

بسم الله الرحمن الرحيم

جامعة وادي النيل - كلية الهندسة والتقنية

قسم الهندسة الميكانيكية

برنامج بكالوريوس الشرف في الهندسة الميكانيكية

الفصل السادس

# حرارية 2

إعداد:

الأستاذ/أسامة محمد المرضي

العنصر الخامس  
الإحراق  
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 المبادئ الأولية التي قابلناها في الأعوام الماضية للدراسة. لكننا يمكن أن نعطي توضيحاً مختصراً.  
الذرات [ atoms ] : هي الجزء الأصغر في تركيب العناصر الكيميائية التي تلعب دوراً رئيسياً في 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 يشكل جزيء (e.g. الأكسجين) ، وتكون ذرات كل جزيء متماسكة مع بعضها البعض بواسطة رابطة بينية قوية.

فعزل جزيء الأكسجين يصبح مرهقاً ولكنه ممكناً.

تتكون جزيئات بعض المواد بتزاوج ذرات لعناصر متباينة . وكمثال لذلك ، الماء ( الذي يكون كيميائياً مشابهاً للثلج أو البخار ) له جزيء يتكون من ذرتين من الهيدروجين وذرة واحدة من الأكسجين.

لذرات العناصر المختلفة كتل مختلفة وهذه تكون هامة في حالة التحليل الكمي

[ quantitative analysis ] .

بما أن الكتل الحقيقية تكون متناهية في الدقة [ Infinitesimally small ] فيتم استخدام نسب

للذرات أو الجزيئات

الكتل.

تُعطي هذه النسب بالكتل الذرية النسبية مأخوذة على المقياس الذي يعرف 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.

يُعطي الجدول رقم (1) أذناه 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 <sub>2</sub>	H <sub>2</sub>	C	S	N <sub>2</sub>
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 كآلاتي  $2H_2$  ، 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	$H_2O$	$2 \times 1 + 1 \times 16 = 18$
أول أكسيد الكربون	CO	$1 \times 12 + 1 \times 16 = 28$
ثاني أكسيد الكربون	$CO_2$	$1 \times 12 + 2 \times 16 = 44$
ثاني أكسيد الكبريت	$SO_2$	$1 \times 32 + 2 \times 16 = 64$
الميثان	$CH_4$	$1 \times 12 + 4 \times 1 = 16$
الإيثان	$C_2H_6$	$2 \times 12 + 6 \times 1 = 30$
البروبان	$C_3H_8$	$3 \times 12 + 8 \times 1 = 44$
البيوتان	$C_4H_{10}$	$4 \times 12 + 10 \times 1 = 58$
الإيثيلين	$C_2H_4$	$2 \times 12 + 4 \times 1 = 28$
البروبيلين	$C_3H_6$	$3 \times 12 + 6 \times 1 = 42$
البنتين	$C_5H_{12}$	$5 \times 12 + 12 \times 1 = 72$
البنزين	$C_6H_6$	$6 \times 12 + 6 \times 1 = 78$
التولين (toluene)	$C_7H_8$	$7 \times 12 + 8 \times 1 = 92$
الأوكتان	$C_8H_{18}$	$8 \times 12 + 18 \times 1 = 114$

#### 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 :

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

تكون التحاليل متشابهة ولكنها يمكن أن تختلف من عينة لأخرى خلال المجموعة. هنالك تحليل آخر للفتح يسمى بالتحليل الملازم [Proximate analysis] حيث يعطى النسب المئوية للرطوبة، المادة الطيارة، المادة الصلبة القابلة للاحتراق (تسمى بالكربون المثبت) والرماد. يوجد الكربون المثبت كبقايا لخصم النسب المئوية للكميات الأخرى. تشمل المادة الطيارة الماء المشتق من التفكك الكيميائي للفتح [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 خلطات 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 للفتح. أول أكسيد الكربون هو وقود غازي هام يتكون من خلطات غازية أخرى وهو أيضاً نتاج للاحتراق غير الكامل للكربون.



جدول رقم (4) تحليلات الوقودات السائلة

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

**معادلات الاحتراق [Combustion equations]:**

تدخل الكتل المتناسبة من الهواء والوقود إلى غرفة الاحتراق حيث يتم التفاعل الكيميائي وتخرج نواتج الاحتراق خلال ماسورة العادم إلى الخارج. حسب قانون بقاء الكتلة فإن الكتلة تظل ثابتة (i.e.) الكتلة الكلية للنواتج تساوي الكتلة الكلية للمواد المتفاعلة، وتختلف المواد المتفاعلة كيميائياً عن النواتج حيث تغادر النواتج عند درجة حرارة عالية.

يظل العدد الكلي للذرات لكل عنصر في الاحتراق ثابتاً ولكن يُعاد ترتيب الذرات في مجموعات تمتلك خواص كيميائية مختلفة. يتم التعبير عن هذه المعلومة بالمعادلة الكيميائية التي توضح :-

a/ المواد المتفاعلة والمواد الناتجة من التفاعل.

b/ الكميات النسبية للمواد المتفاعلة والمواد الناتجة.

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

توضح المعادلة عدد الجزيئات لكل مادة متفاعلة وناتجة. يتناسب المول مع عدد الجزيئات وعليه فإن الأرقام الجزيئية النسبية للمادة المتفاعلة والناتجة تُعطى التحليل المولي أو الحجمي 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 :-

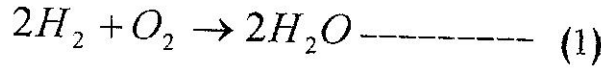
$$23.3\% O_2 , 76.7\% N_2$$

وبالحجم كالآتي :-

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

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

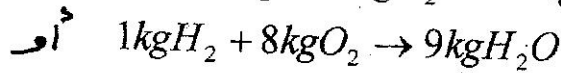
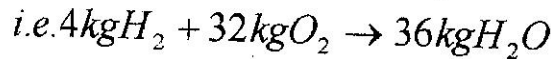
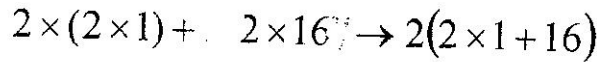
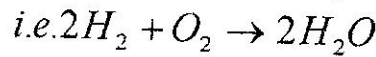
اعتبر المعادلة التالية للهيدروجين



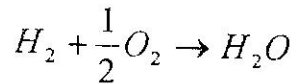
وهذا يعني أن:-

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

i.e. 2 حجم من  $H_2$  + 1 حجم من  $O_2$  ← 2 حجم من  $H_2O$  .  
 $H_2O$  يمكن أن يكون سائلاً أو بخاراً اعتماداً على ما إذا تمّ تبريد الناتج بصورة كافية حتى يتكثف .  
ويمكن الحصول على التناسب بالكتلة باستخدام الكتل الذرية النسبية .



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



يمكن ملاحظة التالي من المعادلة (1) :

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

الحجم الكلي للمادة الناتجة = 2 حجم

عليه يكون هنالك انكماش حجمي عند الاحتراق .

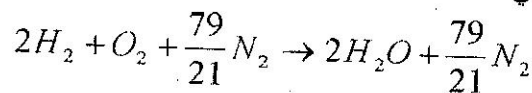
بما أن الأكسجين يكون مصاحباً بالنيتروجين عند إمداد الهواء للاحتراق ، فيجب تضمين النيتروجين

في المعادلة .

وبما أن النيتروجين يكون خاملاً خلال التفاعل الكيميائي فسيظهر على جانبي المعادلة لكل مول من

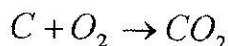
الأكسجين هنالك 79/21 مول من النيتروجين .

عليه تصبح المعادلة (1) كالآتي :-

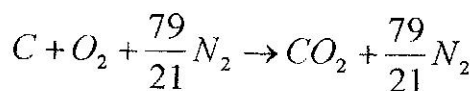


يمكن إيجاد معادلات مشابهة لاحتراق الكربون .

a / الاحتراق الكامل للكربون ليتحول إلى ثاني أكسيد الكربون



وبتضمنين النيتروجين

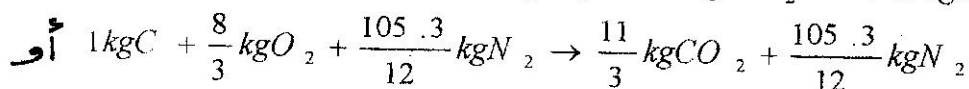
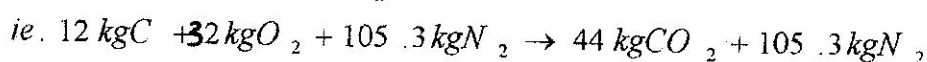
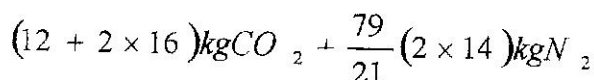
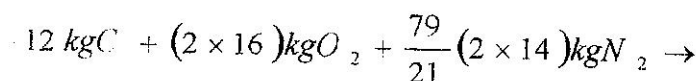


باعتبار حجوم المواد المتفاعلة والمواد الناتجة

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

$N_2$

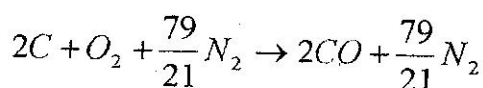
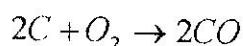
لقد تمّ اعتبار حجم الكربون يساوي صفراً لأنّ الحجم الصلد يمكن تجاهله مقارنة بحجم الغاز ،  
التحليل بالكتلة ،



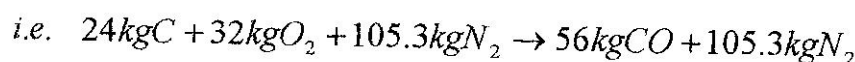
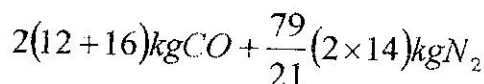
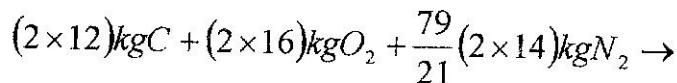
b / الاحتراق غير الكامل للكربون :- [ Incomplete Combustion of Carbon ]

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

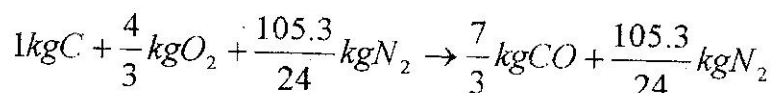
وبتضمنين النيتروجين



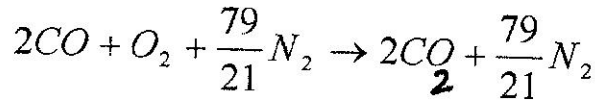
التحليل بالكتلة ،



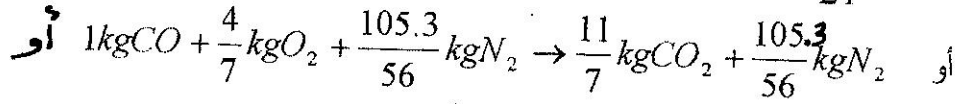
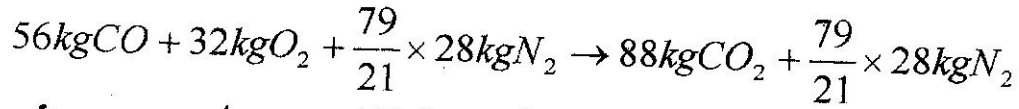
أو



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



وبالكتلة،



نسبة هواء إلى وقود متكافئة أو صحيحة كيميائياً:-

[stoichiometric , or chemically correct , air fuel ratio ]

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

الخليط الذي يحتوي على كميات زائدة من الهواء يسمى 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 ال A/F الفعلية - نسبة ال A/F المتكافئة) / (نسبة ال A/F المتكافئة) (2)-----

للقود الغازي فإن النسب يتم التعبير عنها بالحجم وللوقود الصلب والسائل فإن النسب يتم التعبير عنها بالكتلة .

تُعطى المعادلة (2) نتيجة موجبة عندما يكون الخليط ضعيفاً ونتيجة سالبة إذا كان الخليط غنياً .  
للعلاية (boiler plant) فإن 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 وتشغل في مدى واسع من متانة الخلائط.

(3)----- (نسبة ال A/F المتكافئة) / (نسبة ال A/F الفعلية) (نسبة ال A/F المتكافئة) (3)-----

تتراوح القيم التشغيلية في المدى بين 80% (ضعيف) إلى 120% (غنى) عندما يحتوي الوقود على بعض الأكسجين (e.g. الكحول الإيثيلي)  $C_2H_6O$  فإن 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 عينة من الغاز للتحليل غالباً ما يتم تبريدها إلى درجة حرارة ما دون درجة حرارة التشبع للبخر .

لا يضمن المحتوى البخاري في هذه الحالة في التحليل الذي يتم تصنيفه على أنه تحليل للنواتج الجافة. بما أن النواتج هي غازات فإنه غالباً ما يتم التحليل بالحجم . أما التحليل الذي يشمل البخار في العادم يسمى 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.

النواتج لكل kg من الفحم	الأكسجين المطلوب لكل kg من الفحم	معادلة الاحتراق	الكتلة لكل kg فحم
$0.9 \times \frac{44}{12} = 3.3 \text{ kg CO}_2$	$0.9 \times \frac{32}{12} = 2.4 \text{ kg}$	$C + O_2 \rightarrow CO_2$ $12 \text{ kg} + 32 \text{ kg} \rightarrow 44 \text{ kg}$	0.9
$0.03 \times 9 = 0.27 \text{ kg H}_2\text{O}$	$0.03 \times 8 = 2.24 \text{ kg}$	$2H_2 + O_2 \rightarrow 2H_2O$ $1 \text{ kg} + 8 \text{ kg} \rightarrow 9 \text{ kg}$	0.03
-	- 0.025 kg	-	0.025
0.01 kg N <sub>2</sub>	-	-	0.01
$0.005 \times \frac{64}{32} = 0.01 \text{ kg SO}_2$	$0.005 \times \frac{32}{32} = 0.005 \text{ kg}$	$S + O_2 \rightarrow SO_2$ $32 \text{ kg} + 32 \text{ kg} \rightarrow 64 \text{ kg}$ <b>32</b>	0.005
-	-	-	0.03
-	الجملة 2.620 kg	-	

من الجدول :-

الأكسجين O<sub>2</sub> المطلوب لكل kg من الفحم = 2.62 kg

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

(بما أن الهواء يحتوي على 23.3% أكسجين (O<sub>2</sub>) بالكتلة).

النيتروجين N<sub>2</sub> المتحد مع هذا الهواء =  $0.76 \times 11.25 = 8.63 \text{ kg}$

جملة النيتروجين N<sub>2</sub> في النواتج =  $8.63 + 0.01 = 8.64 \text{ kg}$

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

باستخدام المعادلة (2)

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

من المعادلة (2)

نسبة ال A/F الفعلية = نسبة ال A/F المتكافئة + النسبة المئوية للهواء الزائد × نسبة ال A/F المتكافئة

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

عليه فإن إمداد النيتروجين  $N_2$  ،

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

أيضاً ، إمداد الأكسجين  $O_2$  ،

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

في النواتج ،

$$N_2 = 10.36 + 0.01 = 10.37 \text{ kg}$$

والأكسجين الزائد  $O_2$

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

التحليل بالمجموع :-

المنتج Product	Mass/kg Coal	% by Mass	M Kg/kmol	kmol/kg Coal	% by vol. 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		

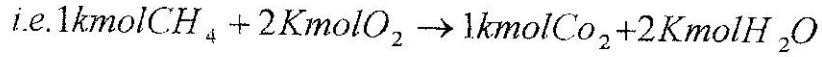
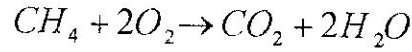
2 / تحليل إمداد من غاز الفحم كالاتي :-

$$H_2 49.4\%; CO 18\%; CH_4 20\%; C_4H_8 2\%; O_2 0.4\%; N_2 6.2\%; CO_2 4\%$$

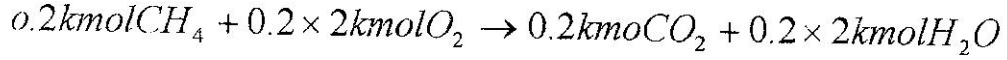
أحسب نسبة ال A/F المتكافئة. أوجد أيضاً التحليل الرطب والجاف لنواتج الاحتراق إذا كان

الخليط الفعلي 20% ضعيف .

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



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



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

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

( حيث أن الهواء يحتوي على 21% من  $O_2$  بالحجم )

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

لخليط 20% ضعيف ، وباستخدام المعادلة (2)

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

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

الأكسجين الزائد ،

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

ال kmol الكلي للنيتروجين  $N_2$  في النواتج ،

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

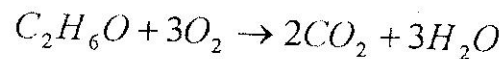
يتم توضيح التحليل بالحجم للنواتج الرطبة والجافة في الجدول التالي :-

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 ولا يوجد زمن لتضييعه في سبيل الوصول إلى تحاليل مضبوطة .

3/ أوجد نسبة A/F المتكافئة لاحتراق الكحول الإيثيلي ( $C_2H_6O$ ) في محرك بترولي. أحسب نسب A/F لمثانات الخليط 90% و 120% حسب تعريف المعادلة (3). حدّد التحاليل الرطبة والجافة بالحجم لغاز العادم لكل مثانة مزيج .

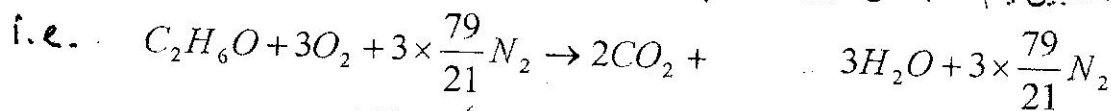
الحل: تكون معادلة الاحتراق للكحول الإيثيلي كالآتي :-



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 أنّ هنالك ستة ذرات من الهيدروجين في كل مول من الكحول الإيثيلي فسيكون هنالك ثلاثة مولات من  $H_2O$  في النواتج لإعطاء ستة ذرات من الهيدروجين على جانبي المعادلة. وبموازنة ذرات الأكسجين ، نجد أنّ 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 الإيثيلي ، يجب إضافة ستة ذرات من الأكسجين ( أي ثلاثة مولات).

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



1kmol من الوقود يملك كتلة مقدارها  $46kg = (2 \times 12 + 6 \times 1 + 1 \times 16)$

3kmol من الأكسجين يملك كتلة مقدارها  $96 kg = (3 \times 2 \times 16)$



عليه ،

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

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

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

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

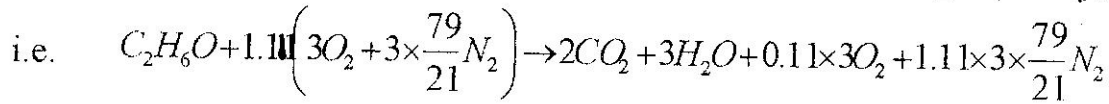
$$0.9 = ( 8.96 ) / ( \text{نسبة ال A/F الفعلية} ) =$$

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

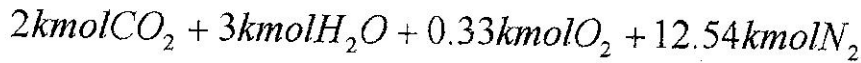
$$\text{هذا يعني أن الهواء المسحوب حقيقة يكون } 1/0.9 \text{ أو } \frac{9.95}{8.96} = 1.11 \text{ مرة}$$

الهواء الضروري للاحتراق الكامل .

سيحتوي العادم على 0.11 من الأكسجين المتكافئ



والنواتج هي :-



الكيلومولات الكلية ،

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

التحليل الرطب ،

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

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

الكيلومولات الجافة الكلية ،

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

عليه ، التحليل الجاف ،

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

$$\frac{12.54}{14.87} \times 100 = 84.4\% N_2$$

120%

اعتبر متانة المزيج ، من المعادلة (3) ،

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

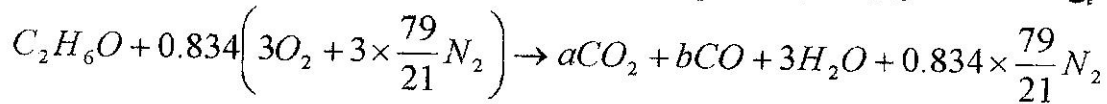
$$\therefore \text{نسبة ال A/F الفعلية} = \frac{8.96}{1.2} = 7.47/1$$

هذا يعني أن 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 فإن معادلة الاحتراق ستكون كالآتي :-



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

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

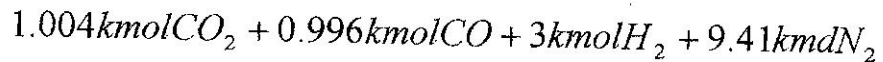
$$\text{موازنة الأكسجين : } 1 + 0.834 \times 3 = 2a + b + 3$$

ب طرح المعادلتين نتحصل على ،

$$a = 1.004$$

$$\text{و } b = 2 - 1.004 = 0.996$$

i.e. النواتج هي :-



عدد الكيلومولات الكلية الجافة ،

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

عليه ، التحليل الجاف

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

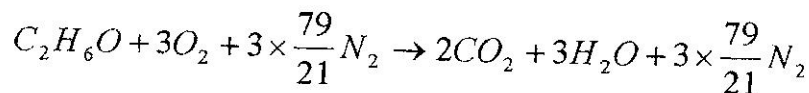
$$\frac{9.41}{11.41} \times 100 = 82.5\%$$

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

$65^\circ C$  وضغط 1.013 bar . أحسب أيضاً حجم نواتج الاحتراق لكل kg من الوقود بعد

التبريد إلى درجة حرارة  $120^\circ C$  عند ضغط 1 bar .

الحل :-



عليه ، عدد الكيلومولات الكلية للمواد المتفاعلة ،

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

ومن المعادلة المميزة للغازات ،

$$PV = nR_o T$$

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

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

(حيث  $T = 65 + 273 = 338 K$ )

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

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

عندما يتم تبريد النواتج إلى  $120^\circ C$  فإن الماء  $H_2O$  يوجد كبخار ، لأن درجة الحرارة تكون

أعلى من درجة حرارة التشبع نتيجة للضغط الجزئي للماء  $H_2O$

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

من المعادلة ،  $PV = nR_o T$

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

(حيث  $T = 120 + 273 = 393 K$ )

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

إذا تم تبريد النواتج في المثال (4) إلى  $15^\circ C$  عن ضغط ثابت ، أحسب كمية الماء الذي

سيكتثف لكل kg من الوقود.

الحل :- عند  $15^\circ C$  ، ولأن هنالك بعض التكثيف فإن البخار المتبقي (جاف مشبع) يظل على

التصاق مع السائل. ضغط التشبع عند  $15^\circ C$  هو  $0.01704 \text{ bar}$  ، وهذا هو الضغط

الجزئي للبخار الجاف المشبع.

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

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

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

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

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

i.e. عدد الكيلومولات للبخار الجاف المشبع المتبقي عند  $15^\circ C = 0.2305$

∴ عدد كيلومولات الماء المتكثف ،  $3 - 0.2305 = 2.77$  .  
 $1 \text{ kmol}$  من  $H_2O$  يحتوي على  $(2+16 = 18 \text{ kg})$  . عليه فإن كتلة الماء المتكثف هي  $2.77 \times 18 \text{ kg}$  لكل  $\text{kmol}$  من الوقود .

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

6/ يكون التحليل بالقياس الوزني [ Gravimetric analysis ] لعينة من الفحم هو كالآتي :-  
 $80\% \text{C}$  ،  $12\% \text{H}$  ، و  $8\% \text{رماد}$  . أحسب نسبة ال  $A/F$  المتكافئة وتحليل النواتج بالحجم .

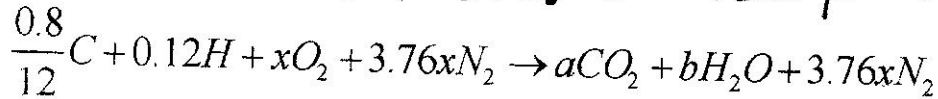
الحل:  $1 \text{ kg}$  من الفحم يحتوي على  $0.8 \text{ kg C}$  و  $0.12 \text{ kg H}$

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

اجعل الأكسجين المطلوب للاحتراق الكامل يكون  $x \text{ kmol}$  ، يكون النيتروجين المصاحب للأكسجين

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

ل  $1 \text{ kg}$  من الفحم تلمه معادلة الاحتراق كالآتي ،



عليه ،

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

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

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

كتلة  $1 \text{ kmol}$  من الأكسجين هي  $32 \text{ kg}$  ، عليه فإن كتلة الأكسجين  $\text{O}_2$  لكل  $\text{kg}$  من الفحم

هي :  $32 \times 0.097$

$$\text{i.e نسبة ال } A/F \text{ المتكافئة} = \frac{32 \times 0.097}{0.233} = 13.3/1$$

جملة كيلومولات النواتج ،

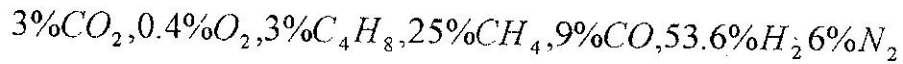
$$\begin{aligned} &= a + b + 3.76x \\ &= 0.067 + 0.06 + 3.76 \times 0.097 = 0.492 \text{ kmol} \end{aligned}$$

عليه فإن التحليل الرطب ،

$$\frac{0.067}{0.492} \times 100 = 13.6\% \text{CO}_2; \frac{0.06}{0.492} \times 100 = 12.2\% \text{H}_2;$$

$$\frac{0.365}{0.492} \times 100 = 74.2\% \text{N}_2$$

7/ محرك غازي يتم إمداده بغاز الفحم بالمكونات التالية :-

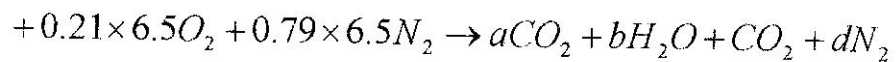
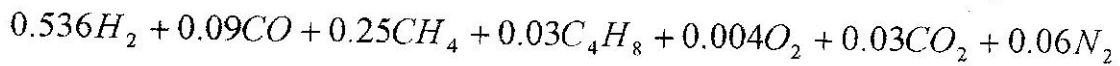


إذا كانت نسبة الهواء/ الوقود تساوي 6.5/1 بالحجم ، أحسب تحليل نواتج الاحتراق .

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

الحل: بما أن نسبة ال A/F الفعلية تكون أكبر من المتكافئة يتبع ذلك أن الهواء الزائد يتم إمداده

بالتالي تحتوي النواتج على  $CO_2, H_2O, O_2, N_2$  . ويمكن كتابة معادلة الاحتراق كالآتي :-



عليه ،

$$\therefore a = 0.49$$

موازنة الكربون :  $0.09 + 0.25 + 0.12 + 0.03 = a$

$$\therefore b = 1.26$$

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

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

$$\therefore d = 5.2$$

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

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 تم 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

للعيينة الأولية .

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

الامتصاص .

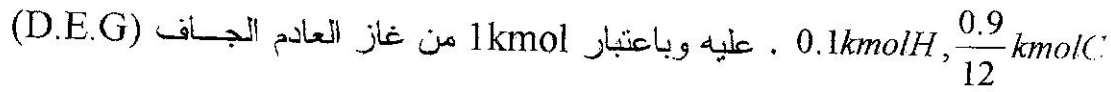
أمثلة محلولة :-

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

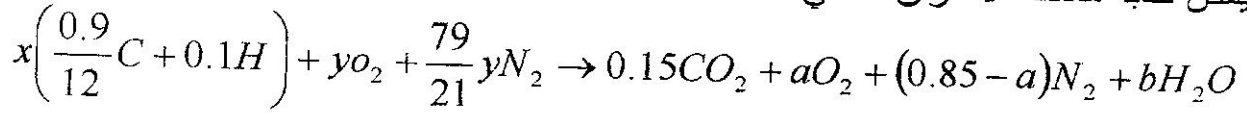
(benzole)

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

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



يمكن كتابة معادلة الاحتراق كآتي :-



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 .

$$\frac{0.9}{12}x = 0.15 \quad \therefore x = 2.0$$

$$0.1x = 2b \quad \therefore b = 0.1$$

$$2y = 2 \times 0.15 + 2a + b \quad \therefore y = 0.2 + a \quad (1)$$

$$3.76 \times 2 \times y = 2 \times (0.85 - a) \quad \therefore y = 0.226 - 0.266a \quad (2)$$

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

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

$$\therefore a = 0.0206$$

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

$\therefore$  الأكسجين الذي يتم إمداده ،

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

الهواء الذي يتم إمداده ،

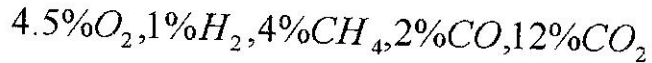
$$\frac{0.221 \times 32}{0.233} = 30.4kg/kmol D.E.G$$

بما أن  $x = 2$  ، فإن الوقود الذي يتم إمداده لكل كيلومول

D.E.G هو 2kg .

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

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



والمتبقى نيتروجين . أحسب التناسب بالكتلة للكربون إلى الهيدروجين في الوقود ،

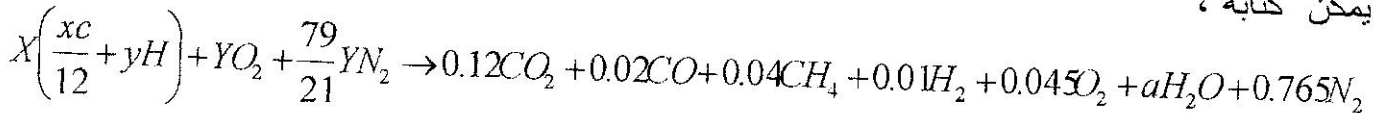
بافتراض أنه هيدروجين نقي .

الحل:

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

عليه وباعتبار 1kmol من D.E.G وبإدخال  $y$  كما معرف في المثال السابق ،

يمكن كتابة ،



عليه ،

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

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

$$\therefore a = 0.057$$

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

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

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

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

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 الازاحة الموجبة

6/ ماكينات الازاحة الموجبة (positive displacement m/cs): وظيفة الضاغط هي سحب كمية محددة من مائع ( عادة غاز ، وغالبا هواء ) وتصريفها عند ضغط مطلوب . الماكينة الاكثر كفاءة هي تلك التي ستكمل هذا بأدنى شغل ميكانيكى مدخل . تستخدم كل من ماكينات الازاحة الموجبة الترددية والدوارة لأغراض 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 النوعين .

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

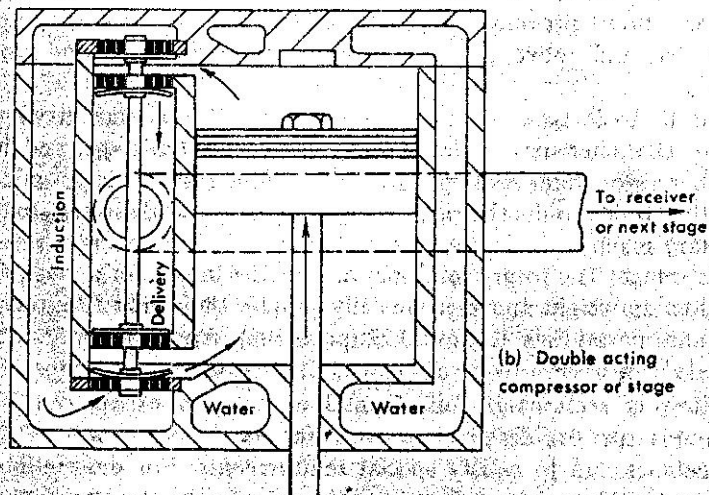
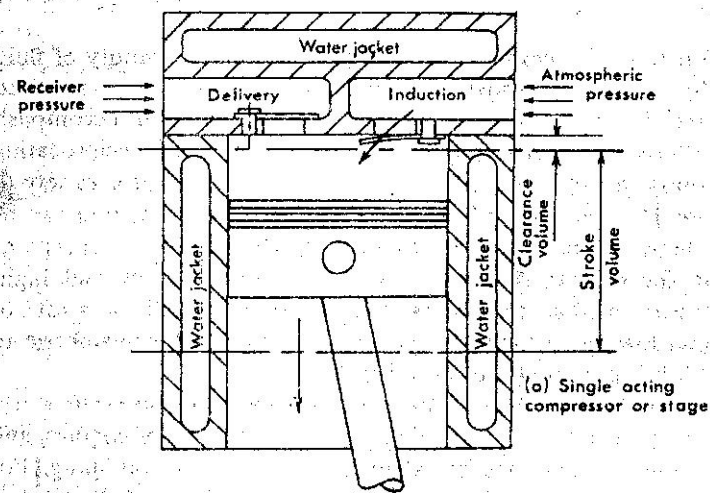
كلا النوعان الاساسيان يوجد فى اشكال مختلفة كل بمميزاته الخاصة . يمكن أن يكونا مفردى أو متعددى المرحلة ، واما أن يملكا تبريدا هوائيا أو مائيا . تكون الماكينة الترددية نبضية فى حركتها مما يحد من معدل تصريف المائع خلالها ، بينما تكون الماكينة الدوارة متصلة فى حركتها . تكون الماكينات الدوارة أصغر فى حجمها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

لضاغط يشغل بأسلوب دورى أو نبضى ، مثل الضاغط الترددى ، فإن الخواص عند المدخل والمخرج هي القيم المتوسطة المأخوذة فى الدورة. يتم اختبار حد حجم التحكم بحيث تكون الحالات 2 ثابتة مع الزمن وتكون الاوضاع المنتخبة بعيدة عن اضطراب التنبيض (pulsating disturbance).

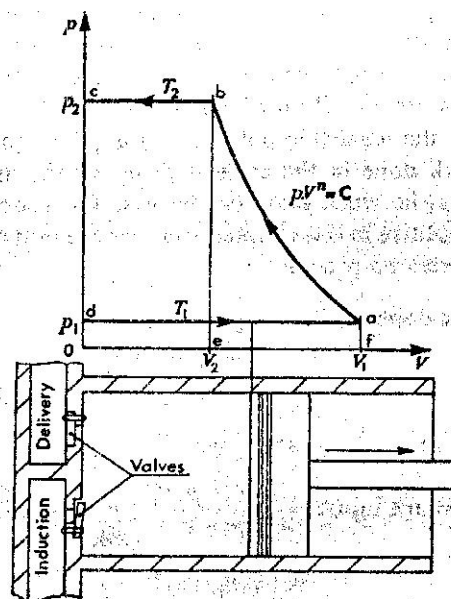
### الماكينات الترددية (reciprocating m/cs)

تشتمل الآلية على الكباس ، ذراع التوصيل ، المرفق ، وترتبية الاسطوانة. ابتدائيا سيتم تجاهل حجم الخلوص فى الاسطوانة . أيضا سيتم افتراض أن مائع التشغيل هو غازا مائيا . تأخذ الدورة لفة واحدة للعمود المرفقى لتكتمل ويتم توضيح المخطط البيانى الاساسى فى الشكل رقم (2) يتم تصميم الصمامات المستخدمة فى معظم ضواغط الهواء بخيىث تعطى فعل ذاتى وتكون من النوع المحمل بالليايات التى تشتغل بفرق ضغط صغير عبرها ، يعطى ضغط الياى الخفيف فعل اغلاق سريع .





(1) الشكل



(2) الشكل

يجب أن يكون صعود الصمام لاعطاء سريان الهواء المطلوب أصغر ما يمكن ويجب أن يشغل 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 عند a . تكون درجة الحرارة ثابتة عند  $T_1$  لهذا الاجراء ولا يكون 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 يبدأ 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 الذي يفتح عنده صمام التصريف (قيمة يتم تحديدها بالصمام والضغط في المستقبل (receiver)). يحدث التصريف كما موضح بالخط b-c ، الذي يكون اجراءً عند درجة حرارة ثابتة  $T_2$  ، ضغط ثابت  $P_2$  ، تبادل حرارة صفري وكتلة متناقصة . تعاد الدورة عند نهاية هذا الشوط . تعتمد قيمة درجة حرارة التصريف على قانون الانضغاط بين b,a الذي 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.  $PV^n = \text{constant}$ ) يعطي 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 adof باستخدام المعادلة التالية ، للمساحة abef ،

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

من المعادلة التالية يمكن كتابة

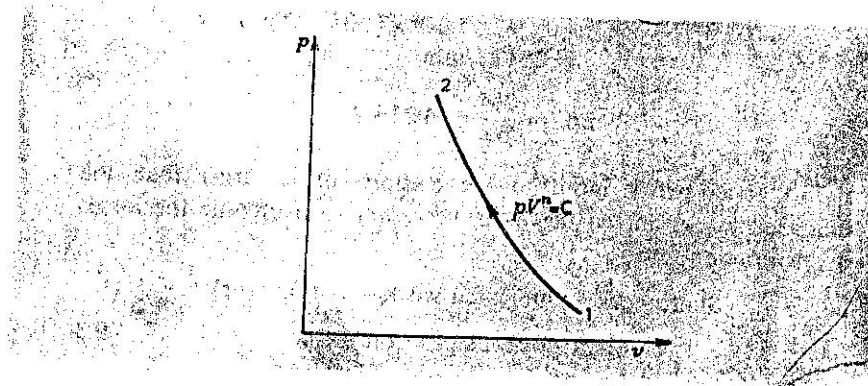
$$p_1 v_1 = \dot{m} R T_1, \quad P_2 V_2 = \dot{m} R T_2$$

( حيث  $\dot{m}$  هي الكتلة السحوبة والمصروفة في الدورة ) وبالتالي :-

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

يكون الشغل المبذول على الهواء لوخدة زمن مساويا للشغل المبذول بالدورة مضروباً في عدد الدورات لوخدة زمن . يستخدم معدل سريان الكتلة اكثر تكراراً من الكتلة في الدورة .

يغير مائع التشغيل حالته بين a, b في الشكل رقم (2) ، من  $P_1$  و  $T_1$  الى  $P_2$  و  $T_2$  ، يتم توضيح التغير في الشكل رقم (3) الذي هو مخطط خواص (p i.c. ضد v)



شكل رقم (3)

$$i.e. \quad T_2 = T_1 \left( \frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{n-1}{n}}$$

تعطى درجة حرارة التصريف بالمعادلة التالية

مثال (1) :-

ضاغط ترددي مفرد المرحلة يسحب  $1m^3$  من الهواء في الدقيقة عند 1.013bar و  $15^\circ C$  ويصرفه عند 7bar . مفترضاً أن قانون الانضغاط يكون  $p v^{1.35} = const.$  ، وأن الخلوص يتم تجاهله ، أحسب القدرة البيانية .

الحل :-

$$\text{الكتلة المصروفة في الدقيقة} \quad \dot{m} = \frac{p_1 v_1}{R T_1} = \frac{1.013 \times 1 \times 10^3}{287 \times 288} = 1.226 \text{ kg / min}$$

$$(حيث) (T_1 = 15 + 273 = 288K)$$

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

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

من المعادلة (2)

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

(حيث  $m$  هو معدل سريان الكتلة بالـ kg/min)

$$\text{i.e.} \quad \text{الشغل البياني} = \frac{1.35 \times 1.226 \times 287 \times (475.2 - 288)}{10^3 \times (1.35 - 1)} = 254 \text{ kJ/min}$$

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

يكون شغل الدخل الفعلي للضاغط اكبر من الشغل البياني ، نتيجة للشغل الضروري

لتخطي الفقدان الناشئة من الاحتكاك ، etc

$$\text{i.e.} \quad \text{الشغل الإجمالي} = \text{الشغل البياني} + \text{الشغل الضاغط}$$

$$S.P = i.p + f.p \quad (3)$$

تعطي الكفاءة الميكانيكية للماكينة بـ

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

شغل العمود أو قدرة العمود

لتحديد قدرة الدخل المطلوبة يجب اعتبار كفاءة محرك الادارة بالاضافة للكفاءة

الميكانيكية .

بالتالي،

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

كفاءة المحرك والادارة

مثال (2) :-

إذا 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 :-

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

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

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

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

$$(\text{حيث } d = \text{قطر الاسطوانة} ; L = \text{طول الشوط})$$

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

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

$$\text{i.e. قطر الاسطوانة} \quad d = \frac{141.5 \text{ mm}}{}$$

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

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

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

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

أيضاً من المعادلة التالية ،  $(n-1)/n$

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

عليه

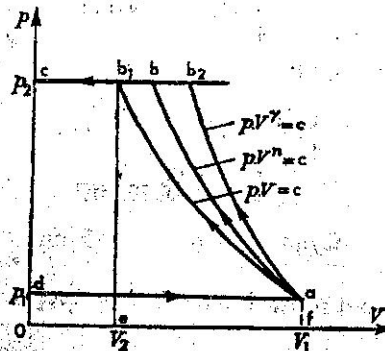
$$\text{الصدّة البيانية} = \frac{n}{n-1} m \cdot R T_1 \left\{ \left( \frac{P_2}{P_1} \right)^{(n-1)/n} - 1 \right\} \quad (6)$$

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

( حيث  $V^*$  هو الحجم المسحوب لوحدة زمن )

### شروط الحصول على ادنى شغل (The condition for minimum work)

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  $PV = \text{const}$  ( i.e. ) ثابت درجة الحرارة ) . يكون الخط  $ab_2$  طبقاً لقانون  $PV^\gamma = \text{const}$  ( i.e. ) ثابت القصور الحراري ) . حيث يكون كلا الاجراء 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 الاولى 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  $ab_1cd$

$$\text{المساحة } ab_1ef = b_2 v_{b_1} \log e \frac{p_2}{p_1}$$

$$\text{i.e. الشغل البياني في الدورة} = P_2 V_{b1} \log_e \frac{P_2}{P_1} + P_2 V_{b1} - P_1 V_a$$

ايضاً  $P_1 V_a = P_2 V_{b1}$  ، بما ان الاجراء  $ab_1$  ثابت درجة الحرارة .

$$\therefore \text{الشغل البياني في الدورة} = P_2 V_{b1} \log_e \frac{P_2}{P_1} \quad (8)$$

$$= P_1 V_a \log_e \frac{P_2}{P_1} \quad (9)$$

$$= m \cdot RT \log_e \frac{P_2}{P_1} \quad (10)$$

كفاءة ثابت درجة الحرارة : (Isothermal efficiency)

بالتعريف المؤسس على مخطط البيان ،

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

مثال (3) :-

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

الحل:-

من المعادلة (10)،

$$\text{القدرة ثابتة درجة الحرارة} = m \cdot RT \log_e \frac{P_2}{P_1} = 1.226 \times 0.287 \times 288 \times \log_e \frac{7}{1.013} = 196 \text{ kJ/min}$$

$$\text{من المثال (1) ، الشغل البياني} = 254 \text{ kJ/min}$$

بالتالي مستخدماً المعادلة (11) عاليه ،

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

الصورة الاقل تفصيلاً للانضغاط في الضواغط الترددية هي تلك التي تعطي بالاجراء

ثابت القصور الحراري ( انظر الشكل (4) ) . ستكون الصورة الفعلية للانضغاط عادة بسين

هذين الحدين . يتم تمثيل الاجراءات الثلاث على مخطط T-S في الشكل (5) .

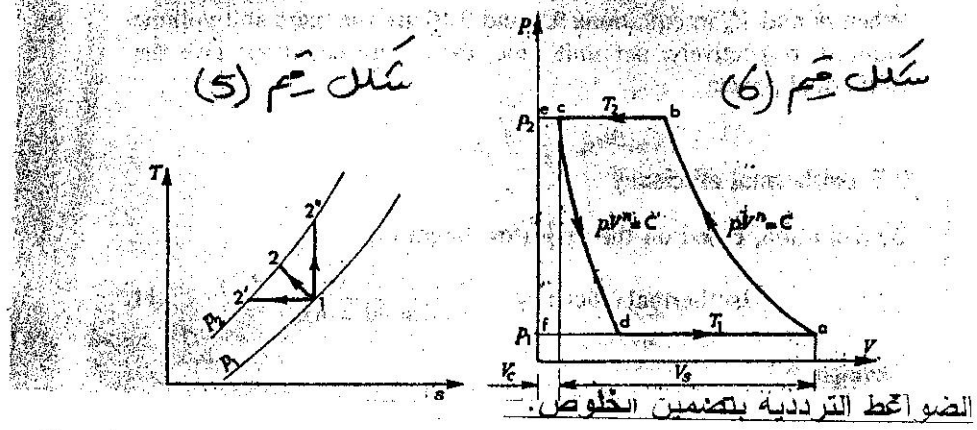
1- 2' يمثل انضغاطاً ثابت درجة الحرارة

1- 2'' يمثل انضغاطاً ثابت القصور الحراري

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

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

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



(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 يتضمن 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  $PV^n = \text{const}$  (عوماً) ، ويبدأ التصريف عند b حسب تحكم الصمامات . يكون تأثير الخلوص هو خفض الحجم المسحوب عند  $p_1$  و  $T_1$  من  $V_a$  الى  $(V_a - V_c)$  . تكون كتل الغاز عند النقاط الاربع الرئيسية بحيث ان  $m_c^* = m_d^*$  ،  $m_a^* = m_b^*$  ، تعطي الكتلة المصروفة 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 .

المساحة abcd = الشغل البياني

المساحة cefd - المساحة abef =

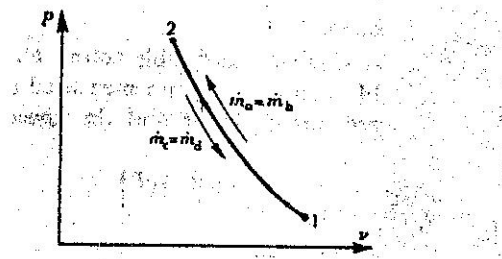


بالتالي ، مستخدماً المعادلة (2) ،

$$\begin{aligned} \text{القدرة البيانية} &= \frac{n}{n-1} m_a^* R (T_2 - T_1) - \frac{n}{n-1} m_d^* R (T_2 - T_1) \\ \text{i.e. القدرة البيانية} &= \frac{n}{n-1} R (m_a^* - m_d^*) (T_2 - T_1) \end{aligned}$$

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

(حيث  $m^*$  هي الكتلة المسحوبة لوحدة زمن  $(m_a^* - m_d^*)$ )



الشكل (7)

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

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

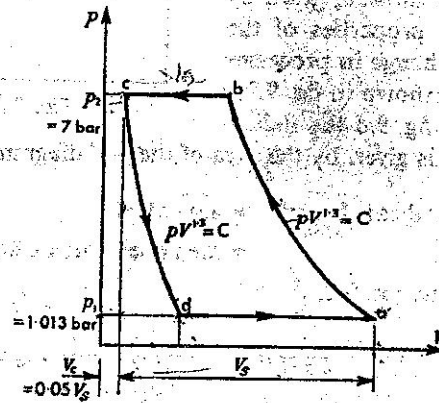
$$\begin{aligned} \text{القدرة البيانية} &= \frac{n}{n-1} p_1 v^* \left\{ \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{(n-1)/n} - 1 \right\} \\ \therefore \text{القدرة البيانية} &= \frac{n}{n-1} p_1 (v_a - v_d) \left\{ \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{(n-1)/n} - 1 \right\} \quad (13) \end{aligned}$$

يمكن زيادة الكتلة المصروفة لوحدة زمن بتصميم الماكينة بحيث تصبح مزدوجة التشغيل (double-acting) ، i.e. ، يتم التفاعل مع الغاز على كلا جانبي الكباس ، شوط السحب لاجل الجانبين يكون شوطاً للانضغاط للجانب الآخر (انظر الشكل رقم (1)).

مثال (4) :-

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

300rev/min . خذ الحجم الخلوصي كـ 5% من الحجم المكتسح بأس انضغاط مقداره  $n=1.3$  . احسب الحجم المكتسح للأسطوانة ، درجة حرارة التصريف والقدرة البيانية .



شكل (8)

بالرجوع للشكل (8)

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

و  $v_c = 0.05v_s$  ، حجم الخلوص

$$v_a = 1.05v_s$$

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

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

$$(\text{عدد الدورات في الدقيقة} \times \text{عدد اللفات في الدقيقة} = \text{عدد الدورات في الدقيقة})$$

الآن

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

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

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

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

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

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

$$\begin{aligned} \text{i.e. } T_2 &= 288 \left( \frac{7}{1.013} \right)^{\frac{(1.3-1)}{1.3}} = 288 \times 6.91^{0.231} \\ &= 288 \times 1.563 = 450K \end{aligned}$$

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

مستخدماً المعادلة (13) ،

$$\begin{aligned} \text{القدرة البيانية} &= \frac{n}{n-1} P_1 (V_1' - V_1'') \left\{ \left( \frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right\} \\ &= \frac{1.3}{0.3} \times \frac{1.013 \times 10^5 \times 14}{10^3 \times 60} \left\{ \left( \frac{7}{1.013} \right)^{\frac{(1.3-1)}{1.3}} - 1 \right\} kW \end{aligned}$$

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

بطريقة أخرى :

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

بالتالي ، مستخدماً المعادلة (12)

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

$$\begin{aligned} &= \frac{1.3}{0.3} \times 17.16 \times 0.287 (450 - 288) \\ &= 3459 kJ/min \end{aligned}$$

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

الكفاءة الحجمية ( $\eta_v$ ) : (Volumetric efficiency)

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 تعريف الكفاءة الحجمية كالآتي :

$\eta_v =$  كتلة الهواء المصروف مقسومة على كتلة الهواء التي ستملأ الحجم المكتسح عند حالات

الهواء الطليق للضغط ودرجة الحرارة \_\_\_\_\_ (14)

او ،  $\eta_v =$  حجم الهواء المصروف مقاساً عند ضغط ودرجة حرارة الهواء الطليق ، مقسوماً

على الحجم المكتسح للاسطوانة \_\_\_\_\_ (15)

يمكن توضيح ان المعادلتان (14) و (15) تكونا متطابقتان ،  
i.e. اذا كان تصريف الهواء الطليق F.A.D هو V ، عند P و T ، بالتالي تكون الكتلة

$$m^* = \frac{PV}{RT}$$

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

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

عابه بالمعادلة (14) ،

$$\eta_v = \frac{m^*}{m_s^*} = \frac{PV}{RT} \times \frac{RT}{PV_s} = \frac{V}{V_s}$$

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

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

وباستخدام المعادلة التالية ،

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

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

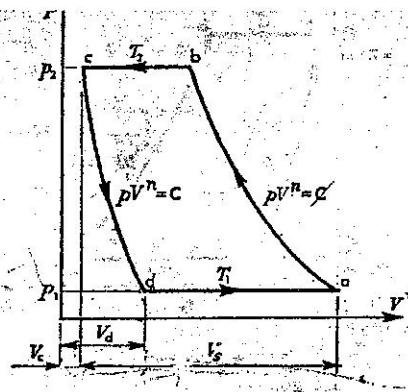
$$= V_s - V_c \left\{ \left( \frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{1}{n}} - 1 \right\} \quad (15)$$

بالتالي مستخدماً المعادلة (15) ،

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

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

سؤال رقم (٩)



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

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

، بالتالي :

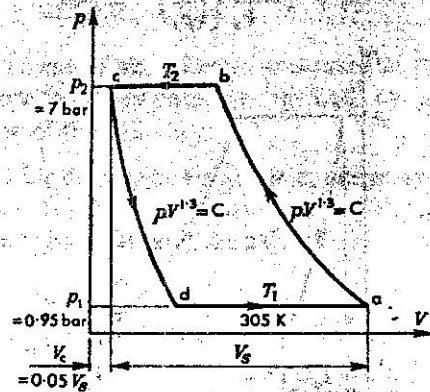
$$m \cdot = \frac{PV}{RT} = \frac{P_1(V_a - V_d)}{RT_1}$$

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

(حيث  $P_1$  و  $T_1$  هما حالات السحب)

مثال (5) :

ضاغط هواء مفرد المرحلة ، مزدوج التشغيل لديه F.A.D. مقداره  $14 \text{ m}^3/\text{min}$  مقاساً عند  $1.013 \text{ bar}$  و  $15^\circ \text{C}$  . يكون الضغط ودرجة الحرارة في الاسطوانة اثناء السحب هما  $0.95 \text{ bar}$  و  $32^\circ \text{C}$  . يكون ضغط التصريف  $7 \text{ bar}$  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).

$$m^* = \frac{PV}{RT} \text{ الكتلة المصروفة في الدقيقة}$$

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

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

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

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

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

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

من المعادلة (12)

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

$$= \frac{1.3}{0.3} \times 17.16 \times 0.287 (483.7 - 305)$$

$$= 3813 \text{ kJ/min}$$

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

كما في سابقه

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

$$\text{i.e. } V_d = 0.05 v_s \left( \frac{7}{0.95} \right)^{1/1.3} = 0.05 V_s \times 7.369^{0.769}$$

$$= 0.5 V_s \times 4.65 = 0.233 V_s$$

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

مستخدماً المعادلة (17)،

$$F.A.D./\text{cycle} = (V_a - V_d) \frac{T_1}{T_2} \cdot \frac{P_1}{P}$$

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

بالتالي من المعادلة (15)

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

لوحظ انه اذا كانت الكفاءة الحجمية في المثال عالية يتم تقويمها باستخدام المعادلة (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 معتبراً بين القيمتين ، بما ان الاجابة الاخيرة تتجاهل الفرق في درجة الحرارة والضغط بين حالات الهواء الطليق وحالات السحب .

### الانضغاط متعدد المرحلة: (Multi - Stage Compression)

لقد تم سابقاً تأسيس أنه ولشغل أدنى يجب أن يكون اجراء الانضغاط ثابت درجة الحرارة . عموماً فان درجة الحرارة بعد الانضغاط تعطى بالمعادلة

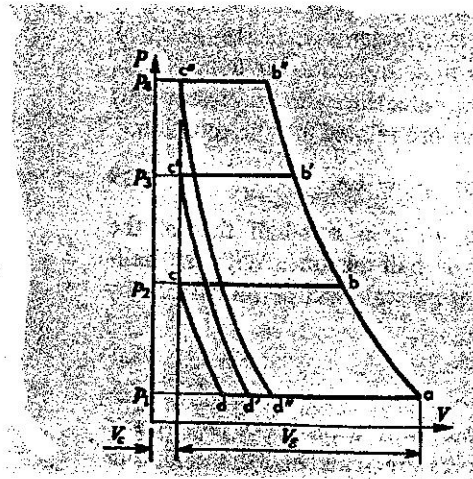
$$T_2 = T_1 \left( \frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{(n-1)}{n}}$$

**ننزيد** درجة حراره التصريف بزيادة نسبة الضغط . اضافياً ، 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 توضيحها في

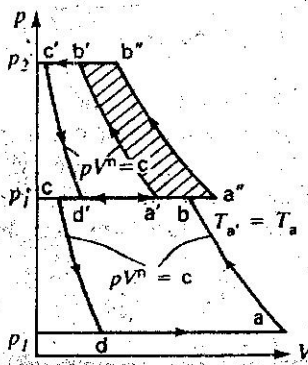
الشكل رقم (11) أدناه



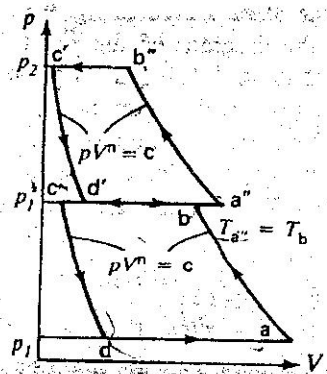
شكل رقم (11)

لأنضغاط من  $p_1$  الى  $p_2$  تكون الدورة  $abcd$  و F.A.D. للدورة  $V_a - V_d$  ؛ لأنضغاط من  $p_2$  الى  $p_3$  تكون الدورة  $ah'c'd'$  و F.A.D. للدورة  $V_a - V_{d'}$  ، لأنضغاط من  $p_3$  الى  $p_4$  تكون الدورة  $ah''c''d''$  ويكون F.A.D. للدورة  $V_a - V_{d''}$  . عليه لـ F.A.D. مطلوب سيزيد مقاس الاسطوانة كلما زادت نسبة الضغط .

يمكن تحسين الكفاءة الحجمية بتنفيذ الانضغاط في مرحلتين . بعد المرحلة الاولى للانضغاط يتم تمرير المائع الى اسطوانة أصغر يتم فيها انضغاط الغاز الى الضغط النهائي المطلوب . 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 لاختلاف حجم الغاز المصروف من المرحلة السابقة .

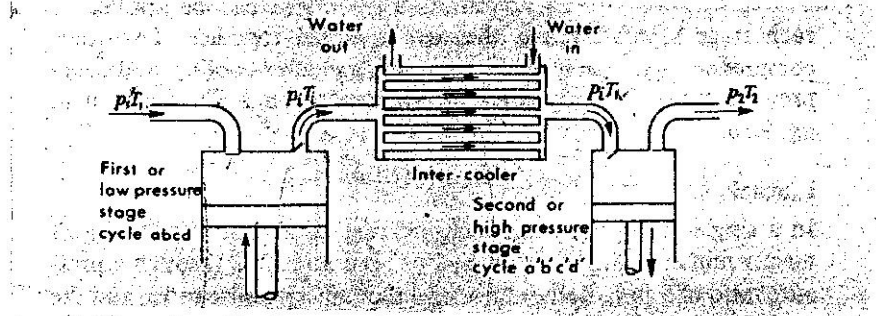


سَكِل (13a)



سَكِل (12)

سَكِل (13b)



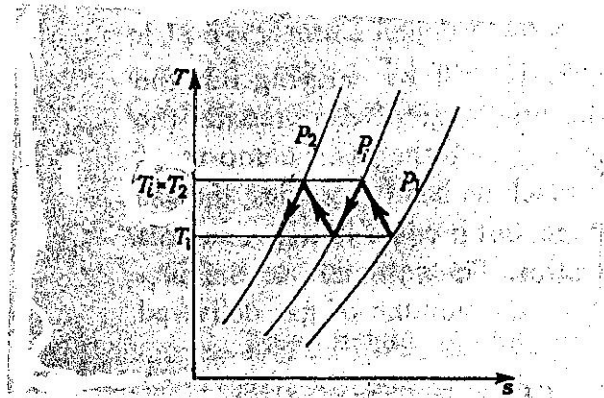
يتم توضيح مخطط البيان لماكينة ذات مرحلتين في الشكل رقم (12) . في هذا المخطط يتم افتراض أن اجراء التصريف من المرحلة الاولى أو مرحلة الضغط المنخفض و اجراء السحب للمرحلة الثانية أو مرحلة الضغط العالي ، يكونا عند نفس الضغط . يمكن الحصول على انضغاط ثابت لدرجة الحرارة مثالي فقط اذا كان التبريد المثالي متصلاً . هذه من الصعوبة بمكان الحصول عليها اثناء الانضغاط العادي . بانضغاط متعدد المرحلة يتم تبريد الغاز كلما يتم نقله من اسطوانة الى اخرى ، بتمريره خلال مبرد بيني (intercooler). اذا كان التبريد كاملاً ، سيدخل الغاز المرحلة الثانية عند نفس درجة الحرارة التي دخل بها المرحلة الاولى . يتم توضيح الشكل المتحصل عليه بالتبريد البيني بالمساحة المظلمة في الشكل رقم 13a ، ومخطط المحطة في الشكل رقم 13b . يتم توضيح مخططي البيان abcd و a'b'c'd' بضغط مشترك ،  $p_i$  . هذا لا يحدث في ماكينة فعليته



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

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

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



الشكل (14)

مثال 6:-

في ضاغط هواء ترددى مفرد لتشغيل - ثنائى المرحلة يتم انضغاط 4.5kg من الهواء في الدقيقة من 1.013bar و 15°C خلال نسبة ضغط مقدارها 9/1 . كلا المرحلتين لها نفس نسبة الضغط ، ويكون قانون الانضغاط والتمدد في كلا المرحلتين هو  $PV^{1.3} = \text{const}$  . اذا كان التبريد البيني كاملا ، أحسب القدرة البيانيه والحجوم المكتسحة المطلوبة للاسطوانة . أفترض أن حجوم الخلوص لكلا المرحلتين هما 5% من حجومها المكتسحة وأن الضاغط يشتغل بسرعة مقدارها 300rev/min .

يتم توضيح مخططا البيان متراكبين فى الشكل رقم (15) . تكون دورة مرحلة الضغط

المنخفض هي abcd ودورة الضغط العالى هي a'b'c'd'

$$\therefore P_2 = 9P_1$$

$$P_2/P_1 = P_2/P_1$$

أيضاً

$$P_2/P_1 = 9$$

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

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

مستخدما المعادلة التالية:-

$$\frac{T_i}{T_1} = \left( \frac{P_i}{P_1} \right)^{(n-1)/n} \therefore \frac{T_i}{288} = 3^{(1.3-1)/1.3}$$

( حيث  $T_1 = 15 + 273 = 288 K$  ، و  $T_i$  هي درجة حرارة الهواء الداخل للمبرد البيني )

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

الآن بما أن  $n$  ،  $\dot{m}$  ، و فرق درجة الحرارة هي نفسها لكلا المرحلتين ، بالتالي فإن الشغل

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

$$\begin{aligned} \text{الشغل الكلى المطلوب فى الدقيقة} &= 2 \times \frac{n}{n-1} \dot{m} R (T_i - T_1) \\ &= 2 \times \frac{1.3}{1.3-1} \times 4.5 \times 0.287 (371 - 288) \\ &= 930 \text{ kJ/min} \end{aligned}$$

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

يلعب معدل سريان الكتلة فى الدورة دوراً

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

يتم تمرير الكتلة خلال كل مرحلة على الترتيب .

لاسطوانة الضغط المنخفض ، بالرجوع للشكل (16) ،

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

مستخدما المعادلة (16) ،

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

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

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

i.e. الحجم المكتسح لاسطوانة الضغط المنخفض =  $0.0131 \text{ m}^3$

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

$$P_i = 3 \times 1.013 = 3.039 \text{ bar}$$

$$\text{i.e. الحجم المسحوب} = \frac{0.015 \times 287 \times 288}{3.039 \times 10^5} \\ = 0.00406 \text{ m}^3 / \text{cycle}$$

مستخدماً المعادلة (16) لمرحلة الضغط العالي ،

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

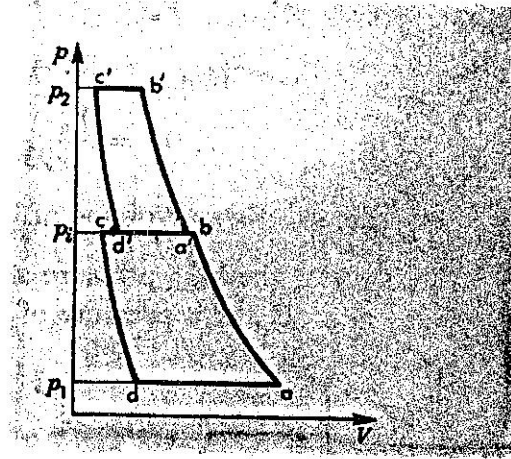
وبما أن  $V_c/V_s$  هي نفسها كما لمرحلة الضغط المنخفض وايضاً  $P_2/P_i = P_i/P_1$  وبالتالي  $\eta_v$  تكون 0.934 كما في عاليه .

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

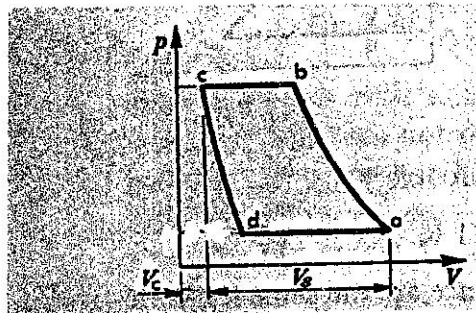
لاحظ أن نسبة الخلوص هي نفسها في كل أسطوانة، ودرجات حراره السحب هي نفسها بما أن التبريد البيني يكون كاملاً ، عيه فان الحجم المكتسح تكون في نسبة ضغوط السحب.

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

شكل (15)



شكل (16)

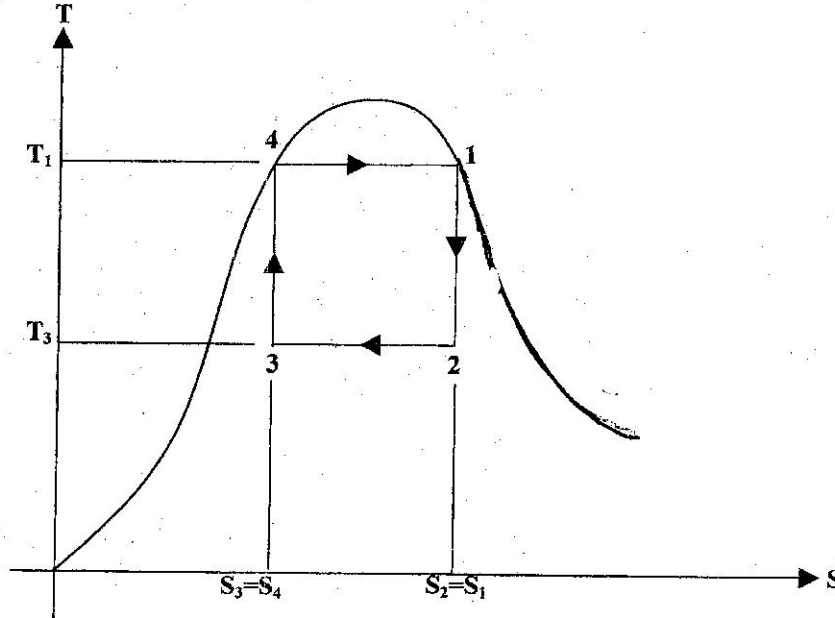


## الفصل السابع محطات القدرة البخارية

### 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 :-



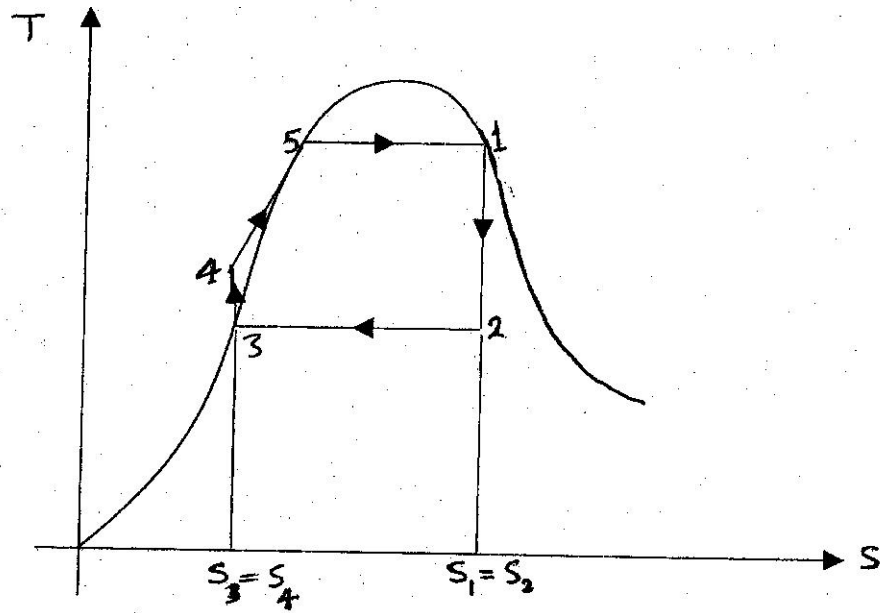
شكل رقم (1)

1-4 تسخين بثبات درجة الحرارة والضغط . e.g. الفيزانات ، المولدات والمفاعلات النووية .  
1-2 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 .

2-3 فقد حراري بالتبريد عند ضغط ودرجة حرارة ثابتين . e.g. المكثف .  
3-4 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 ، 4-5 إضافة حرارة (تسخين) بثبات الضغط وباختلاف درجة الحرارة وذلك لتغيير الماء من الحالة 4 (ماء غير مشبع) إلى الحالة 5 (ماء مشبع) حتى يصل إلى درجة الحرارة والضغط اللزمين 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 البخار 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 ،

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

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

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

حيث تصبح المعادلة (1) كالآتي :-

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

الغلاية :- من المعادلة (2) ،

$$Q_{\text{supp}} = Q_{451} = (h_1 - h_4) + W$$

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

التوربين :- من المعادلة (2) ،

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

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

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

المكثف :- من المعادلة (2) ،

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

وبما أن  $W = 0$  ،

$$Q_{\text{rej}} = Q_{23} = h_2 - h_3$$

المضخة :- من المعادلة (2) ،

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

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

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

صافي الشغل في الدورة  $W_{\text{neto/p}} = W_{12} - W_{34}$

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

إذا تم تجاهل شغل مضخة التغذية ، نظراً لأن شغل خرج التوربين كبير جداً مقارنة بشغل المضخة ، فإن

المعادلة (3) تصبح كالآتي ،

$$W_{\text{neto/p}} = h_1 - h_2$$

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

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

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

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

وإذا تم اعتبار مضخة التغذية ،

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

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

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

لإثبات المعادلة (6) عاليه ، من معادلة طاقة اللاسريان

$$dQ = du + dw$$

ولأي إجراء انعكاسي ،  $dw = pdv$

وللإجراء الادبياتي الانعكاسي ،

$$dQ = du + pdv = 0$$

$$h = u + pv$$

وبما أن

بتفاضل المعادلة عاليه نحصل على ،

$$dh = du + pdv + vdp$$

$$du + pdv = dh - vdp$$

$$\therefore dQ = dh - vdp = 0$$

$$\therefore dh = vdp$$

وبإعادة ترتيبها،

بتكامل المعادلة عاليه فيما بين الحالتين 3 و 4

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

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

$\therefore$  شغل دخل المضخة ،

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

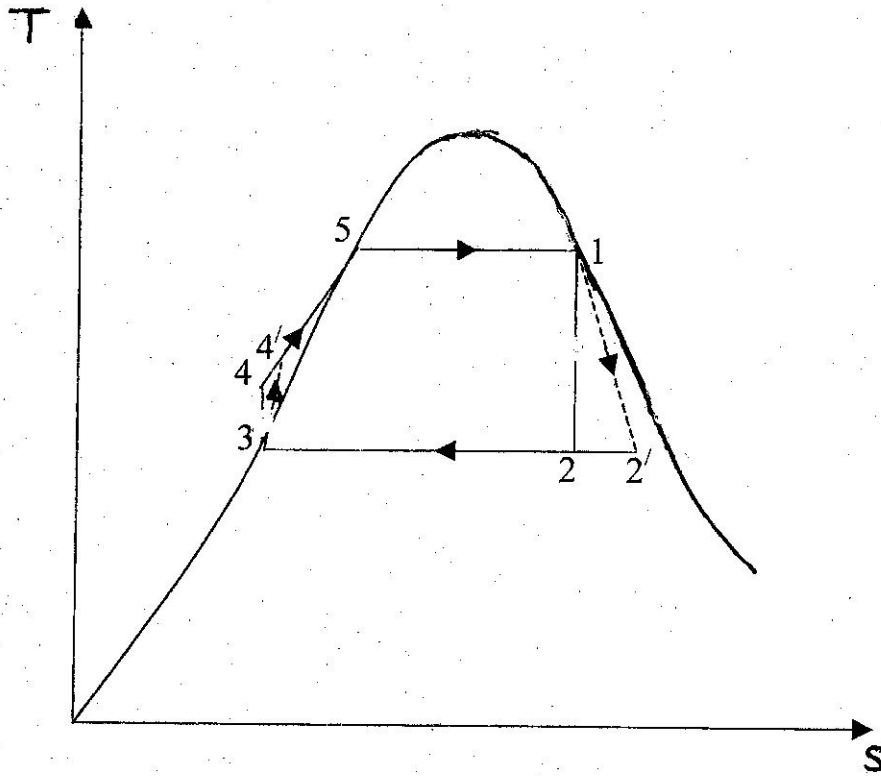
(تؤخذ قيمة  $v$  من جداول البخار عند ضغط  $p_3$ )

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

نسبة الكفاءة :- {Efficiency Ratio}

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 كالاتي :-  
 كفاءة ثابت القصور الحراري للتوربين (Isenfpotic efficiency) = الشغل الفعلي  
 الشغل ثابت القصور الحراري

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

وبالنسبة لإجراء الانضغاط ،

كفاءة ثابت القصور الحراري للمضاغط = الشغل ثابت القصور الحراري  
 الشغل الفعلي

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

{Work Ratio} - نسبة الشغل :-

يتم تعريفها كالاتي ،



صافي الشغل = WR نسبة الشغل

إجمالي الشغل

الاستهلاك النوعي للبخار :- ( specific steam consumption )

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

$$ssc = \frac{\text{معدل سريان كتلة البخار}}{\text{القدرة المنتجة}} = \frac{3600}{W_{\text{neto/p}}} \text{ kg/kwh}$$

بتجاهل شغل طلمبة التغذية ،

$$h_4 - h_3 = 0$$

$$\therefore w = h_1 - h_2$$

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

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 .

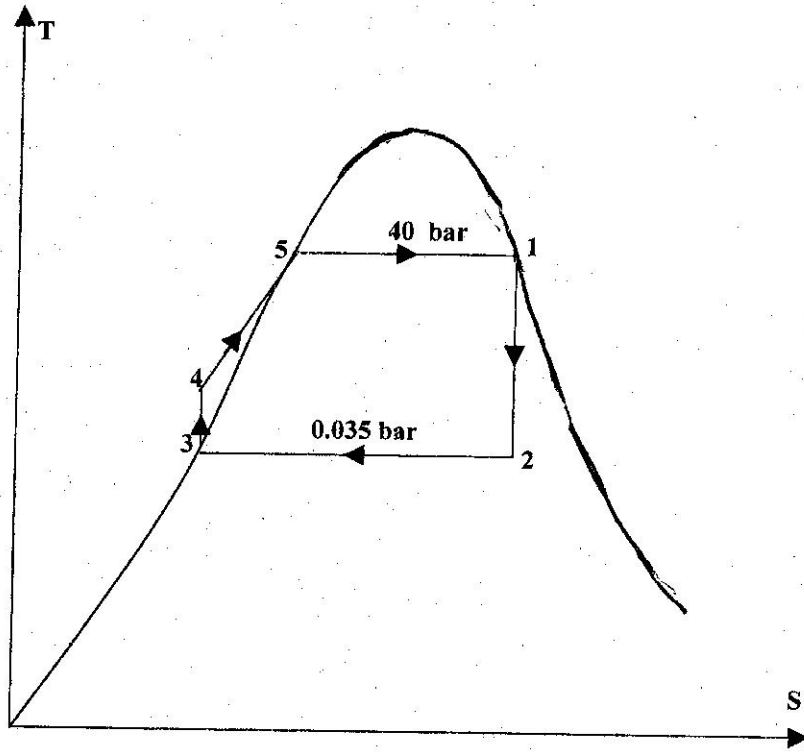
6/ الاستهلاك النوعي للبخار ( بتجاهل شغل مضخة التغذية ) .

ii / لنفس حالات البخار السابقة ، أحسب الآتي :-

7 / كفاءة دورة كارنو .

8 / الاستهلاك النوعي للبخار .  
لدورة كاردنو تعمل على البخار الرطب .

الحل :- من الشكل رقم (4) أدناه ،  
i /



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 ،

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

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

وعند ضغط 0.035 bar ،

$$s_2 = s_1 = s_{f2} + x_2 s_{fg2}$$

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

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

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

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

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

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

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

2/ الشغل المطلوب لمضخة التغذية ،

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

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

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

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

من جداول البخار المشبع عند ضغط 0.035 bar

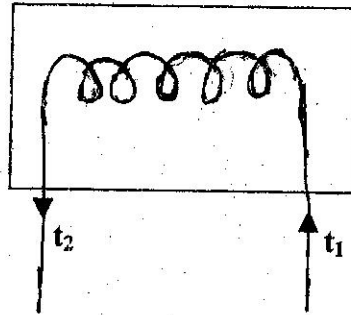
$$T_2 = T_s = 26.7^\circ \text{C} = 26.7 + 273 = \underline{299.7 \text{ K}}$$

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

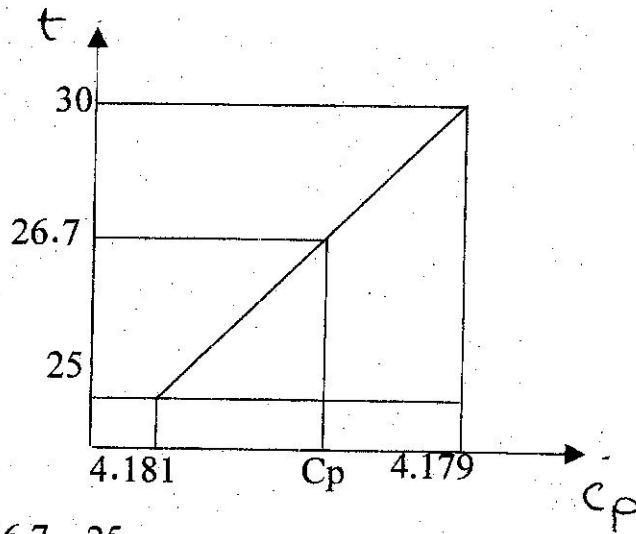
$$s_3 = sf = 0.391 \text{ kJ/kgk}$$

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

$$\text{أيضاً } Q = m c_p dT$$



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



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

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

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

4 / كمية الحرارة المكتسبة ،

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

باستخدام المعادلة التالية لإيجاد  $h_4$

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

من جدول البخار المشبع عند ضغط 0.035 bar ،

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

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

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

5 / كفاءة دورة رانكن ،

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

6 / الاستهلاك النوعي للبخار ( بتجاهل شغل مضخة التغذية )

$$SSC = \frac{3600}{W_{\text{neto/p}}}$$

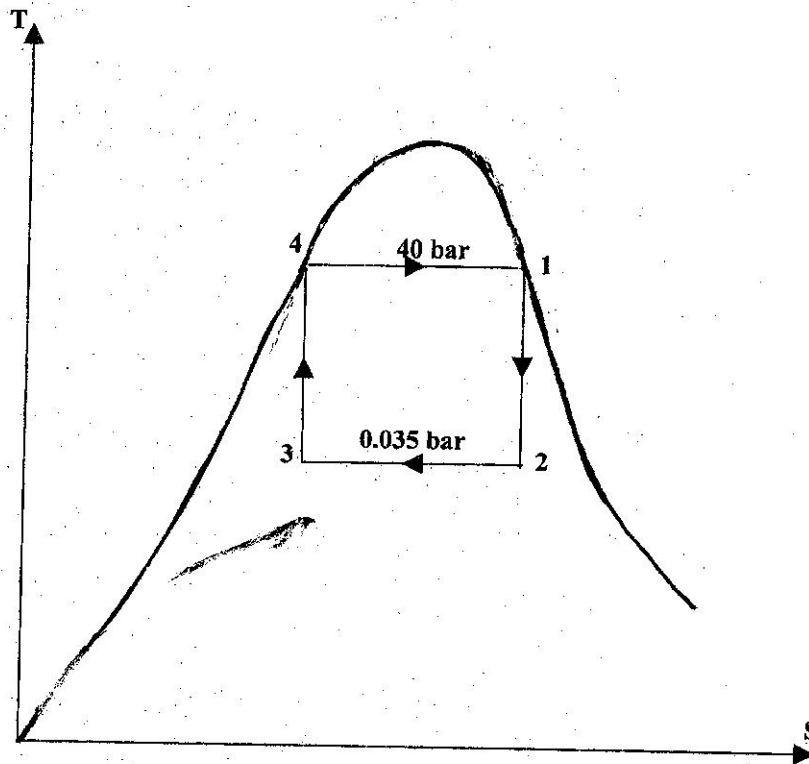
$$W_{\text{neto/p}} = W_{12} - W_{34}$$

$$\angle W_{34} = 0 \quad \text{بمان}$$

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

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

/ ii



7 / كفاءة دورة كارنو ،

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

من جداول البخار المشبع عند ضغط 40 bar ،

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

$$= 250.3 + 273 = 523.3 \text{ K}$$

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

8 / الاستهلاك النوعي للبخار ،

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

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

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

من جدول البخار المشبع عند ضغط 40 bar ،

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

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

من جدول البخار المشبع عند ضغط 0.035 bar ،

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

$$sf_3 = 0.391\text{ kJ/kgk} , \quad sfg_3 = 8.13\text{ kJ/kgk}$$

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

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

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

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

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

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

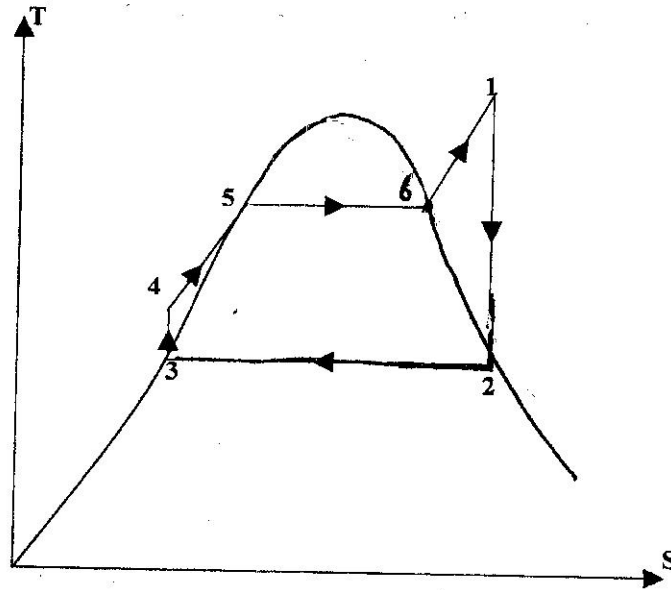
$$W_{net\ o/p} = 982.4 - 253.35 = 729.05\text{ kJ/kg}$$

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

تعديلات دورة رانكن :- {modifications of 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 التخميص 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 :-

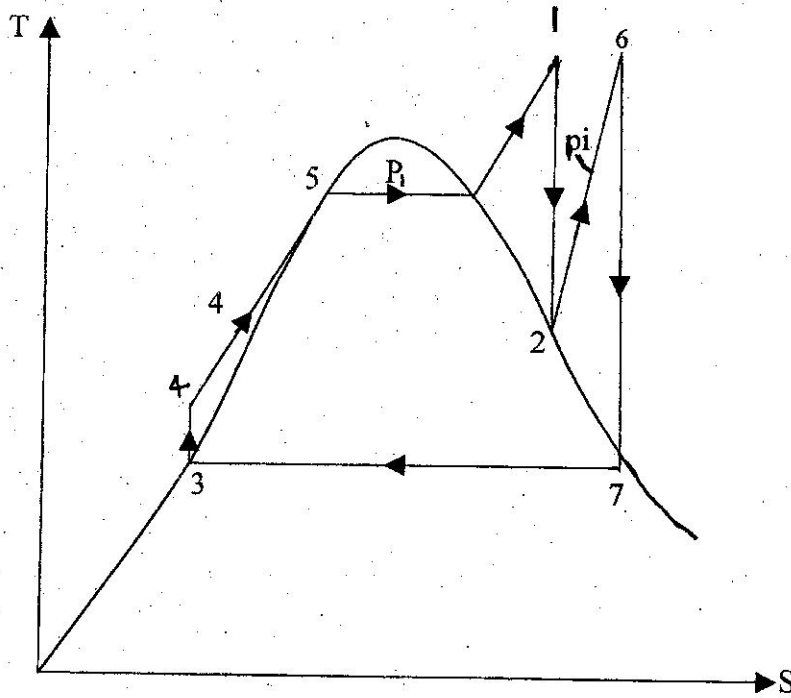
1/ تخفيض الرطوبة عند مخرج التوربين بحيث لا تتعدى نسبتها 10% .

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

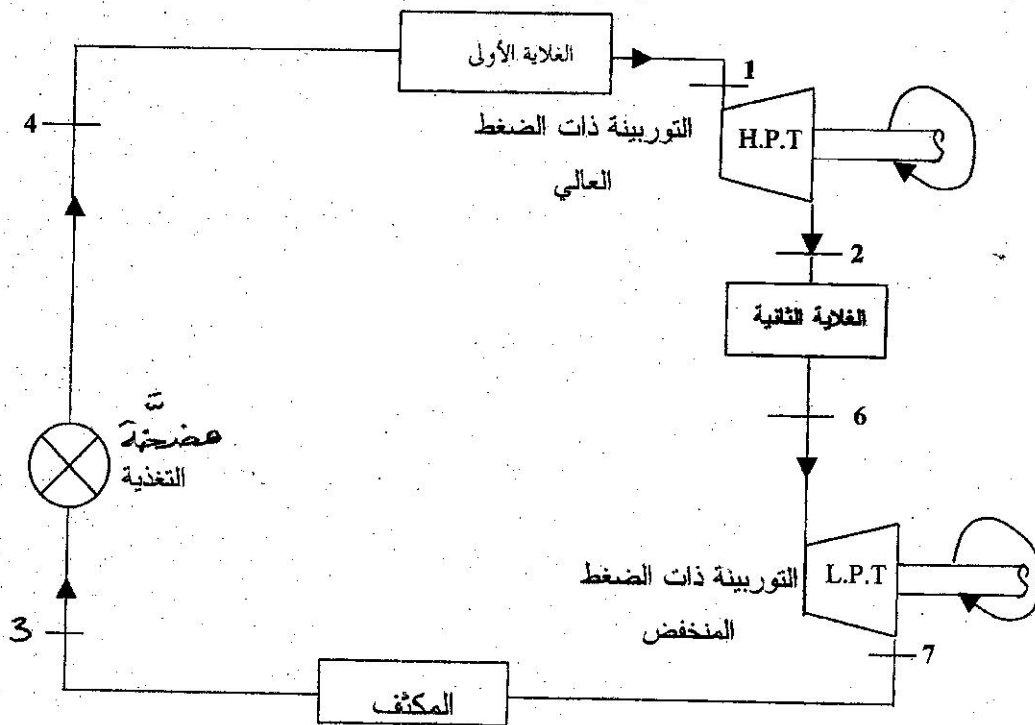
وذلك لأن التمدد إذا تم في مرحلة واحدة فإن البخار الخارج من التوربينة سيحتوي على رطوبة ، عليه سيتم التمدد على مرحلتين .

3/ تحسين الاستهلاك النوعي للبخار

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



شكل رقم (6)

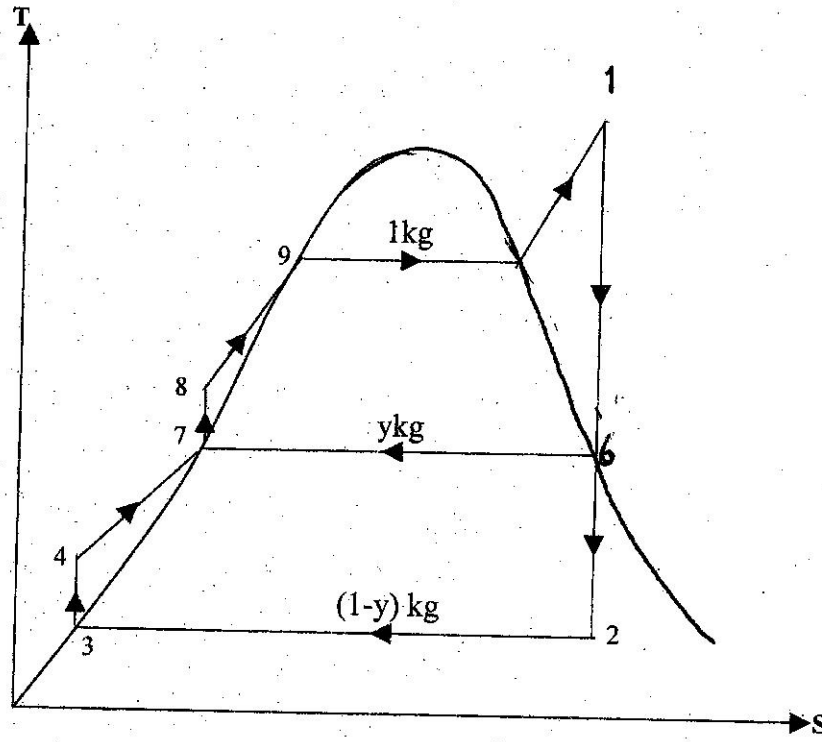


شكل رقم (7) مخطط دورة إعادة التسخين

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



هي الدورة التي يتم فيها زيادة درجة حرارة الماء الداخلة إلى الغلاية وذلك بتتزييف بعض البخار عند ضغط وسيط من داخل التوربينة وخلطة مع الماء الخارج من المكثف في سخان تغذية أو خلط (feed heater or mixer) يتم توضيح مخطط T-S والمخطط الكتلي للدورة في الأشكال (8) و(9) على الترتيب .



شكل رقم (8)