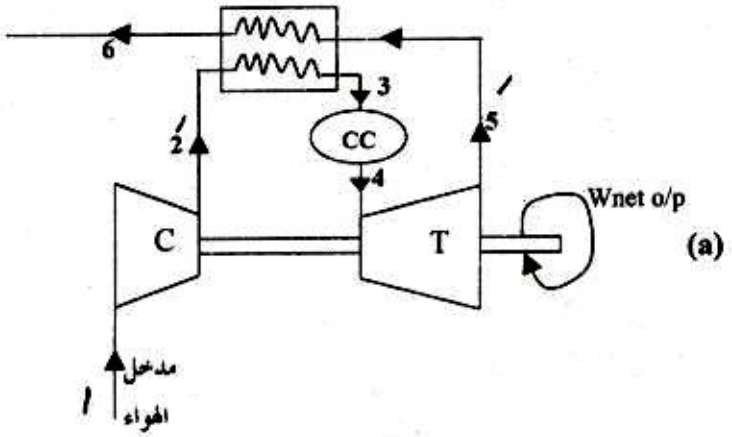
شكل رقم (8)

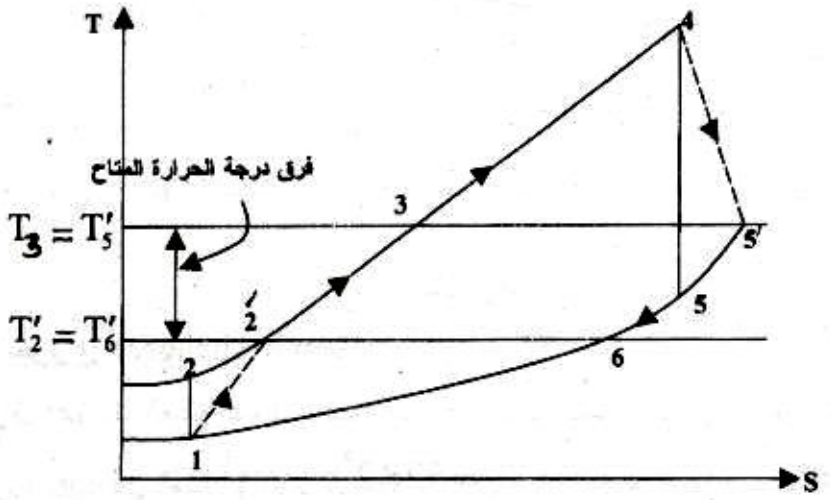


شكل رقم (8)

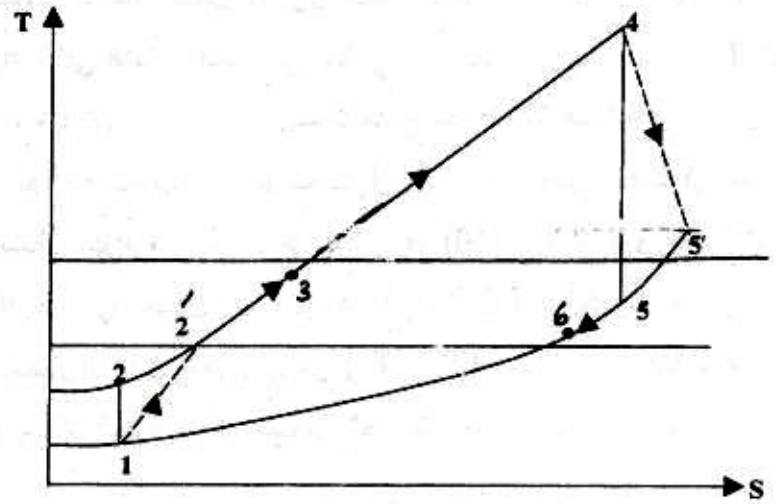
C /المبادل الحراري {Heat exchanger}:-

ما تزال غازات العادم المغادرة للتوربينة عند نهاية التمدد عند درجة حرارة عالية ، وبالتالي محتوى حراري عالي (e.g. في المثال (3) ، $t'_5 = 328.2^{\circ}c$) . إذا تم السماح لهذه الغازات بالمرور إلى الجو ، بالتالي فان هذا يمثل فقدا 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 مخططيا في الشكل 9(a) ، ويتم تمثيل الدورة على مخطط T-S في الشكل 9(b) في المبادل الحراري المثالي سيتم تسخين الهواء من T'_2 إلى $T_3 = T'_5$ ، وسيتم تبريد الغازات من ، T'_5 إلى $T_6 = T'_2$. يتم توضيح هذه الحالة المثالية في الشكل رقم 9(b) . عمليا يكون هذا مستحيلا بما أنه يتطلب فرق درجة حرارة كبير عند جميع النقاط في المبادل الحراري لكي يتم تجاوز المقاومة لانتقال الحرارة . بالرجوع للشكل رقم (10) ، يكون فرق درجة الحرارة المطلوب بين الغازات والهواء الداخل إلى 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 ، فان الحرارة التي تعطيها الغازات يجب ان تكون مساوية بالضبط للحرارة المأخوذة بالهواء ،





شكل رقم (8)



شكل رقم (10)

i.e. $\dot{m}_a \; cpa(T_3 - T_2') = \dot{m}_g \; cpg(T_5' - T_6)$

يكون افتراض عدم فقدان حراري من المبادل الحراري مضبوط بكفاية في معظم الحالات العمليـــة . عليـه تكون المعادلة عاليه صحيحة مهما كانت قيم درجات الحرارة T_6 , T_3 .

يتم تعريف فاعلية المبادل الحراري للسماح لفرق درجة الحرارة الضروري لانتقال الحرارة ،

الفاعلية = الحرارة التي يستقبلها الهواء / i.e.

الحرارة الممكنة القصوى التي يمكن انتقالها من الغازات في المبادل الحراري

$$\therefore \text{الفاعلية} = \frac{\dot{m}_a \, cpa(T_3 - T_2')}{\dot{m}_g \, cpg(T_5' - T_2')} \text{ ——— (1)}$$

طريقة أكثر ملائمة لتقييم الأداء لمبادل حراري هي استخدام نسبة حرارية ، يتم تعريفها كـ

النسبة الحرارية (thermal ratio) = ارتفاع درجة حرارة الهواء / فرق درجة الحرارة الأقصى المتاح

$$\text{i.e. النسبة الحرارية} = \frac{T_3 - T_2'}{T_5' - T_2'} \text{ ——— (2)}$$

بمقارنة المعادلتين (1) و (2) يمكن ملاحظة أن النسبة الحرارية تكون مساوية للفاعلية عندما يكون المقـــدار $\dot{m}_a \; cpa$ مساويا للمقدار $\dot{m}_g \; cpg$.

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

لا يتغير صافي شغل الخرج وبالتالي تزيد الكفاءة الحرارية.بالرجوع للشكل رقم (10) ،

$CPg(T_4 - T_2')$ = الحرارة المكتسبة بالوقود (بدون مبادل حراري) .

$CPg(T_4 - T_3)$ = الحرارة المكتسبة بالوقود (بمبادل حراري) .

يمكن فقط استخدام مبادل حراري اذا كان هنالك فرق درجة حرارة كبير كافٍ بين الغازات المغـادرة للتوربينة ، والهواء المغادر للضاغط . كمثال ، في الدورة الموضحة في الشكل (11) لا يمكن استخدام مبادل حراري لان درجة حرارة غازات العادم T_4' تكون اقل من درجة حرارة الهواء المغادر للضاغط ، T_2' . عمليا ، بما ان درجة حرارة الغاز يمكن أن تكون اكبر من درجة حرارة الهواء المغادر للضاغط ، لا يكـون هنالك فرق درجة حرارة كبير بكفاية ليبرر التكلفة الرأسمالية الإضافية والصيانة التابعة المطلوبـــة لمبـادل حراري . أيضا ، عندما يكون فرق درجة الحرارة صغيرا في مبادل حراري ، يجب زيادة مساحة أســـطح المبادل الحراري لكي يتم إنجاز قيمة عالية معقولة للنسبة الحرارية . في التوربينات الغازية للطائرة ، حيـث تكون نسبة القدرة / الوزن اكثر أهمية من النسبة الحرارية أو العمر الطويل ، لا يتم استخدام مبادل حـراري ؛ يتم الحصول على قدرة إضافية باستخدام نسب ضغط أعلى ، درجات حرارة قصوى وبإعادة التســـخين .

لوحدات توربينة غاز صغيرة (e.g. لوحدات الضخ أو للسيارات) يجب تصميم مبـــادل حـــراري مكتـــنز (compact heat exchanger) قبل أن تأمل مثل هذه الوحدات في أن تصبح منافسة اقتصاديا لمحركـــات الاحتراق الداخلي التقليدية ذات القدرة المكافئة . يتم عادة استخدام مبادل حراري في وحدات توربين الغـــاز الضخم للدفع البحري او القدرة الصناعية .

مثال (4):-

وحدة توليد توربينية غازية ذات قدرة مقدارها 5000 kw تعمل بمرحلتين من الضواغط بتبريد بيني بين المراحل ، تكون نسبة الضغط مساوية لـــ 9/1 . يتم استخدام توربينة ذات ضغط عالي لادارة الضواغط ، وتوربينة ذات ضغط منخفض لادارة المولد . تكون درجة حرارة الغازات عند مدخل توربينـــة الضغـــط العالي هي $650^{\circ}C$ ويتم إعادة تسخين الغازات إلى $650^{\circ}C$ بعد التمدد في التوربينة الأولى .يتم تمرير غازات العادم المغادر لتوربينة الضغط المنخفض خلال مبادل حراري لتسخين الهواء المغـــادر لضـــاغط مرحلـــة الضغط العالي . للضواغط نسب ضغط متساوية ويكون التبريد البيني كاملا بين المراحل . تكـــون درجـــة حرارة الهواء المدخل للوحدة مساوية لـــ $15^{\circ}C$.تكون كفاءة ثابت القصور الحراري لكل مرحلة ضاغط هي 0.8 ، وكفاءة ثابت القصور الحراري لكل مرحلة توربينية هي 0.85 ، تكون النســـبة الحراريـــة للمبـــادل الحراري مساويةلـــ 75% . يمكن افتراض كفاءة ميكانيكية مقدارها 98% لكل من عمود القـــدرة ولعمـــود توربينة الضاغط . متجاهلا جميع فقودات الضغط والتغيرات في طاقة الحركة ، احسب الكفـــاءة الحراريـــة ونسبة الشغل للمحطة ، وسريان الكتلة بالـــ kg/s . للهواء خذ $cp = 1.005 kj/kgk$, $\gamma = 1.4$ ، وللغازات في غرفة الاحتراق وفي التوربينات والمبادل الحراري خـــذ $cp = 1.15 kj/kgk$, $\gamma = 1.333$. تجاهل كتلة الوقود .

الحل :-

يتم توضيح المحطة تخطيطيا في الشكل 12(a) ، ويتم تمثيلها على مخطط T-S في الشكل 12(b) .

بما ان نسبة الضغط وكفاءة ثابت القصور الحراري لكل ضاغط هي نفسها ، بالتالي فان الشغل المطلوب لكل ضاغط هو نفسه بما ان للضاغطين نفس درجة حرارة الهواء المدخل ، i .g. $T_1 = T_3$ و $T_2' = T_4'$.

من المعادلة ،

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{(\gamma-1)/\gamma} , \frac{P_2}{P_1} = \sqrt{9} = \underline{3}$$

$$\therefore T_2 = 288 \times 3^{0.4/1.4} = \underline{394K}$$

بالتالي من المعادلة ،

كفاءة ثابت القصور الحراري لضاغط الضغط المنخفض ،

$$\eta_{isen}, L.P.C = \frac{T_2 - T_1}{T_2' - T_1} = 0.8$$

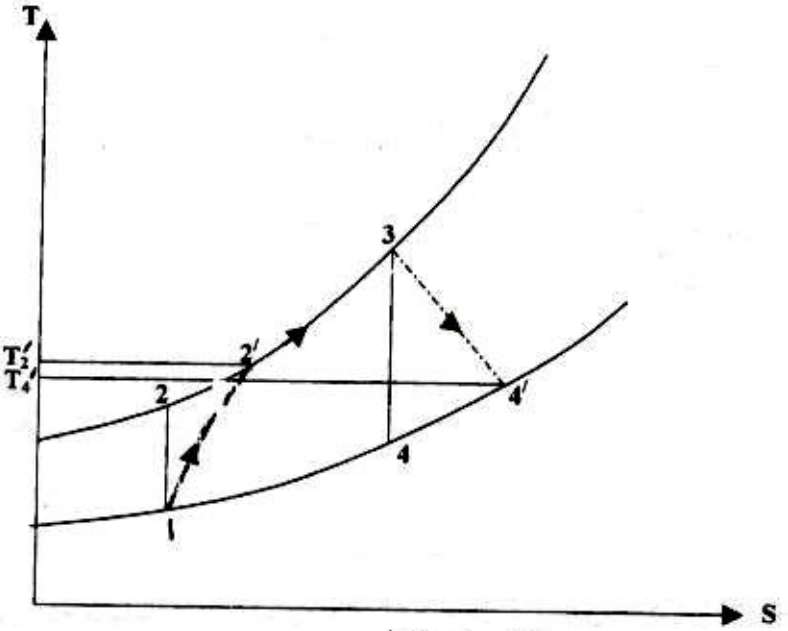
$$\therefore T_2' - T_1 = \frac{394-288}{0.8} = \frac{106}{0.8} = \underline{132.5K}$$

i.e. $T_2' = 288 + 132.5 = \underline{420.5K}$

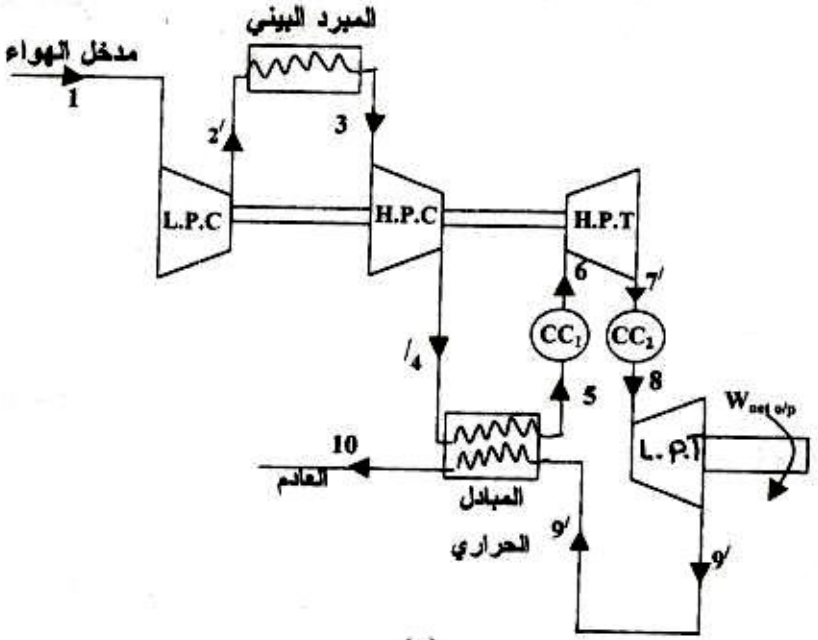
أيضاً ،

شغل الدخل لكل مرحلة ضاغط $= CP(T_2' - T_1)$

$= 1.005 \times 132.5 = 133.1 kj/kg$

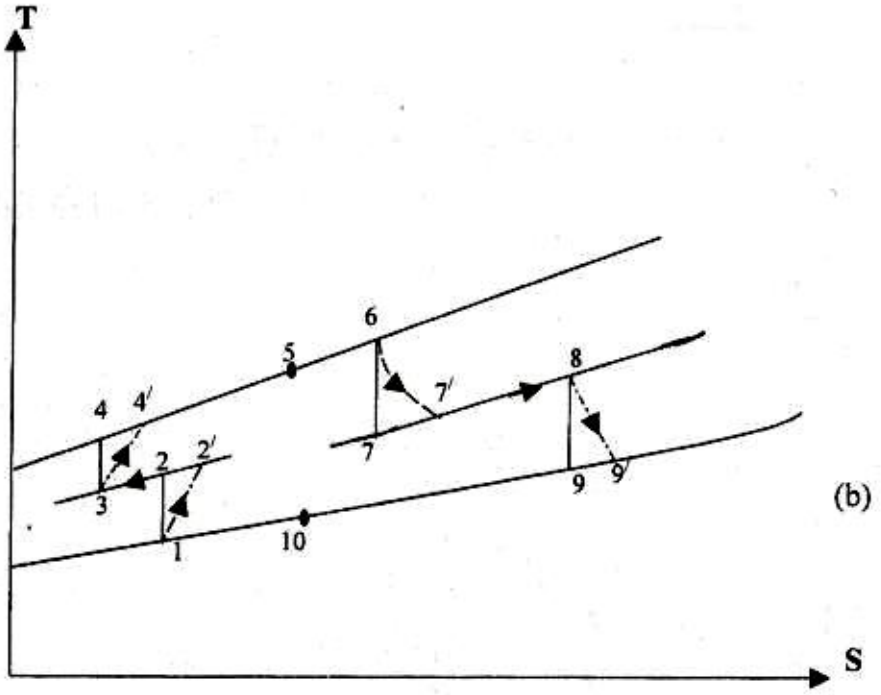


شكل رقم (11)



(a)

شكل رقم (12)



شكل رقم (12)

مطلوب من توربينة الضغط العالي إدارة كلا الضاغطين وتخطي الاحتكاك الميكانيكي .

i.e. شغل خرج توربينة الضغط العالي $= \frac{2 \times 133.1}{0.98} = 272 kj/kg$

$$\therefore cp(T_6 - T_7') = 272$$

$$\text{i.e } 1.15(923 - T_7') = 272$$

$$\therefore 923 - T_7' = \frac{272}{1.15} = \underline{236.5k}$$

$$\text{i.e. } T_7' = 923 - 236.5 = \underline{686.5k}$$

من المعادلة ،

$$\eta_{isen,} H.P.T = \frac{T_6 - T_7'}{T_6 - T_7} = 0.85$$

$$\therefore T_6 - T_7 = \frac{236.5}{0.85} = \underline{278K}$$

$$\text{i.e.} T_7 = 923 - 278 = \underline{645K}$$

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 ،

$$\frac{P_8}{P_9}=\frac{9}{4.19}=2.147$$

مستخدما المعادلة ،

$$\frac{T_8}{T_9}=\left(\frac{P_8}{P_9}\right)^{(\gamma-1)/\gamma}=2.147^{0.333/1.333}=\underline{1.211}$$

$$\therefore T_9=\frac{923}{1.211}=\underline{762.6K}$$

بالتالي مستخدما المعادلة ،

$$\eta_{isen,}\,L.P.T=\frac{T_8-T_9'}{T_8-T_9}=0.85$$

$$\therefore T_8-T_9'=0.85\times(923-762.6)=0.85\times160.4=\underline{136.3k}$$

$$\text{i.e. } T_9'=923-136.3=\underline{786.7K}$$

عليه ،

صافي شغل الخرج $=cpg(T_8-T_9')\times0.98$

$$=1.15\times136.3\times0.98=\underline{153.7kj/kg}$$

من المعادلة 2 ،

النسبة الحرارية للمبادل الحراري $\cdot$ = $\frac{T_5-T_4'}{T_9'-T_4'}=0.75$

$$\text{i.e } T_5-420.5=0.75(786.7-420.5)=0.75\times366.2=\underline{274.7K}$$

$$\therefore T_5=420.5+274.7=\underline{695.5K}$$

الآن ،

الحرارة المكتسبة $=CPg(T_6-T_5)+CP(T_8-T_7')$

$$=1.15(923-695.2)+1.15(923-686.5)$$

$$\text{i.e.}\quad \text{الحرارة المكتسبة}=1.15(227.8+236.5)=534kj/kg$$

بالتالي من المعادلة ،

الكفاءة الحرارية $\frac{W}{Q}=\frac{153.7}{534}=\underline{0.288}$ او $\underline{28.8\%}$

شغل توربينة الضغط المنخفض + شغل توربينة الضغط العالي = إجمالي الشغل للمحطة

$$\text{i.e. الشغل الإجمالي} = 272 + \frac{153.7}{0.98} = \underline{429}\,\text{kj/kg}$$

عليه ،

$$\text{نسبة الشغل} = \frac{\text{صافي شغل الخرج}}{\text{اجمالي شغل الخرج}} = \frac{153.7}{429} = \underline{0.358}$$

يكون الخرج الكهربائي 5000kw . أجعل سريان الكتلة يكون $\dot{m}$ kg/s بالتالي ،

$$5000 = \dot{m} \times 153.7$$

$$\text{i.e. } \dot{m} = \frac{5000}{153.7} = \underline{\underline{32.6}}\,\text{kg/s}$$

i.e. سريان الهواء معدل $= 32.6\,\text{kg/s}$

مسائل :-

1/ توربينة غاز لها ضغط إجمالي مقداره 5/1 ودرجة حرارة قصوى مقدارها $550^{\circ}C$. تدير التوربينة الضاغط ومولدا كهربائيا ، تكون الكفاءة الميكانيكية للإدارة هي 97%. تكون درجة الحرارة السائدة هي $20^{\circ}C$ وكفاءات ثابت القصور الحراري للضاغط والتوربينة هما 0.8 و 0.83 على الترتيب . أحسب قدرة الخرج بالكيلوواط لسريان هواء مقداره 15kg/s. احسب أيضا الكفاءة الحرارية ونسبة الشغل . تجاهل التغيرات في طاقة الحركة ، وفقد الضغط في غرفة الاحتراق .(655kw; 12%; 0.168).Ans .

2/ 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 $650^{\circ}C$. كفاءات ثابت القصور الحراري للضاغط ، توربينة الضغط العالي ، وتوربينة الضغط المنخفض ، هي 0.8 ، 0.83 ، 0.85 على الترتيب ، وتكون الكفاءة الميكانيكية لكلا العمودين 98% . احسب الضغط بين مرحلتي التوربين عندما تكون حالات سحب الهواء هي 1.0l bar و $25^{\circ}C$ احسب أيضا الكفاءة الحرارية وقدرة العمود عندما يكون سريان الكتلة 60 kg/s .تجاهل تغيرات طاقة الحركة ، وفقد الضغط في الاحتراق .

Ans.(1.57bar ; 14.9% ;4560kw)

3/ للوحدة في المسألة (2) ، أحسب الكفاءة الحرارية التي يتم الحصول عليها عندما يتم تركيب مبادل حراري . افترض نسبة حرارية مقدارها 0.75 .

Ans.(23.4%)

والله الموفق

أسامة محمد الرفاعي سلام

الفصل الخامس

مسائل إضافيـــة في التوربينـــات الغازيـــة

Additional problems in Gas Turbines

ملحوظة: لجميع المسائل في هذا الفصل يمكن اخذ C_Pوγ كـ 1.005kj/kgK و1.4 لجميع إجراءات الانضغاط ، وكـ 1. 15 kg/kgK و1.333 لجميع إجراءات الاحتراق والتُمدد.

5.1 مسألة (1): إيجاد الكفاءة الحرارية ونسبة الشغل لتوربينة غازية بتجاهل التغييرات 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 15kg/s . احسب أيضا الكفاءة الحرارية ونسبة الشغل للتوربينة. تجاهل التغييرات في طاقة الحركة ، وفقد الضغط في غرفة الاحتراق.

Ans. {655kw; 12% ; 0.168}

5.2 مسألة (2): إيجاد الكفاءة الحرارية وقدرة العمود لتوربينة غازية بتجاهل تغييرات 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 المخفض، 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}

5.3 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%}

5.4 مسألة (4): إيجاد قدرة الخرج بالكيلو واط، الكفاءة الحرارية، معدّل سريان ماء التبريد المطلوب للمبردات البينية والنسبة الحرارية للمبادل الحراري بتجاهل فقودات الضغط وتغييرات طاقة السرعة

في محطة توليد بتوربينة غازية تكون نسبة الانضغاط الإجمالية 12/1، ويتم أداؤها في ثلاث مراحل بنسب ضغط مقدارها 2.5/1، 2.4/1، و2/1 علي الترتيب. تكون درجة حرارة الهواء المدخل إلي المحطة هي 25°C ويُخفّض التبريد البيني 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 كـ 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 المـــاء عن 30K . تجاهل فقودات الضغط والتغييرات في طاقة السرعة ، وخذ سعة الحرارة النوعية للماء كـــ 4.19 kj/kgK . احسب أيضاً النسبة الحرارية للمبادل الحراري.

Ans. {25,300 kw ؛ 33.7% ؛ 223 kg/s ؛ 0.825}

5.5 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 ومولّد 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 لـــ 10/1 ، حيث يكون لكل ضاغط نفس نسبة الضغط ، وتكون درجة حرارة الهواء عند مدخل الوحدة مساوية لـــ 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 كـــ 0.7 ، ويكون التبريد البيني كاملاً بين مرحلتي الضاغط. تجاهل جميع الفقودات في الضغط، وافترض أن التغييرات في السرعة تكون صغيرة بحيث يتم تجاهلها . احسب أيضاً الكفاءة الحرارية الإجمالية للمحطة.

Ans. {14,460 kw ؛ 25.7%}

5.6 مسألة (6): إيجاد الكفاءة الحرارية الإجمالية، القدرة المنتجة، واستهلاك الوقود النوعي بتجاهل فقودات الضغط والتغييرات 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 لـــ 800°C ودرجة حرارة الهواء المدخل للوحدة مساوية لـــ 15°C . كفاءة ثابت القصور الحراري للانضغاط هي 0.8 ، وتلك لكل توربينة هي 0.85 ؛ تكون الكفاءة الميكانيكية لكل عمود هي 98% . بتجاهل فقودات الضغط والتغييرات في طاقة الحركة ، احسب الكفاءة الحرارية الإجمالية والقدرة المنتجة عندما تكون سريان كتلة الهواء مساوية لـــ 0.7 kg/s . يتم افتراض النسبة الحرارية للمبادل الحراري مساوية لـــ 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}

5.7 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 بالـــ kw لكل kg/s والكفاءة الحرارية عندما تسافر الطائرة بسرعة 725 kw/h عند ارتفاع تكون عنده درجة الحرارة المحيطة مساوية لـــ −7°C .

تجاهل فقد الضغط في غرفة الاحتراق ، وافترض أن الغازات في التوربينة تتمدَّد أسفل إلي الضغط الجوي ، وتغادر الطائرة عند سرعة مقدارها 725 kw/h بالنسبة للطائرة.

Ans. {166.7 kw per kg/s, 27.8%}

5.8 مسألة (8): قدرة الخرج النوعية والكفاءة الحرارية عندما لا يتم تجاهل فقد الضغط

يكون الفقد في الضغط الكلي في إجراء الاحتراق في المسالة (7) هو 3% من ضغط المدخل الكلي إلي الغرفة . احسب قدرة الخرج النوعية والكفاءة الحرارية عندما لا يتم تجاهل فقد الضغط .

Ans. {164 kw per kg/s ؛ 27.3%}

5.9 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 °C و 1.0133 bar ويتم انضغاطه خلال نسبة ضغط مقدارها 10. يُمرَّر الهواء المغادر للضاغط خلال مبادل حراري قبل إدخاله إلى غرفة الاحتراق. تغادر الغازات الساخنة غرفة الاحتراق عند 800°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° C قبل تمدّدها خلال توربينة القدرة، ومن بعد إلى المبادل الحراري حيث تنساب 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 %}

5.10 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 مولّداً يقوم بدوره بإمداد محرك كهربائي بقدرة مقدارها 2400 kw . الكفاءة الإجمالية الميكانيكية والكهربائية هي 92%. بعض من غاز العادم من التورين 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 يُمرَّر إلى الجو عند 400°C . للضاغط نسبة ضغط مقدارها 8 ويكون الهواء عند مدخل الضاغط عند 1.013 bar و 20 °C . هبوط الضغط في جانب الهواء للمبادل الحراري يســـاوي 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، ومعدّل سريان كتلة الوقود، احسب:

(i) معدّل 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%}

5.11 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 يُمرَّر بسريان متعاكس مع الهيليوم المغادر للتوربين. يتم تبريد الهيليوم المغادر للتوربين في المبادل الحراري قبل إمراره خلال مُبَرِّد 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 الأوّل = 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 كُلٍّ مكوِّنة:

المبرّد البيني والمبرّد الخارجي = 1% .

كُلٌ جانب من المبادل الحراري = 2% .

السخّان الخارجي = 3% .

خذ γ للهيليوم مساوية لـ 1.666 .

Ans.{32.6%}

الكتب والمراجع

الكتب والمراجع العربية:

1. أسامة محمد المرضي سليمان خيَّال، " مذكرة محاضرات ديناميكا حرارية I "، جامعة وادي النيل، كلية الهندسة والتقنية، قسم الهندسة الميكانيكية، (1993م).
2. أسامة محمد المرضي سليمان خيَّال، "مذكرة محاضرات التوربينات الغازية والبخارية"، جامعة وادي النيل، كلية الهندسة والتقنية، قسم الهندسة الميكانيكية، (1994م).
3. بروفسير/ الفاضل آدم عبد الله، "مذكرة محاضرات الديناميكا الحرارية وانتقال الحرارة"، جامعة وادي النيل، كلية الهندسة والتقنية، قسم الهندسة الميكانيكية، (1975م).
4. بروفسير/ صابر محمد صالح، "مذكرة محاضرات ديناميكا حرارية وانتقال حرارة وكتلة"، جامعة السودان للعلوم والتكنولوجيا، كلية الهندسة، قسم الهندسة الميكانيكية، (1980م).
5. أسامة محمد المرضي سليمان خيَّال، "مذكرة محاضرات ديناميكا حرارية II "، جامعة وادي النيل، كلية الهندسة والتقنية، قسم الهندسة الميكانيكية، (1995م).
6. عمار سند على عبدان، "كيفية عمل المحركات النفاثة في الطائرة"، اليمن، تعز، (2010م).
7. مهندس صالح سعيد بوحليقة، "التوربينة الغازية"،

. (2009م) ، www.e-kutub.com ، Email: zwuitina@yahoo.com

8. أسامة محمد المرضي سليمان خيَّال، " مذكرة محاضرات تعديلات الدورة الأساسية للتوربينة الغازية"، جامعة وادي النيل، كلية الهندسة والتقنية، قسم الهندسة الميكانيكية، (2000م).

مهندس صالح سعيد بوحليقة، "مكونات التوربينة الغازية"، محطة كهرباء الزويتينة الغازية– ليبيا،

. (2009م) ، www.e-kutub.com ، Email: zwuitina@yahoo.com

9. أحمد حسن أحمد، "دراسة أداء محطة بيجى الغازية الوحدة الأولى والثالثة"، مجلة تكريت للعلوم الهندسية، المجلد 17، العدد4، (2010)، الصفحات(45-55).

10. أسامة محمد المرضي سليمان خيّال، "مذكرة محاضرات محطات القدرة الحرارية"، جامعة وادي النيل، كلية الهندسة والتقنية، قسم الهندسة الميكانيكية، (2002م).

11. أسامة محمد المرضي سليمان خيّال، "دراسة جدوى فنية واقتصادية لإنشاء محطة توليد بتوربين غازي"، جامعة وادي النيل، كلية الهندسة والتقنية، قسم الهندسة الميكانيكية، (2005م).

الكتب والمراجع الإنجليزية:

1. Eastop and McConkey, "Applied Thermodynamics for Engineering Technologists, Longman Singapore Publishers LTD., Singapore (1994).

2. Rogers and Mayhew, "Engineering Thermodynamics Work and Heat Transfer", Longman Group Limited London and New York, Third Edition, (1980).

3. Claire M. Sores, "Gas Turbines in Simple Cycle and Combined Cycle Applications", P.E.; Fellow ASME; MBA, Email: Claisoar@aol.com, (2016).

4. V.Ganesan, "Gas Turbines", Tata McGraw-Hill Education, (2003).

5. H. Cohen, G.F.C. Rogers, H.I.H. Sara Vana Muttoo, "Gas Turbine Theory", 4th Edition, Longman Group Limited, Longman House, Burnt Mill, Harlow, Essex CM 20 2JE, England and Associated Companies throughout the World, (1996).

6. William W. Bathie,"Fundamentals of Gas Turbines", Second Edition, Library of Congress, ISBN: 0-471-31122-7,(1996).

7. Meherwan P. Boyce, "Gas Turbine Engineering Handbook", Fourth Edition, Elsevier Inc.,(2011).

8. Claire Soares, "Gas Turbines", Second Edition, A Handbook of Air, Land and Sea Applications, ISBN: 978-0-12-410461-7, Elsevier Inc. (2014).

9. Bahman Zohuri," Gas Turbine Working Principles", Springer Link,(2015).

10. Desmond E. Winterbone, "Advanced Thermodynamics for Engineers, John Wiley and Sons, New York, (1997).

11. P. K. Nay. "Power Plant Engineering" Tata McGraw- Hill Publishing Company Limited, New Delhi, (2006).

12. Black and Vetch, "Power Plant Engineering", Amazon Books, (2005).

* المصدر الأساسي للطاقة الحرارية هو الطاقة الكيميائية المخزنة في الأسطح بالوقود التي تنطلق عند إحتراقه مع الهواء.
* المحروقات مثل البترول، الفحم، والغاز الطبيعي تشكلت بإجراءات طبيعية خلال ملايين السنين نتيجة تحلل مخلفات حيوانية ونباتية تحت سطح الأرض.
* هذه المحروقات تسمى بالمحروقات الأحفورية الحرية (fossil fuels) وهي وقود مستنفذة أي قابلة للإستنفاد نتيجة للطلب العالي عليها في الصناعات المختلفة صغيرة، متوسطة، كبيرة وفي تشغيل أغراب السيارة ومحركات الإحتراق الداخلي والتدفئة المنزلية والغازية وغيرها من التطبيقات الهندسية.
* الطلب العالي على هذه المحروقات أجبر العالم على إيجاد مصادر جديدة للطاقة تحل محل المحروقات الأحفورية مثل طاقة الشمس (solar energy)، طاقة تيارات الرياح (wind current energy)، طاقة تيارات المياه (water current energy)، طاقة حرارة باطن الأرض، البيوغاز أي الغاز الحيوي، والبيوماس أي الكتلة الحيوية، بالإضافة لطاقة تيارات المد والجزر (tidal energy)، بالإضافة للطاقة المائية (hydroelectric energy).
* حيث سنرى على المدى القريب استخدام سيارات وطائرات تعمل بالطاقة الشمسية.

مميزات ومحددات الطاقة البديلة: (Advantages and Limitations of Alternative renewable energy)

الطاقة الشمسية: أ/ المميزات

i/ الطاقة من الشمس مجانية ومتوفرة.
ii/ لا تنتج غازات مثل CO_2 و CO والهيدروكربونات.

ب/ المحددات:-
i/ في الوقت الحالي غالية بناء محطات القدرة الشمسية ذو تكلفة عالية جداً (تكلفة الخلايا الشمسية والبطاريات).
ii/ لا تتوافر في جميع الأماكن (فقط في المناطق الصحراوية والاستوائية).
iii/ لا تتوفر أثناء الليل.

الفصل السادس
إستخدامات الطاقة

طاقة تيارات الرياح :-

المميزات :-

i/ لا تتسبب في انتاج غازات المنزل الزجاجي (greenhouse gases)

ii/ قد يصل عمر الوحدة الى 25 سنة

iii/ آمنة الاستخدام

المحددات :-

i/ تحتاج لعدد كبير من التوربينات لتوليد الكهرباء

ii/ تستخدم فقط في الأماكن ذات سرعات الرياح العالية (أكبر من 3 m/s).

الطاقة الكهروماائية (Hydro-electric)

المميزات :-

i/ لا تتسبب في إنتاج غازات المنزل الزجاجي

ii/ الطاقة المائية متجددة ولا تستنفد

iii/ الطاقة الكهروماائية أكثر اعتمادية من طاقة الرياح أو الطاقة الشمسية.

المحددات :-

i/ الطاقة أو المعدة الكهروماائية تحتاج لكميات كافية من الماء لإدارة التوربينات.

ii/ بناء السدود مكلف جداً. (تغييراً كبيراً في حوض النهر ومسار مجرى النهر)

iii/ بناء سدود ضخمة مثل سد المزينة قد يتسبب أحياناً في مجرى النهر وبالتالي يؤثر على الإنسان والبيئة الحية من حيوانات ونباتات. بالتالي تحليه استخدام سدود صغيرة.

طاقة الكتلة الحيوية :- (Biomass energy)

المميزات :-

i/ [illegible] وقود الكتلة الحيوية رخيص الثمن حيث يستخدم مخلفات الحيوانات والنباتات التي عادة ما يتم التخلص منها (أي تحليه اعتبارها مخلفات للبيئة)

ii/ وقود الكتلة الحيوية لا يستنفد.

المحددات :-

i/ زراعة محاصيل الكتلة الحيوية (القمح، قصب السكر، الذرة وغيرها) يحتاج مساحات كبيرة بالتالي قد يحتل مساحات محاصيل أكثر أهمية لغذاء الإنسان.

ii/ ينتج عنه غاز CO_2 عند التخمير والحرق

مميزات ومحددات الطاقة غير المتجددة :-
Advantages and disadvantages of Non-renewable energy

الفحم (coal) :-

المميزات :-

i/ الفحم رخيص نسبياً أرخص شكل من أشكال الطاقة .
ii/ ما تزال هناك أماكن عديدة في المملكة المتحدة UK وبقية العالم يمكن إيجاد الفحم فيها .
iii/ سهل النقل إلى محطات القدرة .

المحددات :-

i/ إمدادات الفحم ستنفذ خلال 100 عام .
ii/ عند حرق الفحم ينتج كميات كبيرة من غازات المنزل الأخضر (CO_2) .
iii/ يستنفد الفحم من مناجم في باطن الأرض وهي خطرة وتؤثر على البيئة المجاورة .

الغاز والزيت (gas and oil)

المميزات :-

i/ الزيت والغاز يوجدان في أماكن عديدة حول العالم .
ii/ يمكن نقلهما بسهولة عبر خطوط الأنابيب أو عبر السفن .
iii/ الغاز الطبيعي هو الأنظف في الوقود الأحفوري الحراري حيث يطلق نصف غازات المنزل الأخضر = التي يطلقها الفحم .

المحددات :-

i/ إمدادات الزيت والغاز قابلة للنفاد . وعندما تنفد فإنها ستنفد للأبد .
ii/ العمل على أجهزة تعمل بالغاز أو الزيت يمكن أن يكون خطيراً على الأشخاص (الإنفجارات، الحرائق، ... إلخ) والبيئة المحيطة (تدفقات وتسربات الغاز أو الزيت) (oil spills) .
iii/ حرق الزيت والغاز يطلق تلوثاً يزيد من درجة حرارة الكوكب (global warming)

الطاقة النووية (Nuclear energy)

المميزات :- i/ المفاعل النووي لا ينطلق منه غازات الغلاف الأخضر
ii/ مقدار صغير جدا من الوقود النووي يلزم كافيا لانتاج كميات ضخمة من الطاقة .

المحذورات :- i/ امداد المفاعل النووي ستنفد خلال 50 عاما
ii/ المخزنات النواتج (waste products) من المفاعلات النووية (البقايا النووية) تلزم نشطة إشعاعيا (radioactive) وبالتالي تلزم خطيرة لفترات طويلة من الزمن. في الوقت الحالي لا يوجد تخزين آمن للبقايا النووية.

لا يتوفر أي وحيد

التنبؤات بمصادر الطاقة وبأ ستخدامات الطاقة على مستوى العالم من الصعوبة بمكان تحديدها وذلك لحقيقة اليقينية تقول أن العقود العظمى ستتلاشى وسيستنفد في المستقبل القريب. بالتالي يجب إيجاد مصادر جديدة للطاقة ويجب إستخدام الطاقة بترشيد أكبر وبكفاءة عالية.

هناك تبدل واضح لبعض الحقائق والعديد من الدول اليوم تقوم بتنفيذ سياسات ترشيد الطاقة وتشجيع البحث العلمي للإسراع في خلق أجيال جديدة تقوم بإستخدام الطاقة بكفاءة عالية.

العوامل التالية توضح تعقيدات هذه المشكلة :-

1/ هناك تفاوت كبير في توزيع مصادر العقود في العالم من وجهة نظر الطلب على الطاقة.

2/ إمكانية الوصول إلى العقودات قليلة إستخلاصها.

3/ موقف الدول من الطاقة مختلف جداً فسنويسرا ذات إمداد منخفض لعقود الفاز الطبيعي بينما المملكة المتحدة أعلى إحتياطات للفحم / الزيت والفاز. بالتالي فإن بعض الدول ستقوم بتطوير تكنولوجيات جديدة للإستفادة من مصادر جديدة للطاقة بينما ستعتمد دول أخرى على العقودات التقليدية المتوفرة لديها.

4/ تأثير الطلب على الطاقة من قبل الدول النامية من أجل إنشاء مشاريع البنية التحتية لديها من طرق كهربائي وسدود ومخزانات ومصانع متوسطة وكبيرة ومستلزمات كمالية وغيرها.

5/ التغيرات السياسية والإستقرار السياسي للدول ذات الإمدادات العالية للطاقة.

6/ الإمدادات البعيدة تكون معرضة للتخريب (sabotage).

7/ السعة التخزينية محدودة.

8/ الطلب على الطاقة لا يحكمه التحليل فيد يزيد متغيرات خلال اليوم وخلال السنة.

9/ تراث الحكومة يحكمه أن تؤثر في الطلب على العقود وتوفير وقودات أساسية.

10/ التغييرات في التكنولوجيا لا يتم تنظيمها بسهولة حسب الحاجة.

11/ عدم الإستجابة الكافي للوقودات التي تلوث البيئة (منظمات حماية البيئة).

12/ أسعار العقود تمثل الملمح الأساسي في إستراتيجيتها وهذا يعتمد على ترتيبة السعر العالمي.

الدورات المتحدة :- (Combined cycles)

في وحدة القدرة التقليدية صنفان معقدات كبيرة للطاقة نتيجة للحرارة التي يتم طردها دورة الإستعادة مثلا . إحدى الوسائل التي تجعل إنتاج القدرة أكثر كفاءة هي إستخدام دورة تتلقى منه وحدتي قدرة حيث يُستفاد من الحرارة المطرودة من الوحدة الأولى في إمداد الحرارة للوحدة الثانية .

يتم إستخدام دورة تقريبية غاز مع دورة تقريبية بخار . تقريبية الغاز هي الوحدة ذات درجة الحرارة الأعلى حيث أن الغازات المغادرة للتقريبية تملك عند درجة حرارة كافية ليتم إستخدامها كمصدر للحرارة لإنتاج بخار عند ضغط ودرجة حرارة مناسبين .

الشكل 17-3 أدناه يوضح هذا الإتحاد بإستخدام وحدة تقريبية غاز مغلق الدورة ، والشكل 17-4 يوضح ترتيبة لتقريبية غاز مفتوح الدورة حيث تمر غازات العادم مباشرة لمولد البخار . تسمح وحدة الدورة المشتركة بجزء وقود إضافي في جيول غاز العادم في المولد بما أن نسبة الهواء / الوقود لتقريبية غاز تملك عالية وصنالك أكسجين كافٍ في عادم التقريبية لإستدامة إحتراق إضافي .

مثال (1): في محطة قدرة مشتركة من وحدة تقديم غاز ووحدة تقديم بخار يتم إمداد عادم تقديم الغاز إلى مولد البخار. استخدما البيانات أدناه، احسب صافي معدل سريان الكتلة للوقود، ثم صنعة التغذية وجميع نقطات الضغط، أعرض:-

i/ كفاءة الدورة لدورة تقديم الغاز.

ii/ كفاءة الدورة لدورة تقديم البخار إذا تم إمداد الحرارة إلى مولد البخار بواسطة إمداد مقترح خارجي

iii/ معدلات سريان الكتلة للهواء إلى تقديم الغاز وسريان الكتلة للبخار إلى تقديم البخار.

iv/ الكفاءة الإجمالية للدورة المشتركة.

بيانات :- نسبة الضغط لدورة تقديم الغاز 8

درجة حرارة الهواء المدخل إلى الضاغط 15°C

درجة الحرارة القصوى لدورة تقديم الغاز 800°C

درجة حرارة الغازات العادمة لمولد البخار 160°C

حالات البخار عند مدخل التقديم 20 bar، و 400°C

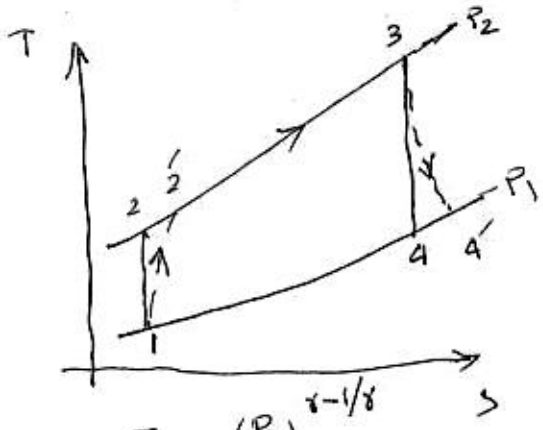
ضغط المكثف 0.05 bar

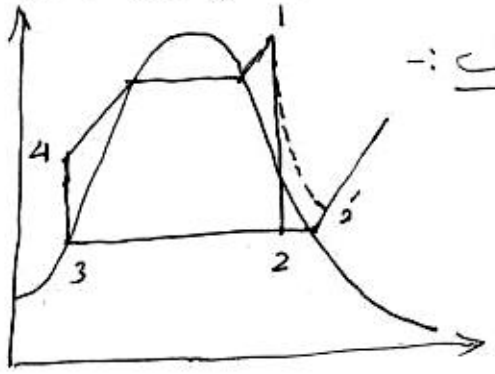
قدرة الخرج الكلية للمحطة، 50 MW

كفاءات كل من المضخة والضاغط الهوائي، تقديم الغاز وتقديم البخار 80%، 82%، 80% على التوالي

c_p و γ لغازات الاحتراق هما 1.11 kJ/kg K و 1.333.

الحل :-





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

$$\therefore T_2 = T_1 \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{0.4/1.4}$$

$T_1 = 15 + 273 = 288\,K$

$$\therefore T_2 = 288\,(8)^{0.4/1.4} = 521.7\,K$$

(7)

$$\eta_{isen,C} = \frac{\text{الشغل المثالي (ثابت الضغط الحراري)}}{\text{الشغل الفعلي}} = \frac{T_2 - T_1}{T_2' - T_1} \quad , \quad T_2' - T_1 = \frac{T_2 - T_1}{\eta_{isen,C}} \quad \therefore T_2' = T$$

$$\therefore T_2' = 288 + \frac{(521.7 - 288)}{0.8} = \underline{580.1\ K}$$

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

$$\therefore T_3 = 800 + 273 = \underline{1073\ K}$$

$$\therefore T_4 = \frac{1073}{(8)^{0.333/1.333}} = \underline{638.3\ K}$$

$$\eta_{isen,T} = \frac{\text{الشغل الفعلي}}{\text{الشغل ثابت الضغط الحراري}} = \frac{T_3 - T_4'}{T_3 - T_4} \quad , \quad \therefore T_4' = T_3 - \eta_{isen,T}(T_3$$

$$\therefore T_4' = 1073 - 0.82(1073 - 638.3) = \underline{716.5\ K} = 44$$

$$W_{net\ o/p} = \text{شغل التوربين} - \text{شغل الضاغط}$$

$$= C_{pg}(T_3 - T_4') - C_{pa}(T_2' - T_1)$$

$$= 1.11(1073 - 716.5) - 1.005(580.1 - 288) = \underline{102.2\ k}$$

$$Q_{supplied} = C_{pg}(T_3 - T_2') = 1.11\ (1073 - 580.1) = \underline{547.1\ kj/kg}$$

$$\eta_{gt} = \frac{W_{net\ o/p}}{Q_{supplied}} = \frac{102.2}{547.1} = \underline{18.7\ \%}$$

جداول البخار ، عند $T = 400^\circ C$ ، $P = 20\ bar$

$h_1 = 3248\ kj/kg$

$h_f = h_3 = h_4 = 138\ kj/kg$ ، عند $P = 0.05\ bar$ ، ...

$h_2 = 2173\ kj/kg$

$$h_2 = h_{f_2} + x\, h_{fg_2}$$

$$s_1 = s_2 = s_{f_2} + x\, s_{fg_2}$$

$$\eta_{isen,T} = \frac{h_1 - h_2'}{h_1 - h_2}$$

$$\therefore h_1 - h_2' = \eta_{isen,T}(h_1 - h_2)$$

$$= 0.8(3248 - 2173) = \underline{860\ kj/kg}$$

$\therefore$ شغل خرج التوربين ، $W = \underline{860\ kj/kg}$

مولد البخار — الحرارة التي يتم امتصاصها! $= h_1 - h_3 = 3248 - 138$

$= 3110 \text{ kj/kg}$

$\eta_{st} = \frac{860}{3110} = 27.7\%$ — كفاءة دورة البخار / كفاءة الطاقة في مولد البخار — كمية حرارة الغاز / الطاقة الحرارية المتحررة

الطاقة الحرارية — كمية حرارة الغاز المتحررة — كفاءة الطاقة في مولد البخار

$\dot{m}_a \times 1.11 \times (443.5 - 160) = \dot{m}_s (3110)$

الطاقة الحرارية المفقودة في تسخين الغاز = الطاقة الحرارية للتسخين في مولد البخار

$\frac{\dot{m}_a}{\dot{m}_s} = 9.883$

$\therefore \dot{m}_a = 9.883 \dot{m}_s$

قدرة الخرج الكلية = 50MW

قدرة الخرج الكلية $= \dot{m}_a W_{net/op\ gas\ turbine} + \dot{m}_s W_{net/op\ steam\ turbine}$

$\dot{m}_a (102.2) + \dot{m}_s (860) = 50,000$

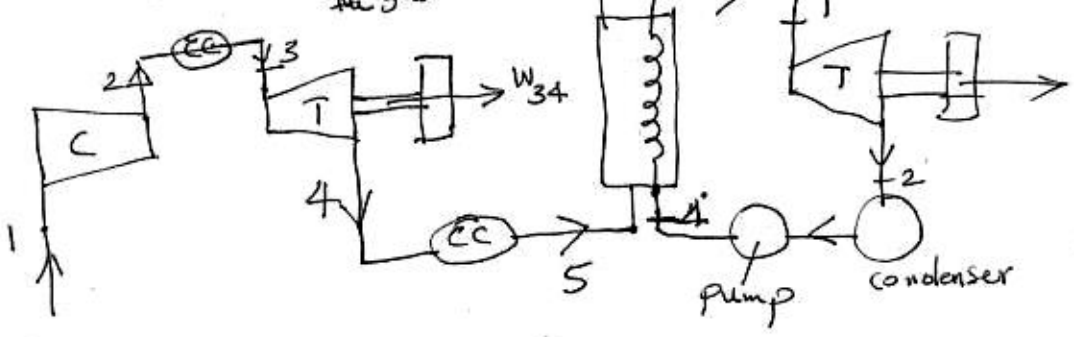
$9.883 \dot{m}_s (102.2) + \dot{m}_s (860) = 50,000$

$\dot{m}_s \{(9.883 \times 102.2) + 860\} = 50,000$

$\therefore \dot{m}_s = 26.74 \text{ kg/s}$

$\therefore \dot{m}_a = 9.883 \times 26.74 = 264.3 \text{ kg/s}$

$\eta_{combined\ cycle} = \frac{50,000}{\dot{m}_a Q_{supp\ to\ the\ gasturbine}} = \frac{50,000}{264.3 \times 547.1} = 34.6\% = \frac{P_{o/p}}{P_{i/p}}$



(9)