



جامعة دمشق

كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية

قسم الهندسة الميكانيكية / الهندسة الحرارية

مرسالة أعدت لنيل درجة الماجستير في الهندسة الحرارية

بمعنوان

رفع كفاءة العنفات الغازية في شركة الفرات للنفط باسترجاع غازات

العام لتسخين الهواء الداخل إلى حجرة الاحتراق

إعداد

المهندس شامان لورنس العفاش

إشراف

الأستاذ الدكتور حسين علي تينة

المشرف المشارك

الأستاذ الدكتور عبد الرحمن الشياح

الفهرس

7	المقدمة
9	أهمية البحث
10	الفصل الأول : محطات الطاقة الغازية (أنواعها، مكوناتها، مجال استخدامها)، وطرق الاستفادة من الطاقة الحرارية لغازات العادم
11	1-1 تطور العنفات الغازية و مبدأ عملها
13	2-1 تصنيف العنفات الغازية
13	1-2-1 تصنيف العنفات الغازية حسب عملية الاحتراق
14	2-2-1 تصنيف العنفات الغازية حسب عملية التمدد في العنف
14	3-2-1 تصنيف العنفات الغازية حسب مردود الوسيط العامل
16	4-2-1 تصنيف العنفات الغازية حسب اتجاه الجريان
16	5-2-1 تصنيف العنفات الغازية حسب عدد المحاور
17	6-2-1 تصنيف العنفات الغازية حسب درجة حرارة الغازات عند مدخل العنف
17	7-2-1 تصنيف العنفات الغازية حسب عدد المراحل
17	3-1 مكونات العنف الغازية
17	1-3-1 الضواغط العنفية
18	1-1-3-1 الضواغط العنفية المحورية
19	2-1-3-1 الضواغط العنفية النابذة
19	2-3-1 حجرة الاحتراق
19	1-2-3-1 الأجزاء الرئيسية في حجرة الاحتراق
21	3-3-1 عنفة التمدد
21	4-3-1 التجهيزات والدارات الملحقة بالعنف الغازية
22	4-1 التطبيقات العملية للعنف الغازية

22	في مجال توليد الطاقة الكهربائية	1-4-1
23	محطات الضخ (الإدارة الميكانيكية)	2-4-1
23	في وسائط النقل الأرضية	3-4-1
24	في وسائط النقل الجوية	4-4-1
24	التطبيقات المتنوعة الأخرى للعنفات الغازية	5-4-1
25	طرق الاستفادة من الطاقة الحرارية لغازات عادم العنفات الغازية	5-1
25	في إنتاج الماء الساخن أوالبخار	1-5-1
26	الدورات المركبة (غاز - بخار)	2-5-1
26	الحصول على الطاقة الحرارية اللازمة في بعض الصناعات	3-5-1
27	استرجاع الحرارة في العنفات الغازية ذات الدارة المفتوحة	4-5-1
28	الفصل الثاني : العنفات المختارة وغازات العادم الناتجة عنها	
29	وصف العنفات المختارة	1-2
30	دراسة غازات العادم	2-2
30	دراسة الوقود	1-2-2
32	حساب تدفق غازات العادم	2-2-2
34	إيجاد تركيب غازات العادم	3-2-2
36	حساب ضغط غازات العادم الخارجة من العنفة	4-2-2
39	حساب كمية الحرارة المتوفرة في غازات العادم	5-2-2
42	العوامل المؤثرة في درجة حرارة غازات العادم	6-2-2
43	حساب مردود العنفة الغازية	3-2
50	الأثر البيئي الناجم عن توليد الطاقة باستخدام العنفات الغازية	4-2
53	الفصل الثالث : دراسة نظرية عن الاسترجاع الحراري المستخدم في منشآت العنفات الغازية	
54	استرجاع الحرارة في العنفات الغازية	1-3
55	فعالية المسترجع الحراري	1-1-3
57	دراسة تأثير فعالية المسترجع على المردود الحراري للمنشأة العنفيه الغازية	2-1-3

63	الفصل الرابع : اختيار المسترجع الحراري المناسب للعنفة الغازية نوع (Solar) و دراسة تصميمية له
64	1-4 اختيار المسترجع الحراري للعنفة الغازية نوع (Solar)
66	2-4 التصميم الحراري للمسترجع
66	1-2-4 بارامترات غازات العادم الخارجة من العنفة والداخلية إلى المسترجع
66	2-2-4 بارامترات الهواء الخارج من الضاغط والداخل إلى المسترجع
66	3-2-4 إيجاد درجة حرارة الهواء المضغوط الخارج من المسترجع
67	4-2-4 حساب استطاعة المسترجع
68	5-2-4 إيجاد درجة حرارة خروج غازات العادم من المسترجع
69	6-2-4 تحديد زوايا الدخول إلى المسترجع
69	7-2-4 اختيار حشوة المسترجع وتحديد مواصفاتها
72	8-2-4 حساب عدد رينولدز للهواء المضغوط و لغازات العادم
73	1-8-2-4 حساب عدد رينولدز للهواء المضغوط
74	2-8-2-4 حساب عدد رينولدز لغازات العادم
76	9-2-4 حساب معامل الانتقال الحراري للهواء المضغوط ولغازات العادم
76	1-9-2-4 حساب معامل الانتقال الحراري للهواء المضغوط
77	2-9-2-4 حساب معامل الانتقال الحراري لغازات العادم
78	10-2-4 حساب نسبة معدل السعة الحرارية
80	11-2-4 حساب مساحة سطح التبادل الحراري
81	12-2-4 حساب ارتفاع المسترجع
82	13-2-4 حساب كتلة المسترجع
82	3-4 التصميم الهيدروليكي للمسترجع
82	1-3-4 حساب هبوط الضغط داخل المسترجع من جانب غازات العادم
85	2-3-4 حساب هبوط الضغط داخل المسترجع من جانب الهواء المضغوط
88	4-4 المواصفات النهائية للمسترجع

89	الفصل الخامس : اختيار المسترجع الحراري المناسب للعنفة الغازية نوع (Nuovo Pignone) Frame 6) و دراسة تصميمية له	
90	1-5 الأنواع الرئيسية للمسترجعات الحرارية	
90	1-1-5 المسترجعات الحرارية الأنبوبية	
90	1-1-1-5 المسترجع الحراري ذو حزمة الأنابيب والإسطوانة	
91	2-1-1-5 المسترجع الحراري ذو الأنبوب المزدوج	
91	2-1-5 المسترجعات الحرارية الصفائحية	
93	3-1-5 المسترجعات الحرارية المريشة	
93	1-3-1-5 المسترجعات الحرارية ذات الأنابيب المريشة	
95	2-3-1-5 المسترجعات الحرارية ذات الصفائح المريشة	
102	2-5 اختيار المسترجع الحراري للعنفة الغازية نوع (Nuovo Pignone Frame 6)	
103	3-5 المواصفات الهندسية للمسترجع المدروس	
104	4-5 التصميم الحراري للمسترجع	
105	1-4-5 بارامترات غازات العادم الخارجة من العنفة و الداخلة إلى المسترجع	
105	2-4-5 بارامترات الهواء الخارج من الضاغط و الداخل إلى المسترجع	
105	3-4-5 إيجاد درجة حرارة الهواء المضغوط الخارج من المسترجع	
105	4-4-5 حساب استطاعة المسترجع	
107	5-4-5 إيجاد درجة حرارة خروج غازات العادم من المسترجع	
107	6-4-5 آلية تصميم المسترجع	
108	7-4-5 تحديد جداء معامل الانتقال الحراري الكلي في مساحة سطح التبادل الحراري (UA) المطلوب من المسترجع	
109	8-4-5 حساب البارامترات الأساسية للمسترجع الحراري المدروس	
109	1-8-4-5 حساب الطول الذي يتم فيه مرور المائع باتجاه كل من غازات العادم و الهواء المضغوط	
109	2-8-4-5 حساب عدد الممرات الكلي لمرور كل من غازات العادم و الهواء المضغوط	

110	تحديد خطوة الريشة باتجاه كل من غازات العادم و الهواء المضغوط	3-8-4-5
111	تحديد العدد الكلي للريش باتجاه كل من غازات العادم والهواء المضغوط	4-8-4-5
111	تحديد عدد إزاحات الريش باتجاه كل من غازات العادم والهواء المضغوط	5-8-4-5
112	حساب مساحة السطح الرئيسي (الأولي) باتجاه كل من غازات العادم والهواء المضغوط	6-8-4-5
113	حساب مساحة السطح الثانوي (الريش) باتجاه كل من غازات العادم والهواء المضغوط	7-8-4-5
113	حساب مساحة السطح الكلي باتجاه كل من غازات العادم والهواء المضغوط	8-8-4-5
114	حساب كثافة مساحة السطح باتجاه كل من غازات العادم والهواء المضغوط	9-8-4-5
114	حساب مساحة التدفق الحر الأصغرية باتجاه كل من غازات العادم والهواء المضغوط	10-8-4-5
115	حساب مساحة التدفق الأمامية باتجاه كل من غازات العادم والهواء المضغوط	11-8-4-5
116	حساب نسبة مساحة التدفق الحر الأصغرية إلى مساحة التدفق الأمامية باتجاه كل من غازات العادم و الهواء المضغوط	12-8-4-5
116	حساب القطر الهيدروليكي لممرات تدفق كل من غازات العادم والهواء المضغوط	13-8-4-5
117	حساب مساحة التوصيل للمقاومة الحرارية للجدار	14-8-4-5
117	حساب بعض الأبعاد الضرورية باتجاه كل من غازات العادم والهواء المضغوط	15-8-4-5
118	حساب السرعة الكتلية لكل من غازات العادم والهواء المضغوط	16-8-4-5
119	حساب عدد رينولدز لكل من غازات العادم والهواء المضغوط	17-8-4-5
120	حساب معاملات الاحتكاك (j) و (f) لهذا النوع من الريش عند عدد رينولدز المحسوب باتجاه كل من غازات العادم و الهواء المضغوط	18-8-4-5
121	حساب معامل الانتقال الحراري باتجاه كل من غازات العادم والهواء المضغوط	19-8-4-5
123	حساب البارامترات الأساسية لحساب مردود الريش باتجاه كل من غازات العادم والهواء المضغوط	20-8-4-5
123	حساب مردود الريش باتجاه كل من غازات العادم والهواء المضغوط	21-8-4-5

124	حساب مردود السطح الكلي باتجاه كل من غازات العادم والهواء المضغوط	22-8-4-5
124	حساب المقاومة الحرارية للجدار	23-8-4-5
125	حساب الحمل الحراري من خلال تحديد جداء معامل الانتقال الحراري الكلي في مساحة سطح التبادل الحراري (UA)	24-8-4-5
125	التصميم الهيدروليكي للمسترجع	5-5
125	حساب هبوط الضغط داخل المسترجع من جانب غازات العادم	1-5-5
128	المواصفات النهائية للمسترجع	6-5
129	الفصل السادس : الدراسة الاقتصادية و البيئية	
130	حساب الكلفة التأسيسية للمسترجعات	1-6
130	حساب سعر الوقود الموفر بعد تركيب المسترجع	2-6
132	حساب فترة استرداد رأس المال	3-6
133	حساب انخفاض كمية غاز ثاني أكسيد الكربون المنبعثة	4-6
134	النتائج والتوصيات	
135	المراجع	

المقدمة

ارتبط تطور المجتمعات الإنسانية منذ الأزل مع تقدم فن استثمار موارد الطاقة، ولقد تعثرت خطوات المجتمعات في مختلف الأزمنة عندما عجزت عن إيجاد التقنيات المناسبة لاستثمار الموارد الطاقية وشكل اكتشاف النار والوقود السائل والتيار الكهربائي قفزات كبيرة في سلم تطور المجتمعات البشرية.

في عصرنا الحديث يشكل فن استثمار موارد الطاقة الأساس العلمي لحل مسألة الطاقة والنمو وبالتالي لحل مسائل التطور الاقتصادي والاجتماعي والثقافي للمجتمع.

ويتجه العالم في الوقت الحالي إلى استخدام الطاقة بشكل منظم ومدرّوس ومحاولة البحث عن مصادر جديدة للطاقة بالإضافة إلى محاولة الاستفادة من الطاقة الضائعة بكافة أشكالها. ويعتبر إسترجاع الطاقة الحرارية الضائعة من العمليات الصناعية المهمة التي تتميز بفوائد طاقية وبيئية عديدة والتي تتضمن توفير في كمية الوقود وبالتالي التقليل من كمية الطاقة المستهلكة والتقليل من حجم المعدات المستخدمة بالإضافة إلى التقليل من كمية الملوثات المنبعثة المضرّة بالبيئة.

يتم تطبيق إسترجاع الحرارة على كافة الجريانات التي تحمل طاقة حرارية فائضة كغازات الاحتراق الناتجة عن العنفات الغازية و غازات الاحتراق الناتجة عن المحركات والبخار الناتج عن التمدد في العنفات البخارية بالإضافة إلى الغازات الناتجة من الأفران الصناعية وأي نوع من أنواع الجريانات التي تحمل طاقة حرارية يمكن الاستفادة منها.

ويتم الاستفادة من الطاقة الحرارية المستردة لأغراض عديدة كتوليد البخار أو الماء الساخن لأغراض إنتاج الطاقة أو لأغراض صناعية والاستفادة من الطاقة الحرارية لأغراض التدفئة والتكييف أو تسخين الهواء الداخل إلى حجرة الاحتراق في العنفات الغازية ذات الدورة البسيطة.

إن استرجاع الحرارة يكون جذاباً في المنشآت العنفية الغازية الثابتة، فالزيادة في تكاليف الصيانة صغيرة بالمقارنة مع الوقود الموفر، ومن جهة ثانية فإن وجود مسترجع حراري يساعد في تحسين

مردود المنشأة عند عملها على حمل جزئي، حيث أنه عندما تعمل عنفة غازية مصممة لاستطاعة محددة (دون مسترجع) فإن مردودها ينخفض بشكل واضح عندما تكون الاستطاعة الناتجة من الآلة أقل من استطاعتها الإسمية، إن استعادة حرارة غازات العادم يخفض من هذا التغير في المردود، وقد وجد الباحث أن كل هذه الشروط متطابقة مع شروط عمل العنفات الغازية في شركة الفرات للنفط ولذلك سندرس في هذا البحث رفع كفاءة العنفات الغازية في شركة الفرات للنفط باسترجاع غازات العادم لتسخين الهواء الداخل إلى حجرة الاحتراق.

أهمية البكت و أهدافها

إن أداء أي محطة يقيم من خلال ما تعطيه هذه المحطة من استطاعة وما تستهلكه من وقود وفي بحثنا هذا سنحاول رفع كفاءة العنفات الغازية في شركة الفرات للنفط من خلال تقليل استهلاك الوقود المحقون في غرفة الاحتراق، وذلك عن طريق إدخال الهواء الخارج من الضاغط إلى مسترجع حراري للاستفادة من الطاقة الحرارية لغازات العادم وما ينتج عن ذلك من :

- رفع معامل أداء المحطة الكلي (المردود).
- تقليل كمية الوقود المحقونة في غرفة الاحتراق.
- تقليل كمية الانبعاثات الخارجة من غازات العادم.

الفصل الأول

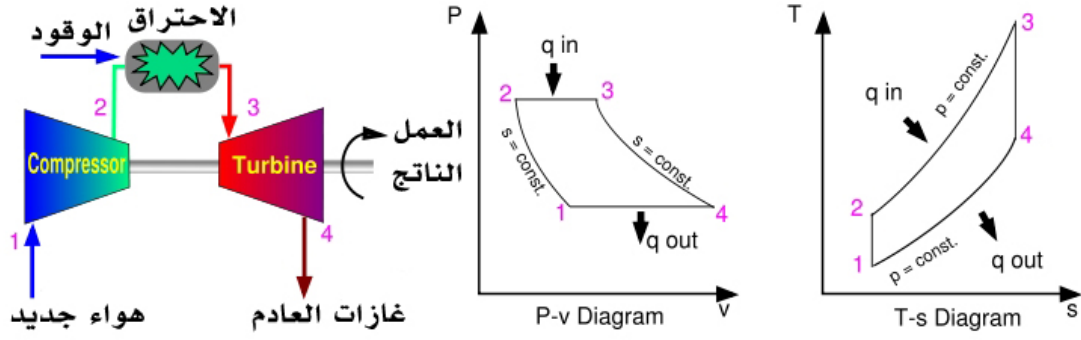
محطات الطاقة الغازية (أنواعها، مكوناتها، مجال استخدامها)، وطرق الاستفادة من الطاقة

الحزامية للغازات العادم

1-1: تطور العنفات الغازية ومبدأ عملها:

تعرف العنفة الغازية بأنها الآلة الحرارية التي تقوم بتحويل الطاقة الحرارية التي تحملها الغازات إلى طاقة ميكانيكية منقولة على شكل حركة دورانية إلى محور الآلة والتي يمكن توظيفها بالشكل الذي يريده المستثمر.

وبين الشكل (1-1) الدورة الحرارية للعنفة الغازية البسيطة :



الشكل (1-1) : الدورة الحرارية للعنفة الغازية البسيطة

وقد أضحت الآلات الحرارية العنفة بأنواعها المختلفة إحدى الوسائل المستخدمة لتوليد الطاقة الميكانيكية وذلك بسبب غياب الأجزاء التي تؤدي الحركة الترددية الانتقالية، مما جعل المشاكل المتعلقة بالتوازن قليلة واستهلاكها من زيوت الشحم أقل بكثير.

فقد مكن ذلك بداية الأمر من استخدام البخار في العنفات البخارية بدايات القرن العشرين والتي غطت قسماً كبيراً من الطاقة المولدة في العالم، حيث وصلت الطاقة التي يمكن توليدها إلى (1000MW) بمردود (40%) من عنفة واحدة، إلا أن العنفات البخارية لها جملة عيوب كتوليد البخار بضغط ودرجات حرارة عالية، والحاجة إلى تجهيزات غالية الثمن وكثيفة لمنع التسربات بالإضافة إلى الحاجة إلى أحجام كبيرة (للمراجل والمكثفات و.....).

ففي العنفات البخارية لا تتمدد الغازات ضمن العنفة وإنما تقوم بتسخين المياه وتحويلها إلى بخار (أي أن البخار يلعب دور مرحلي) وبالتالي لا يمكن رفع درجة حرارة البخار إلى قيم أعلى ولهذا وجدت العنفات الغازية والتي تقوم بإلغاء البخار كوسيط عامل وتدخل الغازات المحترقة نفسها إلى العنفة مما أمكن من رفع درجات الحرارة إلى قيم أعلى بكثير من تلك الموجودة في العنفات البخارية، ومن هنا أتت فكرة

العنفات الغازية والتي انطلقاً من دورة كارنو يجب أن تكون درجات حرارة المصدر الحار أعلى ما يمكن بالإضافة إلى رفع الضغط، هذا ولم يكن ذلك مستطاعاً في بدايات القرن التاسع عشر وذلك بسبب عدم توفر المعادن القادرة على تحمل درجات الحرارة العالية وعدم قدرتها على مقاومة الإجهادات الحرارية والاهتزازات بالإضافة إلى قلة المعلومات المتعلقة بشروط الجريان والديناميك الحراري وإمكانية رفع الضغط بشكل كبير.

لقد ظهرت البدايات الأولى للعنفات الغازية في البلدان الصناعية في أواخر القرن الثامن عشر وبدايات القرن التاسع عشر على يد مجموعة من العلماء كـ الإنكليزي (Barber) عام (1791 م) الذي اقترح ضاغطاً مكبسياً لرفع الضغط عند مدخل العنفة والفرنسي (Berson) عام (1837 م) والذي استخدم فيها مروحة، وفي ألمانيا قام شولتز (1872 م) بتصميم عنفة غازية تعمل تحت ضغط ثابت، وفي تلك الفترة تقريباً قدم العالم الروسي (Kozmensky) نموذجاً المقترح للعنفة الغازية إلا أن كل تلك النماذج لم تستطع تقديم أي عمل مفيد بسبب انخفاض قيمتي المردود للضاغط والعنفة على حد سواء.

في الواقع تم تصميم أول نموذج من العنفات الغازية يعطي عملاً مفيداً من قبل عالمين فرنسيين عام (1916م) هما ليغال وأرتونغو، وعندها لم تزد قيمة الاستطاعة فيها عن (4 hp) وبمردود (3-4%).

وقد حدثت التطورات الفعلية على العنفات الغازية خلال الحرب العالمية الثانية عندما تولدت الحاجة إلى استبدال المحركات المكبسية بمحركات الدفع النفاثة، ولكي يتحقق التمدد ضمن العنفة الغازية يجب رفع ضغط الوسيط العامل، كما يمكن زيادة الطاقة المتولدة في العنفة بإضافة الطاقة للوسيط العامل برفع درجة حرارته قبل التمدد، وعندما يكون الوسيط العامل هو الهواء فإنه من المناسب حرق الوقود مع الهواء المضغوط، وعندها يمكن للعنفة إنتاج طاقة قادرة على تدوير الضاغط وإعطاء طاقة دورانية مفيدة يمكن نقلها على محور الآلة، تحدث الضياعات في الواقع في الضاغط والعنفة والتي بزيادتها تزداد الطاقة اللازمة لتشغيل الضاغط وتنخفض الطاقة الناتجة عن العنفة أي تسبب خفصاً في مردود الضاغط والعنفة، ولهذا يجب إضافة الطاقة وبالتالي الوقود إلى الوسيط العامل قبل أن تتم إدارة أحد أجزاء العنفة وتتعلق إضافة هذا الوقود بكمية الهواء المار ضمن المنشأة وتحدد بدرجة الحرارة الأعظمية التي تتحملها أجزاء العنفة وبنسبة الوقود للهواء الأعظمية، ودرجة الحرارة تلك تتعلق بدورها بمقاومة الزحف الحراري ونوعية المعادن والعمر الزمني للمنشأة.

وهكذا نستنتج أن هناك عاملان رئيسيان يؤثران على أداء العنفة وهما مردود أجزاء المنشأة العنفية ودرجة حرارة دخول الوسيط العامل للعنفة، فكلما كانت قيم المراديد ودرجات الحرارة أعلى كلما أدى ذلك إلى تحسين أداء المنشأة.

كما أن المردود الكلي للمنشأة يعتمد على نسبة الانضغاط في الضاغط فصعوبة الحصول على نسبة انضغاط عالية وبمردود عالي أدت إلى التفكير بتصميم عنفة غازية يتم تقديم الحرارة فيها تحت حجم ثابت نظراً لمردودها الحراري المرتفع نسبياً، فقد قام العالم (هولتز فارت) في الفترة الواقعة ما بين (1908-1933) بتصميم عنفة غازية وفقاً لذلك المبدأ، وقد حصل على مردود مرتفع وصل إلى (18%) واستطاعة قدرها (2 MW)، إلا أن الاستمرار بهذا الاتجاه توقف نهائياً بسبب حاجة حجرة الاحتراق إلى صمامات لعزل الحجرة عن العنفة والضاغط، وكون الاحتراق متقطعاً مما يجعل الغازات تخرج على شكل نبضات تعرض شفرات العنفة للاهتزاز مولدة إجهادات دورية تسبب انكسارها.

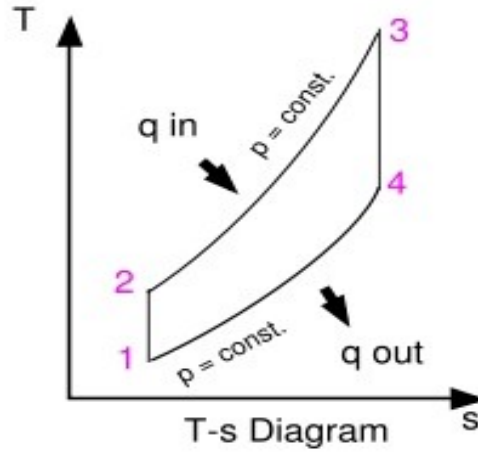
ولهذا تمت العودة إلى تطوير الدارة ذات الضغط الثابت ولم يتم حل الإشكالية المتعلقة بزيادة نسبة الانضغاط ورفع مردود الضاغط إلا بتطبيق علم الأيروديناميك (ديناميك الغازات) ومنذ ذلك الوقت تطورت العنفات الغازية يداً بيد مع هذا العلم وعلم المعادن والتي تم الوصول بفضلها إلى نسبة انضغاط بمردود (35%) ومردود للعنفة والضاغط بين (85-90%) واستطاعة كلية للعنفة تصل إلى (250 MW) [1].

1-2: تصنيف العنفات الغازية:

تصنف العنفات الغازية حسب الطرق المتبعة إلى ما يلي :

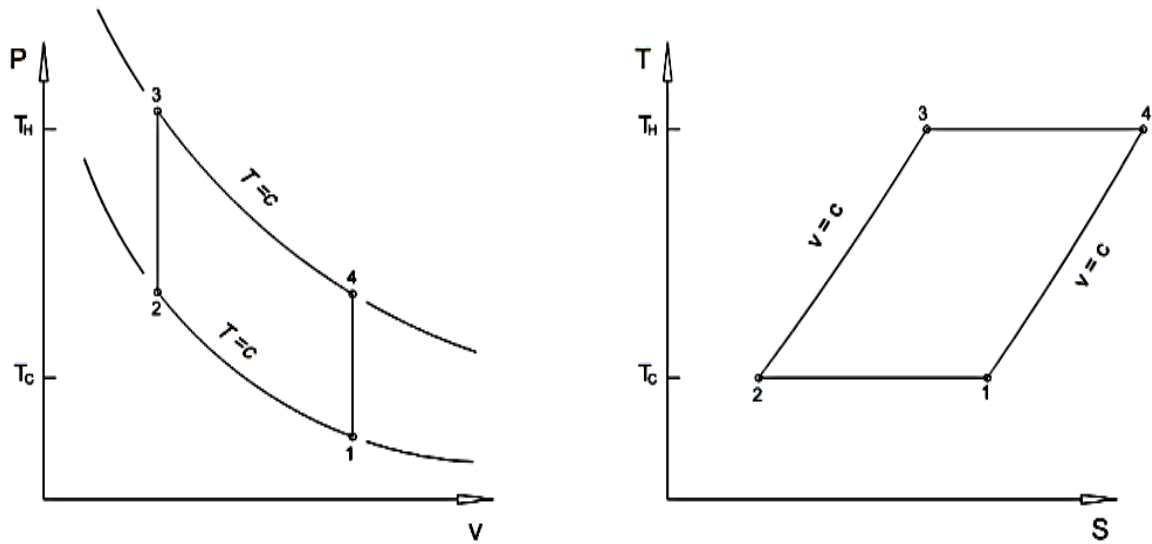
1-2-1: تصنيف العنفات الغازية حسب عملية الاحتراق:

- الاحتراق المستمر تحت ضغط ثابت (دائرة جول أوبرايتون).



الشكل (2-1) : دورة جول

- الاحتراق المنقطع تحت حجم ثابت (دورة إريكسون).



الشكل (3-1) : دورة إريكسون

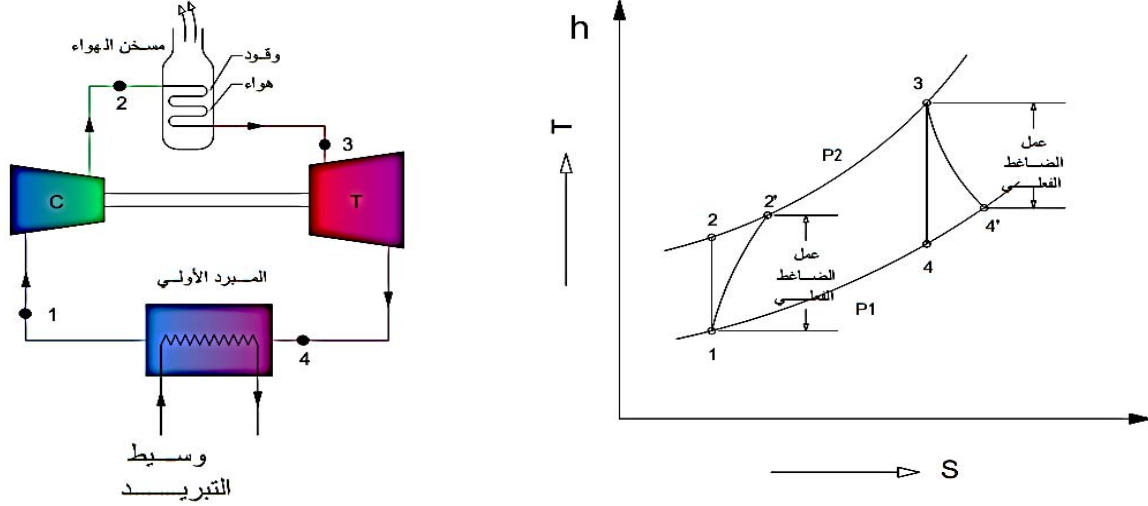
2-2-1: تصنيف العنفات الغازية حسب عملية التمدد في العنفة:

- عنفة فعلية : وفيها يتم التمدد في الجزء الثابت.
- عنفة رد فعلية : وفيها يتم التمدد في الجزء المتحرك.

3-2-1: تصنيف العنفات الغازية حسب مردود الوسيط العامل:

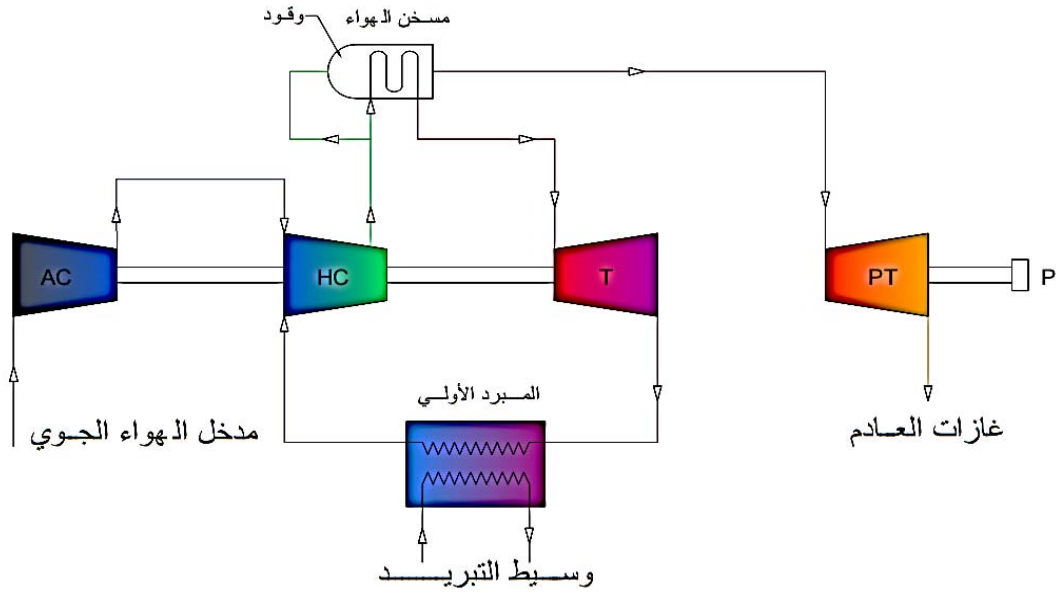
- دورة مفتوحة : وفيها يؤخذ الوسيط العامل من الوسط الخارجي ويطرح إليه.

- دائرة مغلقة : وفيها يتم رفع ضغط الوسيط العامل من (P1) حتى (P2) بواسطة الضاغط ثم يتم رفع درجة حرارته عبر المسخن حتى (T3) بوسيط خارجي ومن ثم يتمدد في العنفة حتى النقطة (4) بعدها يتم تبريده ضمن المبرد الأولي حتى درجة الحرارة الأولية (T1).



الشكل (1-4) : مخطط الدائرة المغلقة.

- دائرة نصف مغلقة : الوسيط العامل يكون عادة الهواء الذي يتم ضغطه بواسطة ضاغط مساعد والهواء الخارج من العنفة التي تدور الضاغط يمرر عبر مبرد أولي ومن ثم إلى ضاغط الضغط العالي حيث يندمج مع الهواء الخارجي، يرتفع ضغط الهواء ثم ينقسم إلى قسمين الأول يستخدم للاحتراق مع الوقود ضمن مسخن الهواء ليدفع إلى عنفة الطاقة المربوط مع المنوبة والباقي يسخن ضمن مسخن الهواء بالتبادل الحراري وبعدها ليتمدد ضمن العنفة التي تدور الضاغط، هذا القسم من الهواء يبقى نظيفاً لكونه ضمن دائرة مغلقة، أما الهواء المسحوب من الوسط الخارجي فيتم طرحه إلى الوسط الخارجي بعد تسخينه من الهواء وتمدده عبر عنفة الطاقة.



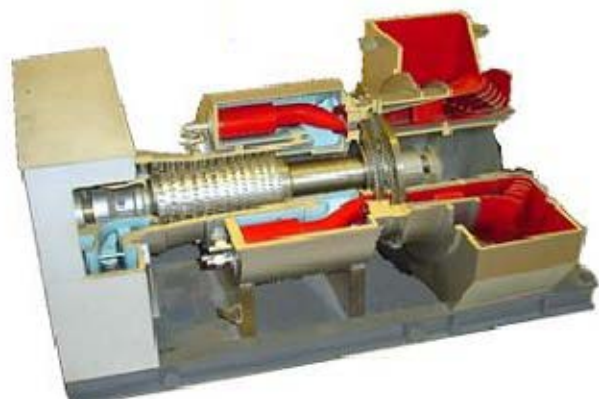
الشكل (5-1) : مخطط الدارة النصف مغلقة

4-2-1: تصنيف العنفات الغازية حسب اتجاه الجريان:

- جريان محوري : أي أن اتجاه جريان الوسيط العامل يكون موازياً لمحور الدوران
- جريان قطري : أي أن اتجاه جريان الوسيط العامل يكون عمودياً على محور الدوران.

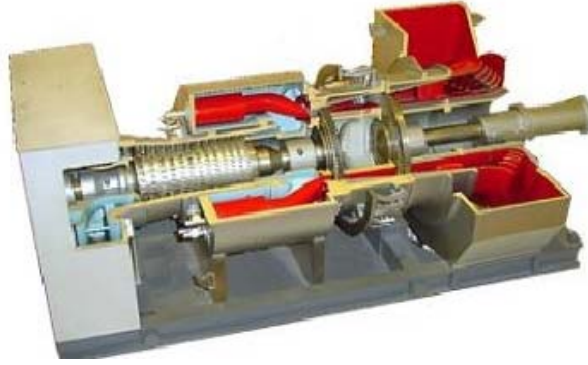
5-2-1: تصنيف العنفات الغازية حسب عدد المحاور:

- وحيد المحور : حيث ترتبط العنفة مع الضاغط بمحور واحد.



الشكل (6-1) : العنفة وحيدة المحور

- ثنائية المحور:



الشكل (1-7) : العنفة ثنائية المحور

6-2-1: تصنيف العنفات الغازية حسب درجة حرارة الغازات عند مدخل العنفة:

- العنفات منخفضة الحرارة : والتي لا تحتاج إلى تبريد.
- العنفات عالية الحرارة : وهي العنفات المبردة.

7-2-1: تصنيف العنفات الغازية حسب عدد المراحل:

- أحادية المرحلة.
- متعددة المراحل.

ويمكن للتصنيفات المذكورة أن تلتقي في دورة واحدة كأن تكون دورة بسيطة مفتوحة للعنفة تمدد فعلية متعددة المراحل بمحور واحد تعمل وفق دائرة جول غير مبردة والجريان فيها محوري [1].

3-1: مكونات العنفة الغازية:

1-3-1: الضاغط العنفي:

هو الآلة التي تقوم بتحويل الطاقة الميكانيكية المنقولة على محورها إلى طاقة كامنة يكتسبها المائع المتحرك على شكل ضغط، يختلف الضاغط عن المروحة بنسبة الانضغاط التي يعطيها ففي المراوح لا تزيد هذه النسبة عن (3) أي أنها تقوم بتحريك المائع فقط للتغلب على المقاومات الهيدروليكية التي تعترض طريق المائع، بينما يختلف الأمر بالنسبة للضواغط التي تزيد الضغط أضعاف قيمته عند الدخول، فالمتطلبات الموضوعية أمام الضواغط المستخدمة في المنشآت الغازية كثيرة أهمها :

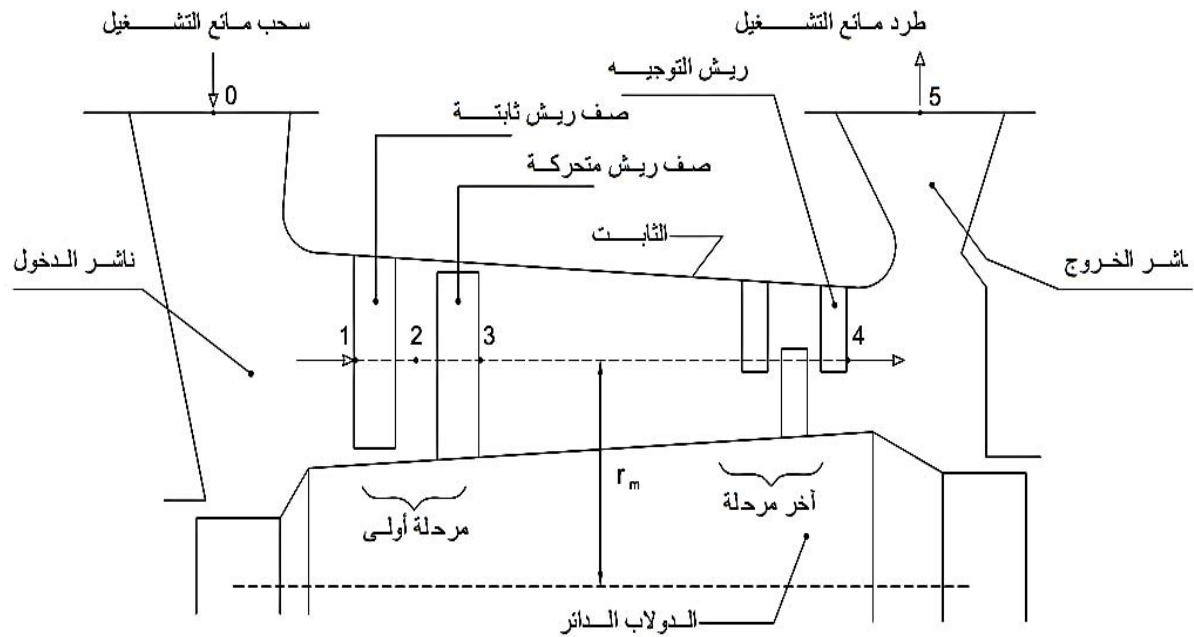
- إمكانية تأمين تدفق كبير للهواء.
- نسبة ضغط مرتفعة.
- مردود مرتفع.

إن أهمية الضاغط مساوية لأهمية العنف الغازية نفسها لأن الريح الناتج عن المجموعة يزداد بازدياد فعالية الضاغط بسبب كميات الهواء الكبيرة التي تتطلبها المنشأة الغازية والأنواع الأكثر ملاءمة للمنشأة الغازية هي الضواغط العنفية المحورية والنابذة، حيث تستخدم المحورية للاستطاعات الكبيرة والمتوسطة، أما المحطات ذات الاستطاعة الصغيرة فتستخدم الضواغط النابذة ذات التدفقات المنخفضة.

1-3-1: الضواغط العنفية المحورية:

يسمى الضاغط محورياً إذا كانت خطوط تيار الوسيط العامل موازية لمحور الدوران، ويتألف من :

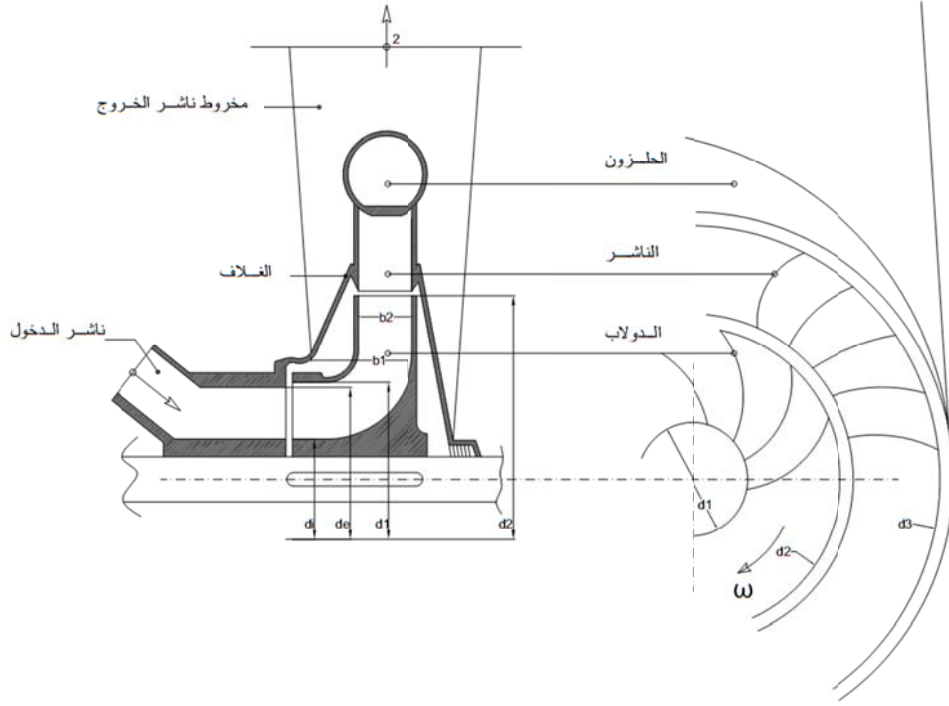
- الجزء الدوار : هو عبارة عن سلسلة من السطوح الانسيابية الدوارة تشكل مجموعها صفوف الشفرات المتحركة مع المحور والطبل والقرص.
- الجزء الثابت : هو عبارة عن مجموعة من السطوح الانسيابية الثابتة التي تشكل مجموعها الشفرات الثابتة والهيكل.



الشكل (8-1) : الضاغط العنفي المحوري

1-3-2: الضاغط العنفي النابذة:

يسمى الضاغط نابذاً عندما يقوم بتحويل الطاقة الميكانيكية المنقولة على محورها إلى طاقة ضغط بفعل تبادل الطاقة بين المائع المضغوط من جهة وعناصر الآلة من جهة أخرى، حيث يتم دخول الهواء إلى الضاغط بسبب التخلخل المتولد عند مدخله والذي سببه دوران محور الدوالب، بعد دخول الهواء محورياً يتحول الجريان إلى جريان قطري خلال ممرات الضاغط باتجاه متعامد على المحور وإلى الخارج، حيث يرتفع ضغطه بفعل القوة النابذة.



الشكل (1-9) : الضاغط العنفي النابذي

1-3-2: حجرة الاحتراق:

هي ذاك الجزء من العنفة الغازية الذي يؤمن رفع المحتوى الحراري للوسيط العامل بفعل أكسدة الوقود الناتج عن احتراقه، وبالتالي رفع درجة حرارة الغازات إلى الدرجة المطلوبة عند مدخل العنفة الغازية.

1-2-3-1: الأجزاء الرئيسية في حجرة الاحتراق:

أ. مجموعة توجيه الهواء : وفيها يتم توزيع الهواء الأولي في الفراغ الحراري وخلق الشروط الملائمة لعملية الاحتراق بشكل مستمر وبدون انقطاع.

ب. كبسولة الإشعال : تهدف إلى إشعال الوقود في حجرة الاحتراق، وتشكيل مصدر للاشتعال لدى إقلاع العنفة.

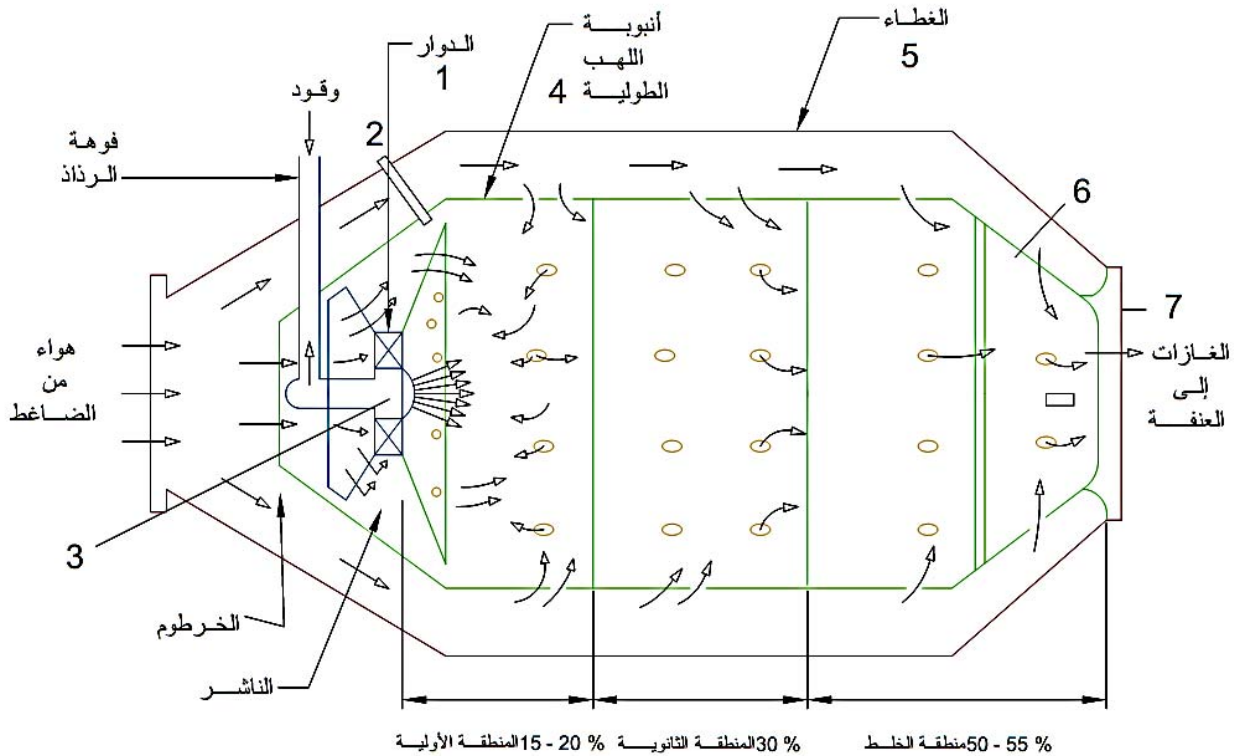
ت. مجموعة الحارق : تخصص هذه المجموعة لحقن وتزويد حجرة الاحتراق بالوقود وتوزيعه بشكل متجانس في منطقة الاحتراق وذلك بعد تزييره.

ث. أنبوبة اللهب : تؤمن انتشار الحرارة فقط في الفراغ الذي يحدث فيه الاحتراق ومهمتها تحمل الإجهادات الحرارية العالية الناتجة عن التيارات الحرارية.

ج. هيكل الحجرة : وهو الغطاء الخارجي لها ومهمته تحمل الحمولات الديناميكية والإجهادات الناتجة عن الضغط الداخلي في حجرة الاحتراق.

ح. الخلطات : تقوم بخلط الهواء مع منتجات الاحتراق عند مخرج حجرة الاحتراق وذلك للحصول على درجة الحرارة المطلوبة وبشكل متجانس.

خ. المهدئات : تهدف إلى الإقلال من اضطراب الهواء لدى خروجه من حجرة الاحتراق وتهيئته للدخول إلى العنفة بحقول سرعة متجانسة.



الشكل (10-1) : الأجزاء الرئيسية في حجرة الاحتراق

1-3-3: عنفة التمدد:

هي تلك الآلة التي يتم فيها سحب الطاقة الموجودة في الغاز الساخن وتحويلها إلى حركة دورانية، جزء من طاقة الحركة الدورانية يصرف على تدوير الضاغط المربوط مع محور العنفة والقسم المتبقي يستفاد منه إما من توليد الكهرباء من منوية كهربائية، أو في تدوير عمود حركة آلة ما.

وتصنف العنفات الغازية حسب مبدئين أساسيين، الأول حسب طبيعة الجريان إلى عنفات نابذة وفيها يكون اتجاه تيار الغازات عمودياً على محورها، وعنفات محورية وفيها يكون اتجاه التيار موازياً لمحور العنفة.

أما المبدأ الثاني حسب كمية الطاقة المولدة على أجزاء العنفة فإذا كان تمدد الغازات في الشفرات الثابتة كاملاً حتى الضغط المساوي للضغط عند مخرج العنفة تسمى العنفة بالفعلية، أما في الحالة الثانية عندما يستمر تمدد الغازات على الشفرات المتحركة تسمى العنفة بالردفعلية، وحالياً لا تستخدم العنفات الفعلية بسبب مردودها المنخفض.

تتميز العنفات المحورية عن النابذية بمردودها المرتفع ووزنها الخفيف نسبياً وأبعادها الصغيرة والاستطاعة النوعية الكبيرة التي من الممكن توليدها في عنفة واحدة نظراً لإمكانية وصل عدة مراحل مع بعضها وسهولة تأمين تدفقات كبيرة للغازات، وهذا ما يبرر انتشارها الواسع، وفي الحالات التي لا يكون فيها تدفق الغازات كبيراً فتستخدم العنفات النابذة وخاصة في المحركات ذات الاستطاعة الصغيرة.

1-3-4: التجهيزات والدارات الملحقّة بالعنفة الغازية:

1. منظومة الوقود : إن منظومة ضخ الوقود مهمتها حفظ كمية محددة من الوقود وتقديمه إلى حجرة الاحتراق وفق المواصفات المطلوبة من حيث التدفق والضغط ودرجة الحرارة.
2. منظومة التزييت : مهمتها تتلخص في تأمين تزييت مضاجع العنفة، وعلب السرعة، والوصلات المرنة في منظومة التحكم.
3. منظومة تنقية الهواء: وهي تهدف إلى المحافظة على مجرى الهواء والغازات نظيفاً وتحميه من تأثير الغبار والشوائب التي من الممكن أن تدخل إلى المجرى أي من الصداً والترسيب والتآكل.
4. مخمدات الصوت : مهمتها تخفيض تردد الضجيج في أماكن تواجد الطاقم إلى الحد الأدنى المسموح به.

5. معدات تبريد وتسخين الهواء : إن تبريد الهواء قبل دخوله إلى الضاغط يسمح بزيادة استطاعة المنشأة من (10 - 12 %)، أما عندما تكون درجة حرارة الوسط المحيط قريبة من الصفر والرطوبة مرتفعة فمن الضروري تسخين الهواء لتحاكي تشكل الصقيع على مدخل الضاغط مما يسيء لعمله.

6. مصادر التغذية الكهربائية للاستخدام الذاتي : من أهم المصادر اللازمة لعمل المنشأة الغازية هي المجموعات التالية :

- مضخات الزيت والوقود اللازمة في حالة الإقلاع والطوارئ.
- منظومة التحكم الآلي.
- مضخات الماء.
- محرك الإقلاع الكهربائي: يتم تأمين الطاقة الكهربائية اللازمة لذلك إما من شبكة خارجية أو بواسطة مصدر مستقل (محرك ديزل - مولد).

7. معدات التحكم والأمان :

- منظومة إطفاء الحريق : ومهمتها إعطاء إشارة إنذار عن وجود حريق بالإضافة إلى فتح مجموعة الإطفاء في حالة نشوب حريق ضمن مكان وجود العنفة الغازية.
- معدات التحكم : ومهمتها تحقيق العمل المطلوب من العنفة بشكل آمن.

8. معدات الإقلاع : مهمتها تأمين عملية تشغيل العنفة وإقلاعها من حالة الراحة إلى الحالة الاسمية[2].

1-4: التطبيقات العملية للعنفة الغازية.

1-4-1 : في مجال توليد الطاقة الكهربائية :

تستخدم العنفات الغازية بشكل واسع في توليد الكهرباء، وذلك بربط المنوبة على محور الآلة بشكل مباشر أو عن طريق علبة سرعة، وبسرعة دوران ثابتة (3000 rpm) من أجل تردد (50 HZ).

يمكن لعملية التوليد أن تتم وفقاً للدائرة المفتوحة أو الدائرة المغلقة، وتختلف نسبة اشتراك العنفات الغازية في توليد الكهرباء من بلد لآخر، ويعتمد ذلك على كلفة التوليد (مائية، بخارية،.....)، ففي البلدان التي لا

تتوفر فيها تلك المصادر تعتبر العنفات الغازية هي المصدر الوحيد لتوليد الكهرباء (مثل السعودية)، أما في سورية فتقوم المنشآت بتوليد ما يقارب (40 %) من الطاقة اللازمة للقطر.

كما يمكن للعنفات الغازية بمختلف داراتها الترموديناميكية العمل على كافة أنواع الحمولات، فعند العمل على حمولة الذروة يجب على المنشأة الغازية أن تكون قادرة على المناورة، وأن تكون كلفة توليد الطاقة معقولة، بالإضافة إلى سرعة الإقلاع، أما المنشآت الغازية التي تعمل على تغطية الحمولات الأساسية فيجب أن تعمل بمميزات الاسمية تقريباً بالإضافة إلى المميزات الأخرى كسهولة الصيانة، وانخفاض عدد مرات التوقف.

1-4-2 : محطات الضخ (الإدارة الميكانيكية) :

حيث تقوم المنشأة بتدوير الضاغط أو المضخة المربوطة معها بهدف ضغط ونقل السوائل أو الغازات المضغوطة من مكان لآخر، والاستخدام الأوسع لتلك المحطات في هذا المجال هو تدوير الضواغط النابذة التي تقوم بضخ الغاز الطبيعي ضمن محطات الضخ على خطوط نقل الغاز، وكذلك المضخات المستعملة لنقل النفط والمنتجات النفطية.

تعمل هذه المنشآت بمعدلات تشغيل مرتفع، يتميز المحور الحر (المربوط مع الضاغط أو المضخة) بسرعة دوران متغيرة ضمن مجال العمل حسب الاستطاعة المطلوبة، وتأتي أهمية وجود أكثر من محور من أجل تغيير التدفق وضغط الغاز عن طريق تغيير سرعة الدوران.

1-4-3 : في وسائط النقل الأرضية :

هي جميع الوسائط ما عدا الجوية منها، فقد لاقى استخدام العنفات الغازية المحمولة انتشاراً بشكل رئيسي كمحركات دفع وتسريع لتأمين الطاقة اللازمة على الأساطيل البحرية العسكرية والمدنية بما فيها السفن ذات الحمولة الأفقية، وذات الأجنحة، وكذلك السفن التي تستخدم الوسادة الهوائية، والمنصات العائمة المستخدمة لإقلاع الطائرات، وكذلك كمحطات تزويد بالهواء ودفعه ضمن المراحل البخارية المستخدمة على محركات السفن.

وقد أثبت الواقع العملي كفاءة هذه المحطات وفعاليتها المرتفعة مقارنة بالمحركات الحرارية الأخرى نظراً لوحدة الاستطاعة الكبيرة التي يمكن تأمينها نسبة إلى حجم المنشأة، واستهلاكها النوعي المنخفض للوقود حسب نوعية الوقود.

أما فيما يخص استخدام العنفات الغازية في وسائط النقل البرية كالسيارات السياحية، والباصات الصغيرة فلم تلاق بعد ترحيباً في الأوساط الصناعية لأن استخدامها يحتاج إلى وجود تجارب استثمارية طويلة الأمد، وعدم توفر قطع التبديل الرخيصة، وغلاء أسعار هذه المحركات من جهة أخرى، إلا أن بعض المميزات الأخرى مثل قوة الجر، التلوث الأقل تعتبر من العوامل الإيجابية المساعدة على سرعة دخول العنفات الغازية حقل المنافسة مع المحركات الأخرى في المستقبل القريب.

1-4-4 : في وسائط النقل الجوية :

• في الطيران العسكري :

إن جميع الطائرات تستخدم العنفات الغازية، وكذلك تستخدمه الطائرات المروحية، حيث إن معظم الطائرات المقاتلة تستخدم المحرك النفاث، والاتجاه الحالي هو الحصول على طائرات أسرع ذات إقلاع عمودي، وذلك يتطلب مواد لزعانف الريش تتحمل درجات حرارة أعلى من تلك الموجودة في التوربين الصناعي.

• في الطيران المدني :

حيث أثبتت الطائرات المدنية النفاثة والمروحية جدارتها من حيث الاعتمادية، وقلة المصروفات التشغيلية، وقد نتج عن ذلك توسع كبير في استخدام الطيران كوسيلة فعالة للنقل العام، وهناك توسع في استخدام طائرات خاصة لنقل البضائع تستخدم عنفات غازية ضخمة.

1-4-5 : التطبيقات المتنوعة الأخرى للعنفات الغازية :

بسبب البساطة التصميمية، وخفة الوزن لاقت العنفات صغيرة الأبعاد تطبيقات واسعة من الاستخدامات السنية لأطباء الأسنان حتى الفضاء، فالعنفات الصغيرة (ميكروعنفة) التي تعمل على الهواء الساخن فقط، تستخدم في حفر الأسنان، كما أن العنفات الصغيرة العاملة على موائع ذات طاقة عالية بمعدلات جريان منخفضة تستخدم كوحدات طاقة مساعدة تحت الماء وعلى المركبات الفضائية، ونشير هنا إلى

أن الميكروعنفة هي العنفة التي لا يتجاوز قطرها (100mm) واستطاعتها (4kW)، وتدور بسرعة دوران عالية جداً (100,000–300,000 rpm) [1].

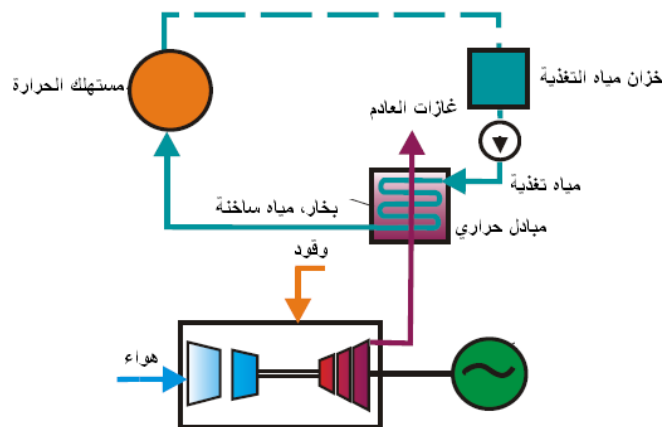
1-5: طرق الاستفادة من الطاقة الحرارية لغازات عادم العنفات الغازية:

يعزى المردود المتواضع للعنفات الغازية ذات الدارة البسيطة إلى ارتفاع درجة حرارة غازات العادم في نهاية عملية التمدد، ولكن هذا الارتفاع بدرجة الحرارة هو الذي يساعد بالتحديد بتحقيق استرجاع الحرارة المحسوسة، وذلك في العديد من التطبيقات كما يلي :

1-5-1 : في إنتاج الماء الساخن أو البخار :

من الواضح أنه يمكن الحصول على ماء ساخن بالحالة السائلة، وبدرجة حرارة محددة بالاستفادة من الطاقة الحرارية لغازات العادم، والتي تتراوح بين (400 – 500 درجة مئوية)، وذلك بعد اتخاذ الاحتياطات التالية :

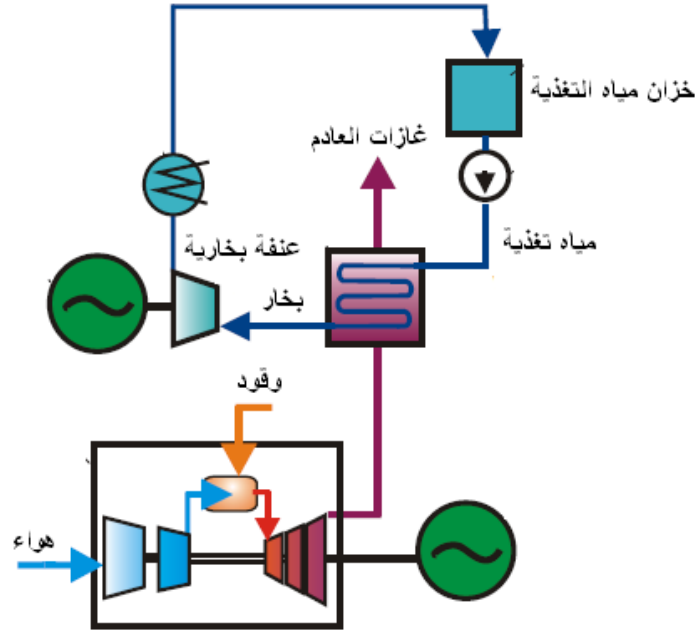
- المحافظة على ضغط مرتفع كاف للماء لمنع تبخره.
- اختيار درجة حرارة مرتفعة لغازات العادم لمنع تشكل أحماض يمكن أن تسبب في اهتراء سطوح التبادل الحراري.



الشكل (11-1) : إنتاج الماء الساخن أو البخار بالاستفادة من غازات العادم

1-5-2 : الدورات المركبة (غاز - بخار) :

من المعروف أنه للحصول على مردود أعظمي لدورة طاقة، فإنه من الطبيعي أن تضاف الحرارة عند أعلى درجة حرارة ممكنة، وتطرد الحرارة عند اخفض درجة حرارة ممكنة أيضاً، ولهذا السبب تم الجمع بين العنفات الغازية والعنفات البخارية، ولهذا فإن الهدف الرئيسي من الدارة المركبة هو زيادة المردود الحراري للمنشأة.

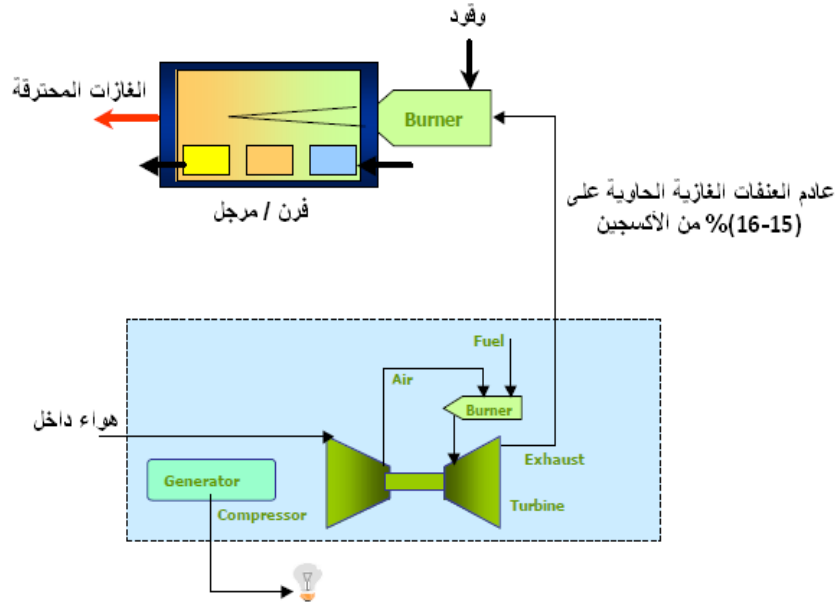


الشكل (1-12) : الجمع بين العنفة الغازية والبخارية

وهناك عدة طرق للجمع بين العنفات الغازية والبخارية، كالجمع بين العنفات الغازية والعنفات البخارية ذات الضغط المقابل، والجمع بين العنفات الغازية والعنفات البخارية ذات التكاثف.

1-5-3 : الحصول على الطاقة الحرارية اللازمة في بعض الصناعات :

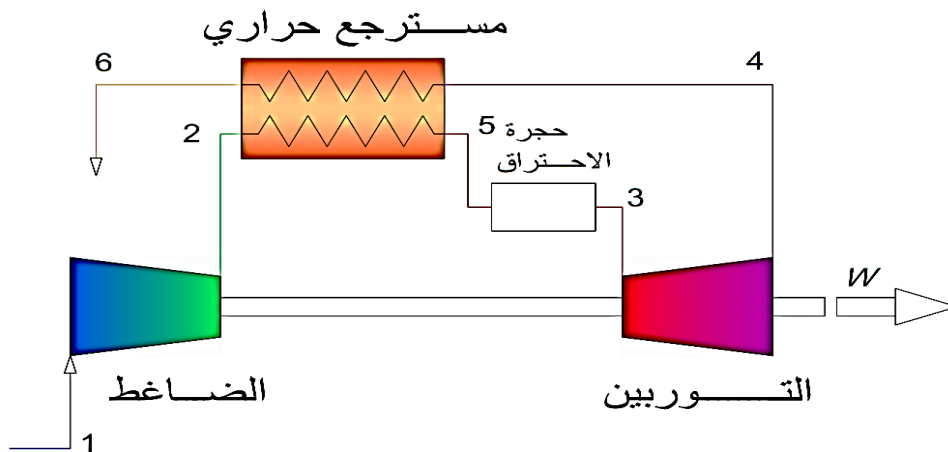
حيث تتطلب بعض الصناعات (كالصناعات الكيماوية) استخدام بعض الغازات الساخنة والتي تحتوي على نسبة جيدة من الأكسجين الحر، ويتوافر هذا الأكسجين في غازات العادم للعنفة الغازية، حيث يمكن أن نستفيد من هذه الكمية من الأكسجين في حقن كمية إضافية من الوقود، وذلك للحصول على الطاقة الحرارية المطلوبة.



الشكل (1-13) : الاستفادة من غازات العادم في بعض الصناعات

4-5-1 : استرجاع الحرارة في العنفات الغازية ذات الدارة المفتوحة :

في الدورة البسيطة للعنفة الغازية، تكون درجة حرارة خروج الغازات من العنفة أعلى من درجة حرارة الهواء الخارج من الضاغط والداخل إلى غرفة الاحتراق، وبالتالي فإنه يمكن تقليل كمية الوقود المزودة بتركيب مبادل حراري يستخدم غازات العادم المنطلقة من العنفة لتقوم بتسخين أولي للهواء بين الضاغط وغرفة الاحتراق، يدعى هذا المبادل بالمسترجع والذي سنقوم بدراسته وتصميمه ونراقب تأثيره على المردود [3] .



الشكل (1-14) : دائرة عنفة غازية بسيطة مع مسترجع

الفصل الثاني

العنفات المختارة وغائرات العادم الناتجة عنها

2-1: وصف العنفات المختارة:

تقوم شركة الفرات للنفط بتوليد الطاقة الكهربائية اللازمة لتغذية منشآتها ومعداتنا بواسطة العنفات الغازية الموجودة في محطة توليد الطاقة بحقل العمر، وهي عبارة عن عنفات غازية إيطالية الصنع من نوع (Nuovo Pignone Frame 6).

كل من هذه العنفات ذات استطاعة ظاهرية اسمية بحدود (40 MW)، واستطاعة فعلية بحدود (32 MW)، تعمل هذه العنفات على تأمين الطاقة الكهربائية اللازمة لعمل المضخات والضواغط والمعدات الأخرى بالإضافة إلى تأمين أحمال الإنارة والتكييف والخدمات الأخرى.

كما يوجد (25) عنفة غازية من نوع (Solar) موزعة في مختلف حقول الشركة كما يلي :

عشرة منها في معمل الغاز وستة في محطة توليد الطاقة وأربعة في حقل التيم وثلاثة في حقل الورد واثنان في حقل التتک وهذه العنفات ذات استطاعات منخفضة نسبياً تتراوح ما بين (1 - 3.5 MW) وهي تعمل على تدوير الضواغط التي تقوم بضغط الغاز ونقله بالإضافة إلى مهمة تأمين بعض الأحمال الأساسية عند الضرورة.

يقوم قسم التشغيل بالإشراف على عمل العنفات الغازية، ولكي يضمن موثوقية عمل هذه العنفات يتم تشغيل أربع منها، بينما تبقى الخامسة في حالة احتياط، ويتم إدخالها عند إجراء صيانة وقائية لأي من العنفات الأخرى، أوفي حال توقف إحدى هذه العنفات عن العمل.

تعمل هذه العنفات على الوقود الغازي المنتج في معمل غاز العمر، وفي حالات الطوارئ (عند انقطاع الإمداد بالغاز) تعمل على وقود الديزل.

وبالتالي سيتم اختيار عنفة من العنفات الغازية في محطة توليد الطاقة من نوع (Nuovo Pignone Frame 6) والمستخدمه في توليد الطاقة الكهربائية، كما سيتم اختيار عنفة من العنفات الغازية في معمل توليد الغاز من نوع (Solar) والمستخدمه في تدوير الضواغط التي تقوم بضغط الغاز ونقله وهي ذات استطاعة فعلية بحدود (3.5 MW).



الشكل (1-2) : العنفة الغازية المختارة من نوع (Nuovo Pignone Frame 6)

2-2: دراسة غازات العادم:

1-2-2: دراسة الوقود:

إن الوقود المستخدم في الاحتراق لكل من العنفات المختارة هو الوقود الغازي والذي يتكون من المركبات التالية:

- الميثان (CH_4)
- الايثان (C_2H_6)
- البروبان (C_3H_8)
- البوتان (C_4H_{10})
- البنتان (C_5H_{12})

- مركبات (C6+) وهي تضم كافة المركبات العضوية ذات الوزن الجزيئي الأثقل من

البنتان مثل : (C6H12 ,C7H14 ,C8H18)

- النتروجين (N2)

- ثاني أكسيد الكربون (CO2)

وبين الجدول (1-2) التركيب النسبي الحجمي للمركبات الداخلة في تركيب الوقود الغازي وذلك في 1 قدم مكعب من الوقود. تم أخذ القراءات لتركيب الوقود من غرفة التحكم في المحطة :

الجدول (1-2) : التركيب النسبي الحجمي للوقود (معمل غاز العمر)

CH4	C2H6	C3H8	C4H10	C5H12	C6+	N2	CO2
74.06	9.98	4.62	0.57	0.07	0.00	0.59	10.11

يبين الجدول (2-2) بعض القياسات الأساسية المأخوذة لإحدى العنفات الغازية من نوع (Solar) في معمل توليد الغاز، حيث تم أخذ مجموعة كبيرة من القراءات خلال كل فصل، ثم تم اختيار القيم الأكثر تكرارية ضمن مجال القراءات، حيث تبين هذه القراءات بارامترات كل من الوقود الغازي، الهواء، غازات الاحتراق:

الجدول (2-2) : بارامترات الهواء، الوقود، غازات العادم لعنفة (Solar)

درجة حرارة غازات العادم (°C)	ضغط الوقود (bar)	تدفق الوقود الداخل (m³/s)	درجة حرارة الغازات الخارجة من حجرة الاحتراق (°C)	درجة حرارة الهواء الخارج من الضاغط (°C)	ضغط الهواء الخارج من الضاغط (bar)	درجة حرارة الهواء الداخل إلى الضاغط (°C)	استطاعة العنفة (MW)	الفصل	العنفة
389	8.3	0.33	612	210	3.7	42	2.6	صيفاً	GT _{solar}
345	8	0.31	562	176	3.9	15	2.7	شتاءً	

كما يبين الجدول (3-2) بعض القياسات الأساسية المأخوذة لكل عنفة من العنفات الغازية في محطة توليد الطاقة من نوع (Nuovo Pignone Frame 6) والمستخدمة في توليد الطاقة الكهربائية، حيث تم أخذ مجموعة كبيرة من القراءات خلال كل فصل، ثم تم اختيار القيم الأكثر تكرارية ضمن مجال

القراءات، حيث تبين هذه القراءات بارامترات كل من الوقود الغازي، الهواء، غازات الاحتراق وهي مأخوذة من غرفة التحكم في المحطة :

الجدول (2-3) : بارامترات الهواء، الوقود، غازات العادم لعنفة (Nuovo Pignone Frame 6)

درجة حرارة غازات العادم (°C)	ضغط الوقود (bar)	تدفق الوقود الداخلي (m³/s)	درجة حرارة الغازات الخارجة من حجرة الاحتراق (°C)	درجة حرارة الهواء الخارج من الضاغط (°C)	ضغط الهواء الخارج من الضاغط (bar)	درجة حرارة الهواء الداخل إلى الضاغط (°C)	استطاعة العنفة (MW)	الفصل	العنفة
498	14.9	1.7	921	331	7.4	41.5	21.2	صيفاً	GT1
450	15	1.62	859	293	7.8	17	21.5	شتاءً	GT1
475	14.8	1.8	872	322	7	42.5	21.4	صيفاً	GT3
438	15.1	1.66	838	294	7.76	18	20	شتاءً	GT3
476	15.1	1.92	884	329	7.3	42	20.7	صيفاً	GT4
442	15.2	1.8	845	296	7.77	19	21	شتاءً	GT4
494	15.1	1.52	917	331	7.5	40	18.4	صيفاً	GT5
431	15.4	1.52	822	275	7.6	20	19	شتاءً	GT5

2-2-2: حساب تدفق غازات العادم:

يمكننا أن نحسب تدفق غاز العادم وذلك بمعرفة تدفق الوقود المستهلك وبالاعتماد عليه يمكننا حساب كمية الهواء اللازمة وذلك باستخدام نسبة الهواء إلى الوقود الفعلية المأخوذة من المحطة.

M_a : نسبة الهواء إلى الوقود الفعلية

إن نسبة الهواء إلى الوقود الفعلية المأخوذة من المحطة تقدر بـ 16 وحدة حجم من الهواء لكل وحدة حجوم من الوقود.

يمكن حساب التدفق الحجمي للهواء الداخل إلى حجرة الاحتراق المطلوب بالمعادلة:

$$M_a = \frac{\dot{V}_{air}}{\dot{V}_{fuel}} \dots \dots \dots (1 - 2)$$

$\dot{V}_{air}$: التدفق الحجمي للهواء

$\dot{V}_{fuel}$: التدفق الحجمي للوقود

يحسب التدفق الكتلي للوقود باعتبار أن الوقود غاز مثالي من خلال معادلة الغاز الكامل كما يلي:

$$\dot{m}_{fuel} = \frac{P_{fuel} \dot{V}_{fuel}}{RT_{fuel}} \dots \dots \dots (2 - 2)$$

$\dot{m}_{fuel}$: التدفق الكتلي للوقود الداخل إلى حجرة الاحتراق

P_{fuel} : ضغط الوقود الداخل إلى حجرة الاحتراق

T_{fuel} : درجة حرارة الوقود الداخل إلى حجرة الاحتراق

حيث يدخل الوقود إلى حجرة الاحتراق بضغط ثابت و درجة حرارة ثابتة تؤخذ قيمها من غرفة التحكم في محطة توليد الطاقة .

$$T_{fuel} = 30^\circ\text{C} + 273 = 303 \text{ K}$$

R: ثابت الوقود الغازي [4]

$$R = 385 \frac{\text{Joul}}{\text{kg. K}}$$

يحسب التدفق الكتلي للهواء الداخل إلى حجرة الاحتراق :

$$\dot{m}_{air} = \frac{P_{air} \dot{V}_{air}}{RT_{air}} \dots \dots \dots (3 - 2)$$

$\dot{m}_{air}$: التدفق الكتلي للهواء الداخل إلى حجرة الاحتراق

P_{air} : ضغط الهواء الداخل إلى حجرة الاحتراق

T_{air} : درجة حرارة الهواء الداخل إلى حجرة الاحتراق

R : ثابت الهواء [4]

$$R = 287 \frac{\text{Joul}}{\text{kg. K}}$$

وبالتالي فإن تدفق الغاز العادم الخارج من حجرة الاحتراق :

$$\dot{m}_{\text{gas}} = \dot{m}_{\text{fuel}} + \dot{m}_{\text{air}} \dots \dots \dots (4 - 2)$$

والجدولان (4-2) و (5-2) يلخصان النتائج :

بالنسبة للعنفة الغازية من نوع (Solar) في معمل توليد الغاز :

الجدول(4-2) : تدفق الهواء، الوقود، غازات العادم لعنفة (Solar).

العنفة	الفصل	ضغط الوقود (bar)	ضغط الهواء (bar)	تدفق الوقود الحجمي ($\frac{m^3}{s}$)	تدفق الهواء الحجمي ($\frac{m^3}{s}$)	تدفق الوقود الكتلي ($\frac{kg}{s}$)	تدفق الهواء الكتلي ($\frac{kg}{s}$)	تدفق العادم الكتلي ($\frac{kg}{s}$)
GT _{solar}	صيفاً	8.3	3.7	0.33	5.28	2.35	14.09	16.44
	شتاءً	8	3.9	0.31	4.96	2.13	15.01	17.14

بالنسبة لكل من العنفات الغازية في محطة توليد الطاقة من نوع (Nuovo Pignone Frame 6):

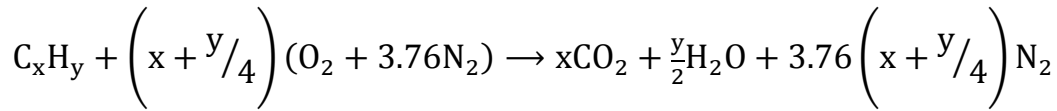
الجدول(5-2) : تدفق الهواء، الوقود، غازات العادم لعنفة (Nuovo Pignone Frame 6)

العنفة	الفصل	ضغط الوقود (bar)	ضغط الهواء (bar)	تدفق الوقود الحجمي ($\frac{m^3}{s}$)	تدفق الهواء الحجمي ($\frac{m^3}{s}$)	تدفق الوقود الكتلي ($\frac{kg}{s}$)	تدفق الهواء الكتلي ($\frac{kg}{s}$)	تدفق العادم الكتلي ($\frac{kg}{s}$)
GT1	صيفاً	14.9	7.4	1.7	27.2	21.71	116.16	137.87
	شتاءً	15	7.8	1.62	25.92	20.83	124.46	145.29
GT3	صيفاً	14.8	7	1.8	28.8	22.84	118.1	140.93
	شتاءً	15.1	7.76	1.66	26.56	21.49	126.65	148.13
GT4	صيفاً	15.1	7.3	1.92	30.72	24.85	129.81	154.66
	شتاءً	15.2	7.77	1.8	28.96	23.45	137.74	161.19
GT5	صيفاً	15.1	7.5	1.52	24.32	19.86	105.16	124.83
	شتاءً	15.4	7.6	1.52	24.32	20.07	117.55	137.62

2-2-3: إيجاد تركيب غازات العادم:

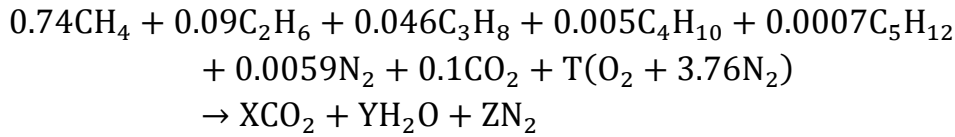
يمكن تعريف تركيب الغاز العادم الناتج وذلك عن طريق كتابة معادلة الاحتراق كما

يلي [3] :



باعتبار أن الهواء يتألف من 21% أكسجين و 79% آزوت (بالنسبة للحجم) وبالتالي فإن كل مول من الأكسجين في الهواء يقابلها $3.76 = \frac{79}{21}$ مول من الآزوت.

يمكن كتابة معادلة الاحتراق $n_1 = 1 \text{ kmole}$ من الوقود :



تحسب كلا من X ، Y ، Z ، T :

• من توازن ذرات الكربون :

$$X = 0.74 \times 1 + 0.09 \times 2 + 0.046 \times 3 + 0.0057 \times 4 + 0.0007 \times 5 + 0.1$$

$$X = 1.37$$

• من توازن ذرات الهيدروجين :

$$2Y = 0.74 \times 4 + 0.09 \times 6 + 0.04 \times 8 + 0.057 \times 10 + 0.0007 \times 12$$

$$2Y = 4.39$$

$$Y = 2.19$$

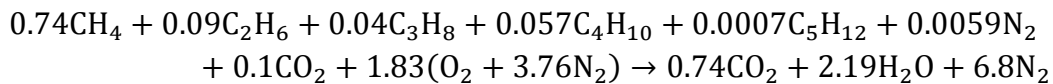
• من توازن ذرات الأكسجين :

$$2T = 0.74 \times 2 + 2.19 \times 1$$

$$T = 1.83$$

$$Z = 3.76 \times 1.83 = 6.5$$

وبالتالي تصبح المعادلة:



عدد كيلومولات الهواء :

$$n_2 = 1.83 \times 4.76 = 8.71$$

وبالتالي نسبة الهواء إلى الوقود النظرية :

$$M_{a_o} = \frac{n_2}{n_1} = \frac{8.71}{1} = 8.71$$

أي أن النواتج الأساسية لعملية الاحتراق في حالة حصول احتراق نظامي وتام هي :

- غاز ثاني أكسيد الكربون
- بخار الماء
- النيتروجين

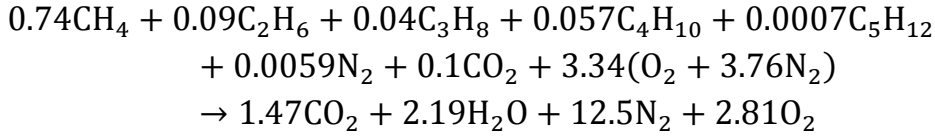
ويضاف إليها أيضاً ثاني أكسيد الكربون والأكسجين الموجودة بالأصل مع الوقود.

معامل فائض الهواء :

$$\lambda = \frac{M_a}{M_{a0}} = \frac{16}{8.71} = 1.83$$

وبالتالي فإن الزيادة في كمية الهواء : 83%

أي معادلة الاحتراق الفعلية :



وبالتالي ينتج من معادلة الاحتراق [3] :

$$r_{\text{N}_2} = 67\%$$

$$r_{\text{CO}_2} = 8\%$$

$$r_{\text{H}_2\text{O}} = 10.7\%$$

$$r_{\text{O}_2} = 14.3\%$$

2-2-4: حساب ضغط غازات العادم الخارجة من العنفة:

إن ضغط غازات الاحتراق الخارجة من العنفة الغازية يكون قريب من الضغط الجوي ولكن لا بد أن يكون أكبر منه بقليل لكي تتمكن هذه الغازات من الخروج إلى الوسط الخارجي دون أن يعود أي جزء منها بشكل عكسي، ويمكن حسابه من خلال المعادلة العامة للغاز المثالي وذلك باعتبار أن غازات الاحتراق ذات ضغط منخفض ودرجة حرارة مرتفعة بالتالي يمكن إعتبارها غاز مثالي [5] :

$$p = \frac{RT}{v} \dots \dots (5 - 2)$$

p : ضغط غازات العادم

v : الحجم النوعي لغازات العادم

R : ثابت الغازات العام

T : درجة حرارة غازات العادم الخارجة من العنفة

تحتسب p ، v هنا عند أخفض درجة حرارة لغازات العادم وهي :

للعنفة الأولى (GT_{Solar}) وهي درجة الحرارة التصميمية (أخفض درجة حرارة لغازات العادم) وتقدر

$$t = 345^{\circ}\text{C}$$

$$T = 273 + 345 = 618 \text{ K}^{\circ}$$

للعنفة الأولى (GT_1) وهي درجة الحرارة التصميمية (أخفض درجة حرارة لغازات العادم) وتقدر

$$t = 450^{\circ}\text{C}$$

$$T = 273 + 450 = 723 \text{ K}^{\circ}$$

يمكن حساب الحجم النوعي لغازات الاحتراق :

$$v = \frac{1}{\rho_g} \dots \dots \dots (6 - 2)$$

إن كثافة العناصر المكونة لغازات العادم عند درجة حرارة الخروج من العنفة وضغط قريب من الضغط

الجوي [6]

بالنسبة للعنفة الأولى (GT_{Solar}) :

$$\rho_{N_2} = 0.552 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$\rho_{CO_2} = 0.855 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$\rho_{H_2O} = 0.356 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$\rho_{O_2} = 0.633 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

وبالتالي فإن كثافة غازات العادم عند الدخول هي مجموع كثافات العناصر المكونة لغازات الاحتراق

مضروبة بنسبتها الحجمية :

$$\rho_g = \sum r_k \times \rho_k \dots \dots \dots (7 - 2)$$

$$\rho_g = 0.67 \times 0.552 + 0.08 \times 0.855 + 0.107 \times 0.356 + 0.143 \times 0.633$$

$$= 0.567 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

وبالتالي فإن الحجم النوعي :

$$v = \frac{1}{\rho_g} = \frac{1}{0.567} = 1.76 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$$

أما بالنسبة للعنفة الأولى (GT₁) :

$$\rho_{\text{CO}_2} = 0.728 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$\rho_{\text{N}_2} = 0.476 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$\rho_{\text{H}_2\text{O}} = 0.305 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$\rho_{\text{O}_2} = 0.541 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

وبالتالي فإن كثافة غازات العادم عند الدخول هي مجموع كثافات العناصر المكونة لغازات الاحتراق مضروبة بنسبتها الحجمية :

$$\rho_g = \sum r_k \times \rho_k \dots \dots \dots (7 - 2)$$

$$\begin{aligned} \rho_g &= 0.67 \times 0.476 + 0.08 \times 0.728 + 0.107 \times 0.305 + 0.143 \times 0.541 \\ &= 0.487 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \end{aligned}$$

وبالتالي فإن الحجم النوعي :

$$v = \frac{1}{\rho_g} = \frac{1}{0.487} = 2.053 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$$

يحسب ثابت الغازات العام :

$$R = R_{\text{N}_2} r_{\text{N}_2} + R_{\text{CO}_2} r_{\text{CO}_2} + R_{\text{H}_2\text{O}} r_{\text{H}_2\text{O}} + R_{\text{O}_2} r_{\text{O}_2} \dots \dots \dots (8 - 2)$$

إن ثابت الغازات لكل عنصر من عناصر غازات الاحتراق [4] :

$$R_{\text{N}_2} = 0.297 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}^\circ}$$

$$R_{\text{H}_2\text{O}} = 0.462 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}^\circ}$$

$$R_{\text{CO}_2} = 0.189 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}^\circ}$$

$$R_{\text{O}_2} = 0.260 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}^\circ}$$

$$R = 0.297 \times 0.68 + 0.189 \times 0.08 + 0.462 \times 0.11 + 0.260 \times 0.15$$

$$= 0.3 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}^\circ}$$

وبالتالي ضغط غازات الاحتراق :

بالنسبة للعنفة الأولى (GT_{Solar}) :

$$p = \frac{0.3 \times 1000 \times 618}{1.76} = 105340.91 \frac{\text{N}}{\text{m}^2} = 1.053 \text{ bar}$$

أما بالنسبة للعنفة الأولى (GT_1) :

$$p = \frac{0.3 \times 1000 \times 723}{2.053} = 105650.27 \frac{\text{N}}{\text{m}^2} = 1.057 \text{ bar}$$

2-2-5: حساب كمية الحرارة المتوفرة في غازات العادم:

إن كمية الحرارة المتوفرة المطروحة يمكن حسابها من خلال المعادلة التالية :

$$Q = \dot{m}_g (h_1 - h_2) \dots \dots \dots (9 - 2)$$

$\dot{Q}$: كمية الحرارة التي يمكن استرجاعها من غازات العادم.

$\dot{m}$: التدفق الكتلي لغازات العادم.

بالنسبة للعنفة الأولى (GT_{Solar}) :

$$\dot{m}_g = \dot{m}_{fuel} + \dot{m}_{air} = 17.14 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

أما بالنسبة للعنفة الأولى (GT_1) :

$$\dot{m}_g = \dot{m}_{fuel} + \dot{m}_{air} = 145.29 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

h_1 : إنتالبي الدخول لغازات العادم.

h_2 : إنتالبي الخروج لغازات العادم.

إن المعادلة المستخدمة لحساب كمية الحرارة الممكن استرجاعها من غازات العادم يمكن كتابتها بالشكل :

$$Q = \dot{m}_g C_g (t_1 - t_2) \dots \dots \dots (10 - 2)$$

C_g : السعة الحرارية لغازات العادم عند ضغط ثابت وبما أن الآزوت N_2 والذي يشكل حوالي 68%

من حجم غازات العادم فإننا نعتبر أن السعة الحرارية لغازات العادم تساوي السعة الحرارية للأزوت عند

ضغط ثابت [7].

T_1 : درجة حرارة غازات العادم الخارجة من العنفة الغازية

T_2 : أخفض درجة حرارة يمكن تبريد غازات العادم إليها

يمكن أن نخفض درجة حرارة غازات العادم ولكن الأمر الذي يحدد التخفيض هو درجة الحرارة التي تبدأ عندها الأحماض في غازات العادم بالتكاثف. إن غازات العادم الناتج من احتراق الغاز الطبيعي تكون درجة حرارة تكوين الأحماض لديها أخفض من أنواع الوقود الأخرى وهذا يسمح بزيادة فعالية عملية الاسترجاع. لتحديد درجة حرارة نقطة الندى لغازات العادم المتكونة يجب معرفة الضغط الجزئي لبخار الماء P_v . يوجد الضغط الجزئي من العلاقة :

$$P_v = y_v \times P \dots \dots (11 - 2)$$

y_v : الجزء المولي من بخار الماء في نواتج الاحتراق

$$y_v = \frac{n_{H_2O}}{n_{N_2} + n_{O_2} + n_{H_2O} + n_{CO_2}} = \frac{2.19}{18.97} = 0.115$$

P : ضغط غازات الاحتراق الخارجة من العنفة الغازية

وبالتالي :

بالنسبة للعنفة الأولى (GT_{Solar}) :

$$P_v = 0.115 \times 1.053 = 0.121 \text{ bar}$$

أما بالنسبة للعنفة الأولى (GT_1) :

$$P_v = 0.115 \times 1.057 = 0.122 \text{ bar}$$

وبالتالي فإن درجة حرارة نقطة الندى لغازات الاحتراق المدروسة [4]:

$$t_w = 49.42 \text{ } ^\circ\text{C}$$

بسبب ضياعات الحرارة بالانتقال على طول المدخنة (يقدر طول المدخنة 20 m) والتي تسبب تدرج في درجة الحرارة حوالي 0.36 – 6.56 درجة لكل متر، لذلك فإنه يمكن حساب الحد الأصغري لدرجات حرارة الغاز العادم بعد الأخذ بعين الاعتبار أن انخفاض درجة الحرارة حوالي 0.36 درجة لكل متر طولي [7] :

$$t_2 = t_w + (20 \times 0.36) = 49.42 + 7.2 = 56.62 \text{ } ^\circ\text{C}$$

تحسب السعة الحرارية للآزوت :

بالنسبة للعنفة الأولى (GT_{Solar}) :

في مجال درجات الحرارة $[345 - 56.62 \text{ }^{\circ}\text{C}]$ وذلك بالأخذ بعين الاعتبار أن علاقة السعة الحرارية بدرجة الحرارة خطية وذلك من خلال العلاقة التالية [5]

$$C_p = a + \frac{b}{2}(t_1 + t_2) \dots \dots \dots (12 - 2)$$

وبالنسبة للآزوت :

$$C_p = 1.024 + 0.00008855(t_1 + t_2)$$

حيث أن :

$$t_1 = 345^{\circ}\text{C}$$

$$t_2 = 56.62 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$C_p = 1.024 + 0.00008855(345 + 56.62) = 1.059 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$$

وبالتالي فإن الاستطاعة الحرارية المتاحة:

$$Q = \dot{m}_g C_p(t_1 - t_2) = 17.14 \times 1.059 \times (345 - 56.62) = 5234.46 \text{ KW}$$

$$Q = 5.23 \text{ MW}$$

أما بالنسبة للعنفة الأولى (GT_1) :

في مجال درجات الحرارة $[450 - 56.62 \text{ }^{\circ}\text{C}]$ وذلك بالأخذ بعين الاعتبار أن علاقة السعة الحرارية بدرجة الحرارة خطية وذلك من خلال العلاقة التالية [5]

$$C_p = a + \frac{b}{2}(t_1 + t_2) \dots \dots \dots (12 - 2)$$

وبالنسبة للآزوت :

$$C_p = 1.024 + 0.00008855(t_1 + t_2)$$

حيث أن :

$$t_1 = 450^{\circ}\text{C}$$

$$t_2 = 56.62 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$C_p = 1.024 + 0.00008855(450 + 56.62) = 1.069 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$$

وبالتالي فإن الاستطاعة الحرارية المتاحة:

$$Q = \dot{m}_g C_p(t_1 - t_2) = 145.29 \times 1.069 \times (450 - 56.62) = 61097.82 \text{ KW}$$

$$Q = 61.1 \text{ MW}$$

2-2-6: العوامل المؤثرة في درجة حرارة غازات العادم:

تتعلق درجة حرارة غازات العادم بعوامل عديدة وهي :

1. الاستطاعة المطلوبة من العنف :

حيث لوحظ أنه بزيادة استطاعة العنف سوف تزداد درجة حرارة غازات العادم وذلك لأن زيادة الاستطاعة يتطلب صرف كمية أكبر من شحنة الاحتراق المؤلفة من الهواء والوقود وبالتالي ترتفع درجة حرارة الغاز العادم.

2. درجة حرارة الهواء الداخل إلى الضاغط :

حيث إن دخول الهواء بدرجة حرارة مرتفعة يؤدي إلى زيادة العمل الذي يستهلكه الضاغط وبالنتيجة نحتاج إلى صرف كمية أكبر من الوقود من أجل الوصول بالهواء إلى قيمة الضغط المطلوبة، وكذلك فإن ارتفاع درجة حرارة الهواء الداخل إلى الضاغط يؤدي إلى ارتفاع درجة حرارته في نهاية عملية الانضغاط وبالتالي ارتفاع درجة حرارة غازات العادم الخارجة من العنف.

3. الحالة الفنية للعنف :

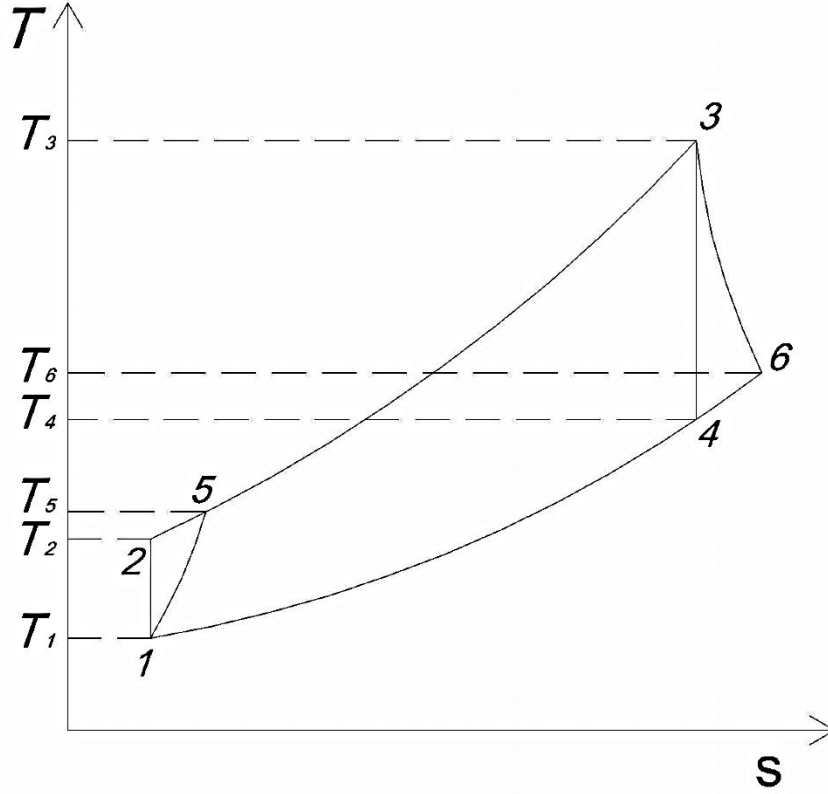
حيث نلاحظ أنه عندما تكون العنف قد عملت لساعات عمل طويلة فإن درجة حرارة غازات العادم تكون مرتفعة على الرغم من أن الحمل المطلوب من العنف غير مرتفع وذلك بسبب زيادة الضياعات اللاحقة التي تستدعي صرف كمية أكبر من الوقود من أجل التغلب عليها والحصول على الاستطاعة المطلوبة.

4. الشروط المناخية :

حيث يتم تحديد الحمل الأعظمي الذي يجب ألا تتجاوزه العنف صيفا بـ 28 MW وشتاء بـ 32 MW حيث أن تجاوز هذه القيم من الأحمال يؤدي إلى وصول درجة حرارة الغاز العادم إلى قيم عالية وبالتالي تعمل العنف على التوقف بشكل تلقائي حيث لايسمح بالوصول إلى درجة الحرارة هذه وذلك لاعتبارات تتعلق بالعمر الفني للعنف [3].

3-2: حساب مردود العنفة الغازية:

يجب عند دراسة الدورة الحرارية الفعلية في عنفة غازية، الأخذ بعين الاعتبار جميع عيوب الأجزاء المختلفة للآلة، وفي الحقيقة فإننا سندخل لدى دراستنا لهذه الدارة مردودي الضاغط والعنفة، حيث يمثلان أهم باراميترين في هذه الدارة.



الشكل (2-2) : مقارنة الدورات المثالية و الحقيقية لعنفة غازية

يمثل الشكل (2-2) دورة جول المثالية (1-4-3-2-1) والدورة الحقيقية (1-6-3-5-1) وذلك عند القيم نفسها لـ P1 و P2 و T1 و T3 في كل من الحالتين، حيث تعطى درجات الحرارة T5 و T6 التي تطابق نهاية الانضغاط والتمدد الحقيقي بالعلاقات التالية :

$$T_5 - T_1 = \frac{T_2 - T_1}{\eta_c} = \frac{T_1(Z - 1)}{\eta_c} \dots \dots \dots (13 - 2)$$

ولدينا أيضاً :

$$T_3 - T_6 = \eta_t(T_3 - T_4) = \eta_t T_3 \left(1 - \frac{1}{Z} \right) \dots \dots \dots (14 - 2)$$

وبالتالي تصبح علاقة العمل المفيد W_u الناتج من (1KG) من الغاز :

$$W_u = C_p \eta_t T_3 \left(1 - \frac{1}{Z} \right) - \frac{C_p}{\eta_c} T_1 (Z - 1) \dots \dots \dots (15 - 2)$$

وأيضاً :

$$W_u = C_p (Z - 1) \left[\frac{\eta_t T_3}{Z} - \frac{T_1}{\eta_c} \right] \dots \dots \dots (16 - 2)$$

ومن جهة ثانية، فإن كمية الحرارة (Q) والتي يجب صرفها لرفع درجة الحرارة ل (1 kg) من الهواء من (T_5) حتى (T_3) والتي تعطى بالعلاقة :

$$Q = C_p(T_3 - T_5) = C_p \left[T_3 - T_1 \left(1 + \frac{Z - 1}{\eta_c} \right) \right] \dots \dots \dots (17 - 2)$$

لتبسيط العلاقات، ندخل المؤشرات التالية :

$$\sigma = \eta_c \left[\frac{T_3}{T_1} - 1 \right] \dots \dots \dots (18 - 2)$$

$$\tau = \eta_c \eta_t \frac{T_3}{T_1} \dots \dots \dots (19 - 2)$$

$$Z = \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} \dots \dots \dots (20 - 2)$$

وهكذا نجد أن علاقة المردود الحراري للدورة الفعلية يعطى بالعلاقة التالية :

$$\eta_{th} = \frac{W_u}{Q} = \left(1 - \frac{1}{Z} \right) \frac{\tau - Z}{\sigma - Z + 1} \dots \dots \dots (21 - 2)$$

وهكذا نلاحظ أنه يمكن الحصول على مردود الدورة الحقيقية بجداء المردود المثالي بكسر لا يعتمد فقط على (η_c) و (η_t)، ولكن أيضاً على النسبة $\left(\frac{T_3}{T_1} \right)$ ، وذلك مهما بلغت قيمة هذه النسبة فإنه إذا كان :

$$\eta_c = \eta_t = 1$$

وهذه الحالة تطابق حالة الدورة المثالية، فإن هذا الكسر يساوي إلى الواحد.

توضح علاقة المردود الحراري للدورة الفعلية أن مردود العنفة (η_t) لا يؤثر إلا في صورة علاقة المردود (η_{th})، بينما يظهر مردود الضاغط (η_c) في بسط و مقام الكسر، أي ان عيوب الضاغط تؤثر بشكل أقل على مردود الدورة من تأثير العنفة.

يفسر هذا الفرق بالحقيقة التالية :

فمن جهة أولى عمل الضاغط (W_c) أقل من عمل العنفة (W_t)، ومن جهة ثانية فإن عيوب الضاغط التي تزيد العمل اللازم لتشغيله تؤثر أيضاً على زيادة درجة حرارة الهواء في نهاية الانضغاط ($T_5 > T_2$)، أي أن ظاهرة عدم العكسية خلال الانضغاط تساعد في تقليل كمية الحرارة الواجب تزويدها من الوقود، بينما لا تشكل عدم الانعكاسية خلال التمدد وضعاً مقابلاً للانضغاط [4] .

وبالتالي نحسب المردود الحراري للعنفات المختارة وهي العنفة الأولى شتاءً لكل منهما:

أولاً : نحسب المردود الداخلي النسبي للضاغط :

$$\eta_c = \frac{T_2 - T_1}{T_5 - T_1} \dots \dots \dots (22 - 2)$$

بالنسبة لضاغط العنفة الأولى (GT_{Solar}) :

$$\eta_c = \frac{152 - 15}{176 - 15} = 0.85$$

أما بالنسبة لضاغط العنفة الأولى (GT_1) :

$$\eta_c = \frac{249 - 17}{293 - 17} = 0.84$$

والآن نحسب المردود الداخلي النسبي للعنفة الغازية :

$$\eta_t = \frac{T_3 - T_6}{T_3 - T_4} \dots \dots \dots (23 - 2)$$

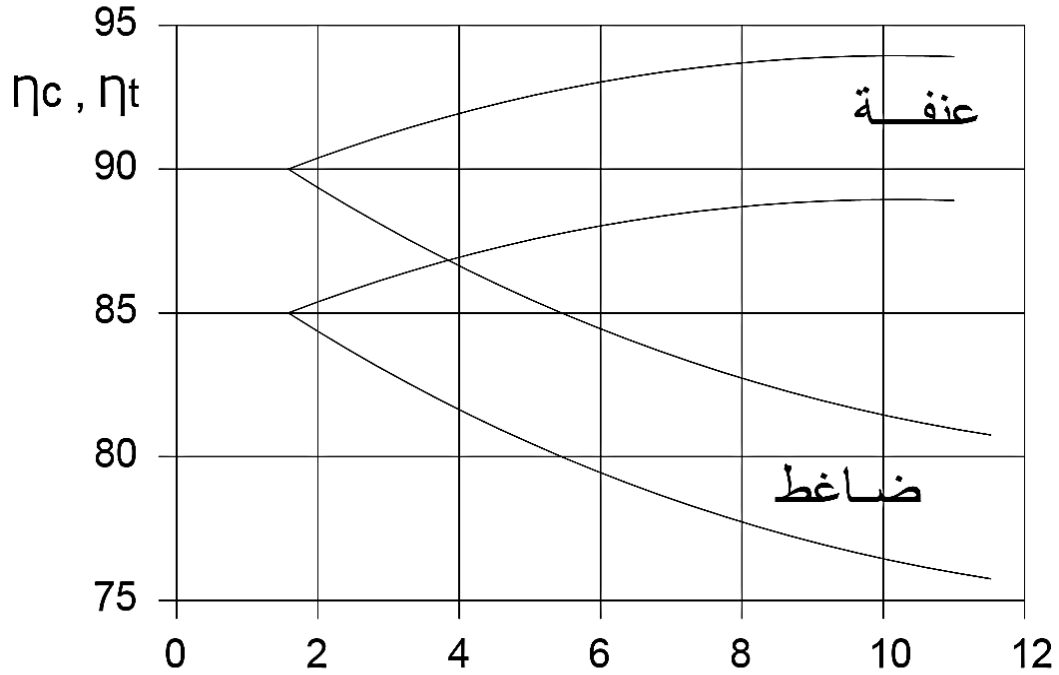
بالنسبة للعنفة الأولى (GT_{Solar}) :

$$\eta_t = \frac{562 - 345}{562 - 312} = 0.87$$

أما بالنسبة للعنفة الأولى (GT_1) :

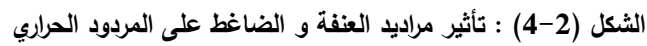
$$\eta_t = \frac{859 - 450}{859 - 389} = 0.87$$

نلاحظ هنا بالنسبة للضاغط بزيادة نسبة الانضغاط ينخفض المردود الإيزوإنتروبي له وبالعكس بالنسبة للعنفة كما هو واضح بالشكل (3-2): [1]



الشكل (3-2) : علاقة نسبة الانضغاط مع المردود الإيزوإنتروبي

حيث يتأثر المردود الحراري بشكل كبير بكل من مردودي الضاغط والعنفة، فمردود المنشأة حساس جداً لتغيرات هذين المردودين، ومن جهة أخرى تعتبر أجزاء العنفة الأكثر تأثراً على مردود المنشأة من مردود الضاغط، ويكمن سبب ذلك في كون عمل العنفة أصلاً أشد تأثراً من عمل الضاغط وهذا ما يفسر اتجاه الأبحاث الحديثة باتجاه تحديث العنفة نفسها.



بالنسبة للعنفة الأولى (GT_{Solar}) :

$$Z = (3.9)^{\frac{1.4-1}{0.4}} = 1.48$$

بالتالي يكون المردود الحراري للعنفة المختارة بدون مسترجع :

$$\eta_{th} = \frac{W_u}{Q} = \left(1 - \frac{1}{1.48} \right) \frac{2.2 - 1.48}{1.614 - 1.48 + 1} = 20.6 \%$$

أما بالنسبة للعنفة الأولى (GT_1) :

$$\sigma = 0.84 \left[\frac{1132}{290} - 1 \right] = 2.44$$

$$\tau = 0.84 \times 0.87 \times \frac{1132}{290} = 2.85$$

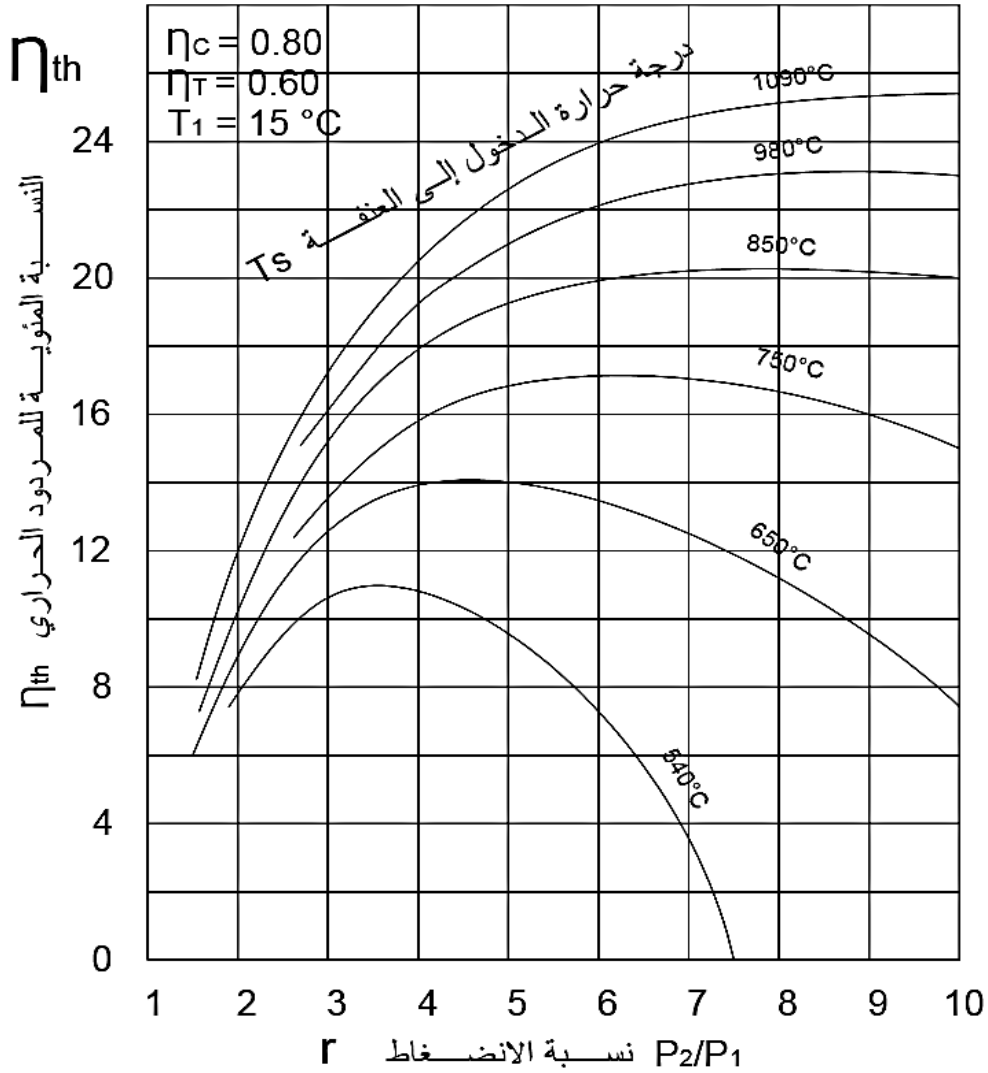
$$Z = (7.8)^{\frac{1.4-1}{0.4}} = 1.8$$

بالتالي يكون المردود الحراري للعنفة المختارة بدون مسترجع :

$$\eta_{th} = \frac{W_u}{Q} = \left(1 - \frac{1}{1.8} \right) \frac{2.85 - 1.8}{2.44 - 1.8 + 1} = 28.2 \%$$

نلاحظ أنه بزيادة درجة الحرارة عند مدخل العنفة T3 يزداد المردود الحراري في حالة ثبات بقية العوامل، إلا أن هذه الزيادة تكون أكبر عند درجات الحرارة الأدنى وتقل حداثها كلما ارتفعت درجة الحرارة.

كما نلاحظ أنه يوجد لكل درجة حرارة T3 نسبة ضغط مثلى تحقق المردود الأعظمي، فعند درجات الحرارة الأدنى تزداد قيمة المردود بزيادة نسبة الضغط ثم لا تلبث وأن تتناقص عند الاستمرار بزيادة نسبة الانضغاط، وعند درجات الحرارة الأعلى تصبح قيم نسبة الضغط التي تعطي مردوداً أعظمياً أكبر ويصبح المنحني أكثر انبساطاً مما يؤمن إمكانية تغير نسبة الضغط في مجال واسع دون أن يؤثر ذلك بشكل كبير على المردود.



الشكل (2-5) : علاقة المردود الحراري بنسبة الضغط عند قيم مختلفة لـ (T_3)

ويجب أن نشير هنا إلى أن رفع درجة الحرارة T_3 بشكل كبير يتعلق بنظام التبريد والمواد التي تصنع منها الشفرات.

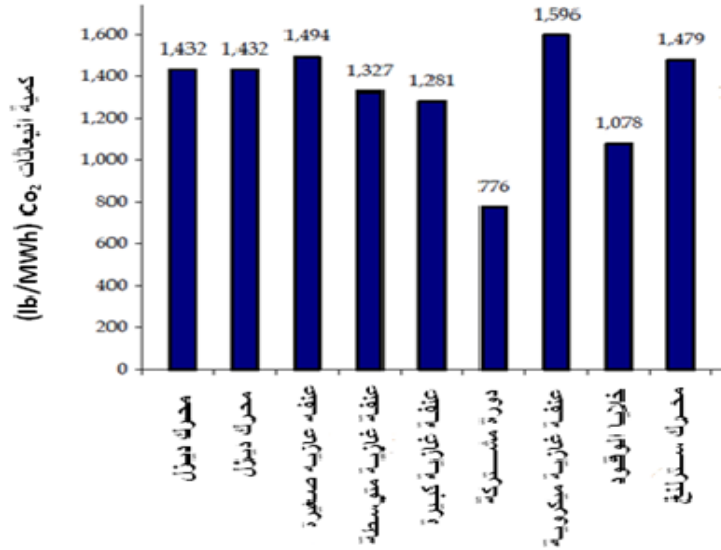
كما أن المردود يتأثر بدرجة حرارة الوسط الخارجي T_1 ، ومن الواضح أن درجات الحرارة الأدنى تعطي مردوداً أعلى كما أن القيم المثالية لنسبة الضغط تقع في مجال أوسع عند درجات الحرارة المنخفضة منه عند درجات الحرارة الأعلى، ويمكن تفسير ذلك بأنه في حال كون T_1 أقل يكون العمل اللازم لتشغيل الضاغط أقل وبالتالي الاستطاعة اللازمة لتشغيل الضاغط أقل وهذا ما يجعل العمل المفيد الناجم عن المحطة أعلى كما ينعكس بشكل إيجابي على المردود وهذا ما يجعل عمل العنفات الغازية في الشتاء أفضل منه في الصيف أوفي المرتفعات أفضل منه في السهول المنخفضة [1] .

2-4: الأثر البيئي الناجم عن توليد الطاقة باستخدام العنفة الغازية:

تعتبر غازات العادم الناتجة من العنفة الغازية من الملوثات البيئية وذلك لاحتوائها على ملوثات منها:

1. غاز ثاني أكسيد الكربون (CO₂) :

أثبتت الدراسات أن غاز ثاني أكسيد الكربون هو المسؤول الرئيس عن (64%) من ظاهرة الاحتباس الحراري، حيث تتميز غازات الاحتباس الحراري كافة بخاصية امتصاص الأشعة تحت الحمراء وبذلك تعمل عمل البيت الزجاجي، حيث تسمح للطاقة الشمسية (الضوء المرئي) بالوصول إلى سطح الأرض وتقوم بامتصاص الأشعة الحرارية طويلة الموجة (الأشعة تحت الحمراء) الصادرة عن سطح الأرض وبذلك تبقى هذه الأشعة حبيسة جو الأرض وبذلك فإن الازدياد في تركيز غازات الاحتباس الحراري يؤدي إلى زيادة امتصاص الأشعة الحرارية المنعكسة عن سطح الأرض وبذلك تسبب في زيادة درجة حرارة الأرض، ويبين الشكل (2-6) نسبة إصدار العنفة الغازية لغاز ثاني أكسيد الكربون بالمقارنة مع بعض المحركات الحرارية الأخرى.



الشكل (2-6) : انبعاثات غاز ثاني أكسيد الكربون لعدة أنواع من المحركات الحرارية

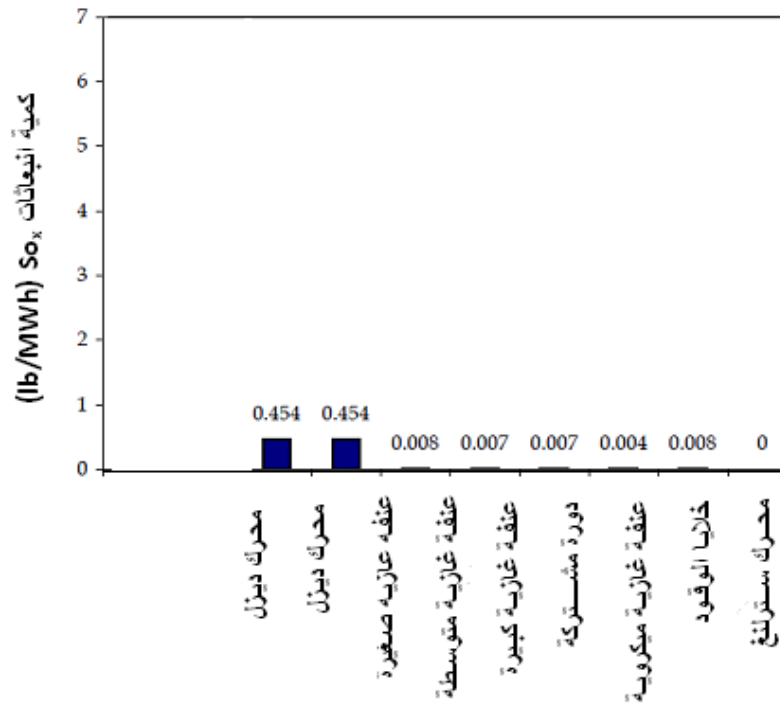
2. أول أكسيد الكربون (CO) :

يعتبر أول أكسيد الكربون من الملوثات الخطيرة وذلك بسبب قدرته على التفاعل مع الأكسجين الجوي وبالتالي فإنه يؤدي إلى تخفيض نسبة الأكسجين في الهواء ، وينتج أول أكسيد الكربون من عمليات

أخطاء في عملية الاحتراق.

3. أكاسيد الكبريت (SOX) :

غاز عادم العنفات الغازية.



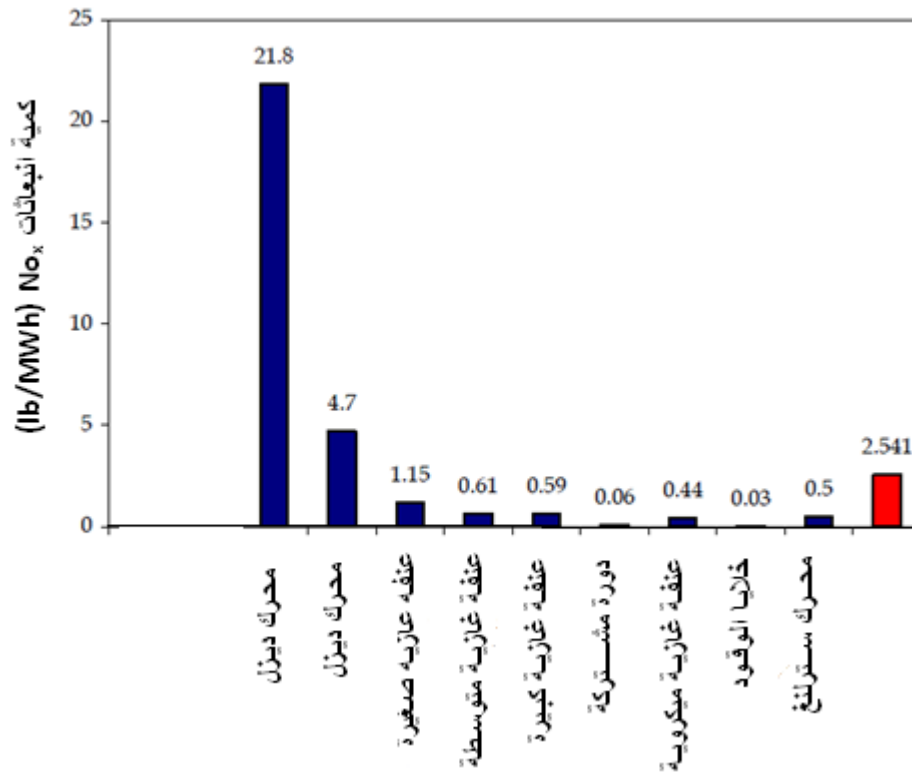
الشكل (2-7) : انبعاثات أكاسيد الكبريت لعدة أنواع من المحركات الحرارية

ملحوظ بالمقارنة مع محركات الديزل.

4. أكاسيد الآزوت (NOX):

تنتج أكاسيد الآزوت من بقاء الغازات فترة طويلة عند درجة حرارة مرتفعة مما يسمح بتشكيل أكاسيد الآزوت، وأكاسيد الآزوت كما هو الحال بالنسبة لأكاسيد الكبريت تؤدي إلى تشكيل أمطار حمضية ويبين

الشكل (8-2) نسبة أكاسيد الآزوت المنطلقة مع غاز عادم العنفة الغازية ومقارنتها مع أنواع أخرى من المحركات الحرارية.



الشكل (8-2) : انبعاثات أكاسيد الآزوت لعدة أنواع من المحركات الحرارية

ومع ذلك تعتبر غازات عادم العنفات الغازية من أنظف الغازات العادمة في الصناعة وذلك بسبب سهولة التحكم بمكونات ودرجة حرارة الغاز العادم بعدة طرق منها حقن الماء في غازات العادم أو تغيير قيمة معامل فائض الهواء.

الفصل الثالث

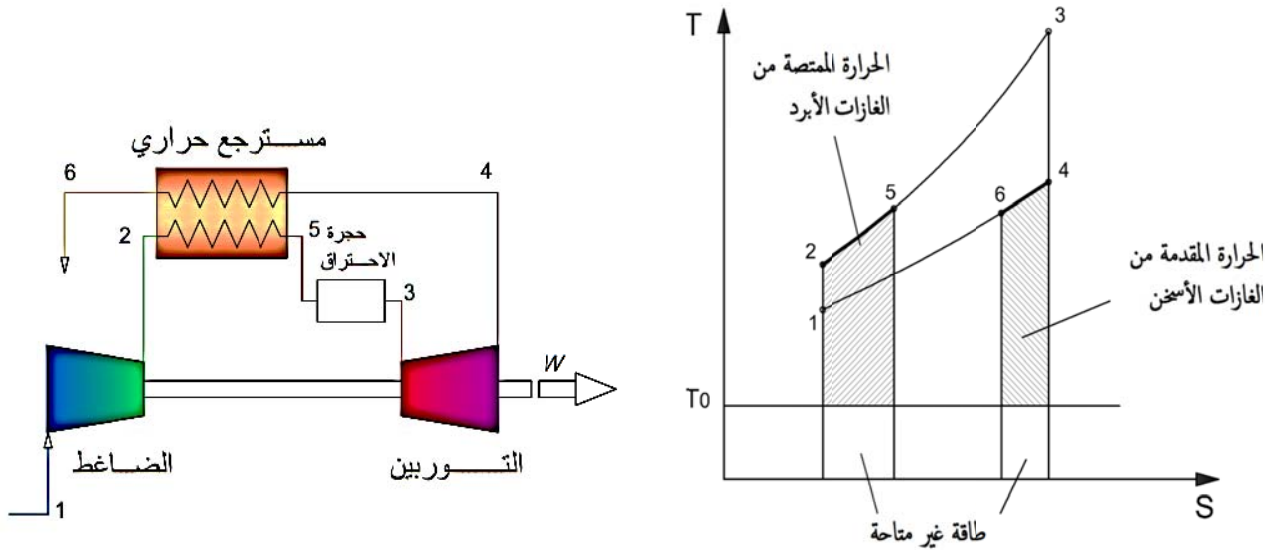
دراسة نظرية عن الاسترجاع الحراري المستخدم في منشآت العتقات الغازية

1-3: استرجاع الحرارة في العنفات الغازية:

في الدورة البسيطة للعنفة الغازية تكون درجة حرارة خروج الغازات من العنفة أعلى من درجة حرارة الهواء الخارج من الضاغط والداخل إلى حجرة الاحتراق، وبالتالي يمكن تقليل كمية الوقود المزودة بتركيب مبادل حراري يستخدم الغازات العادمة المنطلقة من العنفة لتقوم بتسخين أولي للهواء بين الضاغط وحجرة الاحتراق، يدعى هذا المبادل الحراري بالمسترجع، وفي الحالة المثالية يتم الجريان عبر المسترجع تحت ضغط ثابت.

يبين الشكل (1-3) دورة هواء قياسية لاسترجاع الحرارة، وبفرض أن التغير بالطاقة الحركية مهمل وليس هناك ضياع حراري مع المحيط يتبين لنا أن :

$$h_5 - h_2 = h_4 - h_6 \dots \dots (1 - 3)$$



الشكل (1-3) : دورة استرجاع الحرارة في عنفة غازية

بما أن : $q_{2-5} = -q_{4-6}$ فإن المساحتين المئشتتين على الشكل (1-3) متساويتين بالقيمة، ونلاحظ أنه بالنسبة لهذا الجريان المستقر اللاعكوسي أن :

$$S_5 - S_2 + S_6 - S_4 > 0$$

أو:

$$[\Delta S_{2-5}] > [\Delta S_{4-6}]$$

وهكذا فإن اللاعكوسية لعملية الاسترجاع هي :

$$i = T_0 (S_5 - S_2 + S_6 - S_4) \dots \dots (2 - 3)$$

حيث :

T_0 : مبدأ قياس درجة الحرارة .

وبالتالي فإنه للوصول إلى مردود حراري أعظمي من دورة الاسترجاع الحراري، يجب أن تكون درجة الحرارة (T_5) المبينة بالشكل (3-1) عالية قدر الإمكان، وقيمتها الحدية هي (T_4)، كما أن امتداد اقتراب (T_5) من (T_4) يعبر عنه بمردود الاسترجاع والذي يعرف كما يلي :

$$\varepsilon = \frac{h_5 - h_2}{h_4 - h_2} \dots \dots \dots (3 - 3)$$

إن زيادة فعالية المسترجع الحراري يستدعي سطح انتقال أكبر للحرارة، مما يزيد كلاً من الكلفة والحيز المتاح، وهكذا نجد أن استخدام مسترجعات حرارية بفعالية عالية جداً لا يمكن تبريره اقتصادياً لأن الكلفة الثابتة (أي الكلفة التي هي مستقلة إلى حد كبير عن ناتج المنشأة، كالاهلاك، الفائدة، الضريبة، التأمين والصيانة) تزيد عن كلفة الوقود المقتصدة والناتجة من زيادة المردود الحراري للمنشأة.

إن القرار باستخدام مسترجع حراري في منشأة عنفة غازية يكون صائباً إذا كانت العوامل الأخرى غير زيادة المردود الحراري ستلعب دوراً كبيراً، ففي العنفات الغازية لأغراض الطيران لا يستخدم الاسترجاع الحراري لأن المسترجع سيزيد من المساحة المعرضة للطائرة مما يزيد من قوة الدفع اللازمة للطيران [4] .

3-1-1: فعالية المسترجع الحراري:

ضمن الشروط التي اعتبرت سابقاً لتبسيط دراسة العنفات الغازية ونخص بالذكر (تطابق الخواص الفيزيائية للغازات التي تعبر الضاغط والعنفة، تساوي التصرف الكتلي لهذه الغازات، ثبوت الحرارة النوعية لوحدة الكتلة)، فإنه يمكن اعتبار أن درجة حرارة الغاز المضغوط عند خروجه من المسترجع (T_5) تصل تقريباً إلى قيمة درجة حرارة الغاز المتمدّد عند دخوله إلى المسترجع (T_4).

في هذه الحالة الحدية (التي تطابق سطحاً لا نهائياً للتبادل الحراري)، فإن فعالية المسترجع تساوي إلى الواحد، وبصورة عامة، تعرف فعالية المبادل الحراري كما سبق :

$$\varepsilon = \frac{h_5 - h_2}{h_4 - h_2} = \frac{T_5 - T_2}{T_4 - T_2} \dots \dots \dots (4 - 3)$$

وهذه القيمة إذن، هي نسبة ارتفاع درجة حرارة المائع المسخن إلى ذلك الارتفاع الذي يمكن تحقيقه في مبادل حراري سطح تبادله الحراري لا نهائي.

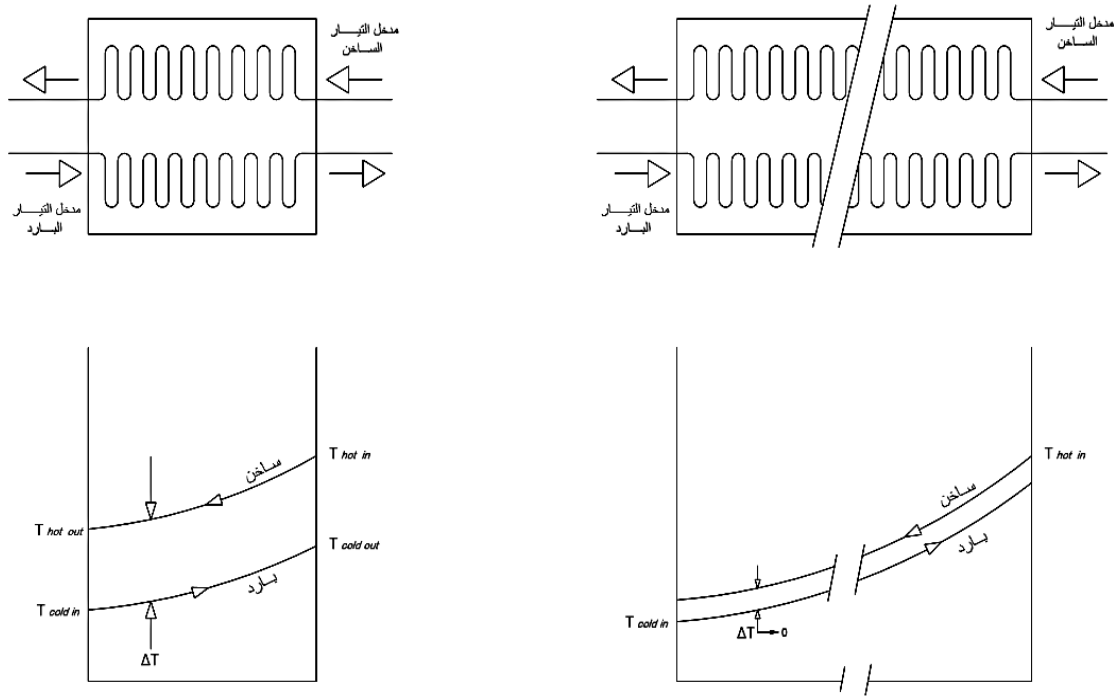
تكافئ المعادلة أعلاه العلاقة التالية :

$$\varepsilon = \frac{T_4 - T_6}{T_4 - T_2} \dots \dots \dots (5 - 3)$$

بحيث أن معرفة (ε) يسمح بإيجاد درجة الحرارة (T_6).

من جهة أخرى، إذا أخذنا بعين الاعتبار تغير الحرارة النوعية لواحدة كتلة الغاز مع درجة الحرارة، فإنه يجب تحديد فعالية المسترجع (ε) إذا كانت منسوبة إلى التغير في درجة الحرارة أو الإنثالبي، لأن قيمتها العددية ليست نفسها للحالتين.

باعتبار مائعين يعبران مسترجع حراري ذو جريان متعاكس كما يبين الشكل (2-3)، وبفرض أن المائع الساخن (1) يسلم الحرارة إلى المائع البارد (2) أي $T_{i1} > T_{i2}$



الشكل (2-3) : توزيع درجات الحرارة في مبادل حراري ذو جريان متعاكس

تتميز سعة التبادل الحراري بالفرق $T_{i1} - T_{i2}$ تؤخذ السعتين الحراريتين بالاعتبار :

$$m_1 C_{p1} (T_{i1} - T_{i2}) \quad \& \quad m_2 C_{p2} (T_{i1} - T_{i2})$$

في الحالة الأعظمية (مبادل حراري ذو جريان متعاكس و سطح التبادل لا نهائي) إذن كمية الحرارة المتبادلة لا يمكن أن تكون إلا الأصغر من هاتين القيمتين، بفرض أن الكمية الأصغرية هي $m_1 C_{p1} (T_{i1} - T_{i2})$ ، وبذلك فإن كمية الحرارة الفعلية المتبادلة هي :

$$m_1 C_{p1} (T_{i1} - T_{01}) = m_2 C_{p2} (T_{02} - T_{i2}) \dots \dots \dots (6 - 3)$$

حيث :

T_{i1} : درجة حرارة دخول المائع الساخن إلى المسترجع .

T_{i2} : درجة حرارة دخول المائع البارد إلى المسترجع .

T_{01} : درجة حرارة خروج المائع الساخن من المسترجع .

T_{02} : درجة حرارة خروج المائع البارد من المسترجع .

فعالية المبادل هي النسبة بين كمية الحرارة المتبادلة فعلياً إلى كمية الحرارة الأعظمية التي يمكن تبادلها أي:

$$\varepsilon = \frac{m_1 C_{p1} (T_{i1} - T_{01})}{m_1 C_{p1} (T_{i1} - T_{i2})} = \frac{m_2 C_{p2} (T_{02} - T_{i2})}{m_1 C_{p1} (T_{i1} - T_{i2})} \dots \dots \dots (7 - 3)$$

$$\varepsilon = \frac{(T_{i1} - T_{01})}{(T_{i1} - T_{i2})} = \frac{m_2 C_{p2} (T_{02} - T_{i2})}{m_1 C_{p1} (T_{i1} - T_{i2})} \dots \dots \dots (8 - 3)$$

في الحالة التي فيها $\varepsilon = 1$ فإن $T_{01} = T_{i2}$

ولكن إذا كان $m_2 C_{p2} > m_1 C_{p1}$ فإن $T_{02} < T_{i2}$

في الحالة التي فيها $m_2 C_{p2} \approx m_1 C_{p1}$ (كما هو الحال تقريباً في مسترجع العنفة الغازية لأن :

$m_1 = m_2$ و C_{p2} أكبر بقليل من C_{p1})، يمكن تعريف الفعالية كالتالي :

$$\varepsilon = \frac{(T_{i1} - T_{01})}{(T_{i1} - T_{i2})} = \frac{(T_{02} - T_{i2})}{(T_{i1} - T_{i2})} \dots \dots \dots (9 - 3)$$

ومن أجل $\varepsilon = 1$ لدينا :

$$T_{01} = T_{i2}$$

$$T_{02} = T_{i1}$$

يمثل استرجاع حرارة غازات العادم اختلافاً أساسياً عن الطرائق الأخرى المستخدمة لتحسين مردود العنفة الغازية، كعمليات تبريد الغاز خلال الانضغاط وتسخينه خلال التمدد، وفي الحقيقة فإن تطبيق كل من الطريقتين الأخيرتين يؤثر في نفس الوقت وفي نفس الاتجاه على كل من العمل المفيد Wu ، وعلى كمية الحرارة المستهلكة Q ، بالمقابل فإن استعادة حرارة غازات العادم لا يؤثر على الأعمال Wc و Wt ، وبالتالي على الفرق بينهما Wu ، وإنما يتدخل فقط في علاقة كمية الحرارة المضافة Q .

وبالنتيجة نجد : إن استعادة الحرارة الجاهزة في نهاية التمدد تساعد دائماً في زيادة المردود [4] .

3-1-2: دراسة تأثير فعالية المسترجع على المردود الحراري للمنشأة العنفية الغازية:

إن علاقة العمل المفيد Wu للمنشأة العنفية تطابق تلك لدورة جول أي :

$$Wu = Cp (Z - 1) \left[\frac{\eta t T3}{Z} - \frac{T1}{\eta c} \right] \dots \dots \dots (10 - 3)$$

بينما بالنسبة لكمية الحرارة المضافة في غرفة الاحتراق فتساوي في هذه الحالة إلى :

$$Q = Cp(T3 - T5) \dots \dots \dots (11 - 3)$$

ومن تعريف فعالية المسترجع لدينا :

$$T_5 = T_2 + \varepsilon (T_4 - T_2) \dots \dots \dots (12 - 3)$$

$$T_5 = (1 - \varepsilon)T_2 + \varepsilon T_4 \dots \dots \dots (13 - 3)$$

ومنه فإن كمية الحرارة المضافة :

$$Q = Cp T3 \left[1 - (1 - \varepsilon) \frac{T2}{T3} - \varepsilon \frac{T4}{T3} \right] \dots \dots \dots (14 - 3)$$

ولدينا :

$$\frac{T2}{T3} = \frac{T2}{T1} \times \frac{T1}{T3}$$

ومن تعريف المردود الداخلي النسبي لكل من الضاغط والعنفة نجد :

$$\eta_c = \frac{T2' - T1}{T2 - T1} = \frac{\frac{T2'}{T1} - 1}{\frac{T2}{T1} - 1} = \frac{Z - 1}{\frac{T2}{T1} - 1} \dots \dots \dots (15 - 3)$$

وبالتالي :

$$\frac{T2}{T1} = \frac{Z - 1}{\eta_c} + 1 \dots \dots \dots (16 - 3)$$

$$\frac{T2}{T3} = \left[1 + \frac{Z - 1}{\eta_c} \right] \frac{T1}{T3} \dots \dots \dots (17 - 3)$$

كما أن :

$$\eta_t = \frac{T3 - T4}{T3 - T4'} = \frac{1 - \frac{T4}{T3}}{1 - \frac{T4'}{T3}} = \frac{1 - \frac{T4}{T3}}{1 - \frac{1}{Z}} \dots \dots \dots (18 - 3)$$

وبالتالي :

$$\frac{T4}{T3} = 1 - \eta_t \left[1 - \frac{1}{Z} \right] \dots \dots \dots (19 - 3)$$

ومنه نجد :

$$Q = Cp T3 \left\{ 1 - (1 - \varepsilon) \left[1 + \frac{Z - 1}{\eta c} \right] \frac{T1}{T3} - \varepsilon \left[1 - \eta t \left(1 - \frac{1}{Z} \right) \right] \right\} \dots \dots \dots (20 - 3)$$

إذاً :

$$Q = Cp T3 \left[1 - \varepsilon + \varepsilon \eta t \left(1 - \frac{1}{Z} \right) \right] - (1 - \varepsilon) Cp T1 \left[1 + \frac{Z - 1}{\eta c} \right] \dots \dots \dots (21 - 3)$$

وهكذا يكتب المردود الحراري للمنشأة الغازية الحاوية على مسترجع حراري على النحو التالي :

$$\eta_{th} = \frac{Wu}{Q} = \left[1 - \frac{1}{Z} \right] \frac{\tau - Z}{\varepsilon \tau \left[1 - \frac{1}{Z} \right] + (1 - \varepsilon)(\sigma - Z + 1)} \dots \dots \dots (22 - 3)$$

حيث :

$$\sigma = \eta c \left[\frac{T3}{T1} - 1 \right]$$

$$\tau = \eta c \eta t \frac{T3}{T1}$$

$$Z = \left(\frac{P2}{P1} \right)^{\frac{k-1}{k}}$$

بفرض أن : $\varepsilon = 0$ في هذه العلاقة، فإن قيمة η_{th} هي نفسها لدورة جول وهي :

$$\eta_{th} = \left(1 - \frac{1}{Z} \right) \frac{\tau - Z}{\sigma - Z + 1} \dots \dots \dots (23 - 3)$$

بينما باعتبار أن : $\varepsilon = 1$ نجد :

$$\eta_{th} = \left(1 - \frac{Z}{\tau} \right) \dots \dots \dots (24 - 3)$$

توضح هذه النتيجة أنه في الحالة النظرية لمسترجع سطح تبادل حراري لا نهائي يتغير المردود η_{th} عكسياً مع نسبة الانضغاط، ومن أجل قيمة محدد لـ ε ، يمكن الحصول على القيمة المثالية لنسبة الانضغاط أو Z بانعدام المشتق $\frac{d\eta}{dZ}$ ، وهكذا نجد معادلة من الدرجة الثانية يعطي حلها :

$$Z_{opt} = a^{\pm} \sqrt{a^2 - b} \dots \dots \dots (25 - 3)$$

حيث :

$$a = \frac{1}{1 + \frac{(1-\varepsilon)\sigma}{(2\varepsilon-1)\tau}} \dots \dots (26 - 3)$$

$$b = \frac{\frac{\varepsilon}{1-\varepsilon} - \sigma - 1}{\frac{\sigma}{\tau} + \frac{2\varepsilon-1}{1-\varepsilon}} \dots \dots (27 - 3)$$

إن قيمة Z_{opt} التي حصلنا عليها هي أقل دائماً من تلك الموافقة لدورة جول ($\varepsilon = 0$)، ويمكن أن يؤدي تطبيقها إلى تقليل محسوس للعمل الكتلي، أي أنه من أجل استطاعة معطاة، يؤدي استخدام هذه القيمة إلى زيادة أبعاد الآلة.

وهكذا نجد أنه من أجل قيمة محددة ل (τ) عندما تكون : $\varepsilon = 1$ فإن قيمة المردود تقترب من الواحد عندما تقترب Z من الصفر، ولكن العمل الكتلي يتجه هو أيضاً نحو الصفر [4] .

وبالتالي نحسب المردود الحراري للعنفات المختارة وذلك بعد إدخال المسترجع، ونقارنه مع المردود الحراري لنفس العنفة (دون مسترجع) والذي سبق وحسبناه في الفصل السابق .

بالنسبة للعنفة الأولى (GT_{Solar}) :

يتم اختيار فعالية المسترجع ($\varepsilon = 0.75$) حيث من الواضح أن لقيم (ε) المنخفضة تأثير أكبر على المردود ومع ارتفاع قيمتها تقل حدة التغير.

وبالتالي نعوض قيم (σ) و (τ) و (Z) والتي تمّ حسابها في الفصل السابق في العلاقة (22-3) :

$$\eta_{th} = \frac{Wu}{Q} = \left[1 - \frac{1}{1.48}\right] \frac{2.2 - 1.48}{0.75 \times 2.2 \left[1 - \frac{1}{1.48}\right] + (1 - 0.75)(1.614 - 1.48 + 1)}$$

$$\eta_{th} = 28.5 \%$$

وبالتالي نلاحظ زيادة ملموسة في قيمة المردود الحراري بعد إدخال المسترجع مقارنة بقيمته قبل إدخال المسترجع والتي تساوي :

$$\eta_{th} = 20.6 \%$$

أما بالنسبة للعنفة الأولى (GT_1) :

فيتم اختيار فعالية المسترجع ($\varepsilon = 0.7$) :

وبالتالي نعوض قيم (σ) و (τ) و (Z) والتي تمّ حسابها في الفصل السابق في العلاقة (22-3) :

$$\eta_{th} = \frac{Wu}{Q} = \left[1 - \frac{1}{1.8}\right] \frac{2.85 - 1.8}{0.7 \times 2.85 \left[1 - \frac{1}{1.8}\right] + (1 - 0.7)(2.44 - 1.8 + 1)}$$

$$\eta_{th} = 33.7 \%$$

وبالتالي نلاحظ هنا أيضاً زيادة ملموسة في قيمة المردود الحراري بعد إدخال المسترجع مقارنة بقيمته قبل إدخال المسترجع والتي تساوي :

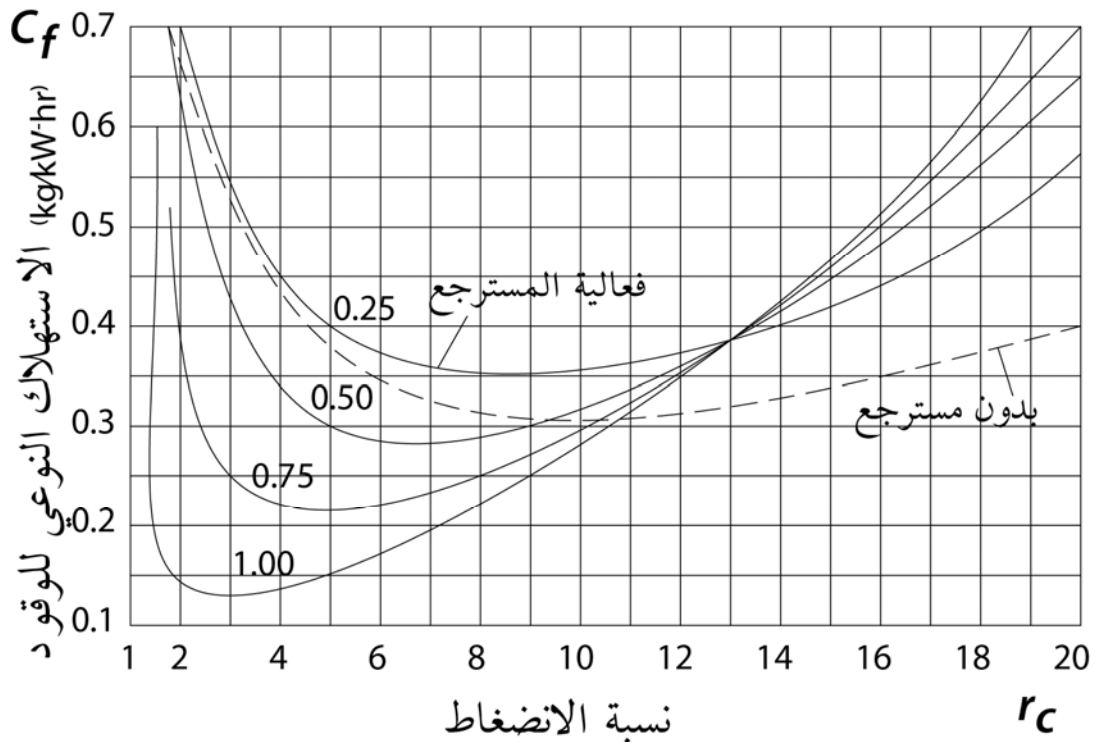
$$\eta_{th} = 28.2 \%$$

من جهة ثانية : فإن وجود المسترجع الحراري يساعد في تحسين مردود المنشأة عند عملها على حمل جزئي، حيث أنه عندما تعمل عنفة غازية مصممة لاستطاعة محددة وفق دورة جول (بدون مسترجع)، فإن مردودها ينخفض بشكل واضح عندما تكون الاستطاعة الناتجة من الآلة أقل من استطاعتها الاسمية.

إن استعادة حرارة الغازات العادمة يخفف من هذا التغير في المردود، وتظهر محاسن هذا النظام بدرجة أفضل كلما زادت فترة عمل الآلة تحت حمل جزئي.

ولكن يجب الانتباه إلى أن عملية الاسترجاع تصبح بدون فائدة عندما تكون درجة حرارة غازات العادم مساوية أو أقل من درجة حرارة الهواء المضغوط أي : $(T_4 = T_2)$.

كما أن الوصول إلى فعالية أكبر لعملية الاسترجاع ممكن بزيادة سطح التبادل الحراري النسبي، ويسبب استعمال الاسترجاع وفراً في الوقود، ومن أجل $(\epsilon = 0.6 - 0.8)$ يصل الوفّر إلى (30%)، كما أن عمل المنشأة يكون أفضل بكثير عند الحمولات الجزئية وذلك نظراً لضعف تأثيرات تغيرات نسبة الانضغاط على المردود في حالة المسترجع، ويبين الشكل (3-3) العلاقة بين الاستهلاك النوعي للوقود وفعالية المسترجع.



الشكل (3-3) : علاقة الاستهلاك النوعي للوقود و فعالية المسترجع

حيث نلاحظ من الشكل (3-3) أن الاستهلاك النوعي للوقود ينخفض بزيادة درجة الاسترجاع وذلك ضمن مجال محدد لنسب الانضغاط، إلا أنه بعد زيادة نسبة الانضغاط عن قيمة محددة تزداد قيمة الاستهلاك النوعي بشكل كبير مما يشير إلى ارتفاع درجة حرارة الهواء المضغوط والتي تصبح أكبر من درجة حرارة غازات العادم ($T_2 > T_4$) [1].

وأخيراً فإن الاختيار بين دورة جول ودارة استرجاع الحرارة يجب أن يأخذ بعين الاعتبار البرنامج المقترح لعمل العنفة الغازية.

الفصل الرابع

اختيار المسترجع الحراري المناسب للعتقة الغازية نوع (Solar) ودراسة تصميمية له

4-1: اختيار المسترجع الحراري للعنفة الغازية نوع (Solar):

المسترجع الحراري هو جهاز يستخدم للاستفادة من الطاقة الحرارية الضائعة من أحد المائعين بإعطائها للمائع الآخر، وتصنف المسترجعات الحرارية تبعاً لعمليات الانتقال الحراري إلى نموذج التماس المباشر ونموذج التماس غير المباشر.

في نموذج التماس المباشر هناك تياران مختلفان في الطور يدخلان بتماس مباشر، فيتبادلان الحرارة وبعد ذلك يفصلان، أما في نموذج التماس غير المباشر يبقى التياران منفصلان، وتنتقل الحرارة عبر جدار فاصل بشكل مستمر أو بواسطة جدار يخزن الحرارة خلال فترة زمنية ويطلقها خلال فترة تالية دورياً.

المسترجعات الحرارية التي يكون فيها تدفق مستمر للحرارة من التيار الساخن إلى التيار البارد عبر جدار فاصل تنتمي إلى نموذج الانتقال المباشر (Recuperators).

المسترجعات التي يتم فيها تدفق متناوب للحرارة من التيار الساخن إلى التيار البارد (عن طريق تخزين الحرارة ونبذها عبر سطح المسترجع) تنتمي إلى نموذج الانتقال غير المباشر أو إلى نموذج المسترجعات التخزينية (Regenerators) [8].

و هناك نوعان رئيسيان من المسترجعات التي تنتمي إلى نموذج الانتقال غير المباشر هما المسترجع الدوار وفيه يمر كل جزء من الحشوة بشكل دوري من حزمة الغازات الساخنة إلى حزمة الغازات الباردة ويعود ثانية وذلك بواسطة عمود محور يأخذ طاقته من محرك كهربائي، والنوع الثاني هو المسترجع الثابت حيث يتم تحويل تدفق الغازات من خلال مجموعة من الصمامات من وإلى الحشوة الداخلية.

وبشكل عام فإن حزمة الغازات الباردة والساخنة يتدفقان باتجاهين متعاكسين، ويتم فصل هذين التيارين عن بعضهما بواسطة مجموعة من الفواصل ضمن الحشوة الداخلية.

ولا بد من الانتباه بأنه عند درجات الحرارة المنخفضة فإن الحرارة النوعية لمعظم أنواع المعادن تنخفض بشكل كبير، مما يؤثر على أداء المسترجع بشكل كبير.

ويعمل عادة الجريان المتعاكس من وجهة نظر ترموديناميكية كنظرية أساسية في المسترجعات الحرارية من النوع التخزيني بواسطة إدخال الغازات تباعاً من خلال النهايات المتعاكسة.

عندما يتم زيادة سرعة دوران أو تواتر التبديل بين تيارَي الغازات الساخنة والباردة ضمن المسترجع فإن أدائها يقترب من النهج المثالي، ولكن في الواقع فإن التسربات قد تصبح كبيرة مع زيادة السرعة وبالتالي ينخفض أداء المسترجع.

إلا أنه في بعض التطبيقات فإنه يستخدم الجريان المتوازي حيث يمر كل من تيارى الغازات الساخنة والباردة بشكل متوازي ضمن المسترجع أي أن الغازات تدخل تباعاً من خلال النهايات الموجودة في نفس الطرف.

ولكن يجب الانتباه إلى أنه لا يستخدم الجريان المتصالب في المسترجعات التي تنتمي إلى نموذج الانتقال غير المباشر.

وبالنسبة للمسترجعات الدوارة فإنه يتم وضع السدادات لمنع حصول التسربات من الحزمة الساخنة إلى الحزمة الباردة وبالعكس، كما تصبح هذه المهمة أكثر صعوبة خاصة إذا كانت كل من الحزمتين الساخنة والباردة تعملان تحت ضغوط مختلفة بشكل كبير.

و بالتالي يتم اختيار المسترجع الحراري الدوار للعنفة الغازية نوع (Solar) وذلك للأسباب التالية:

يمكن استخدام سطح أكثر امتلاء من ذلك المستخدم في المسترجعات الحرارية التي يكون فيها تدفق مستمر للحرارة (ذات نموذج الانتقال المباشر).

يتم تخفيض هبوط الضغط ضمن المسترجعات وبناء على ذلك يتم صناعة مسترجع أكثر اقتصادية بالمقارنة مع المسترجع ذو نموذج الانتقال المباشر المكافئ له.

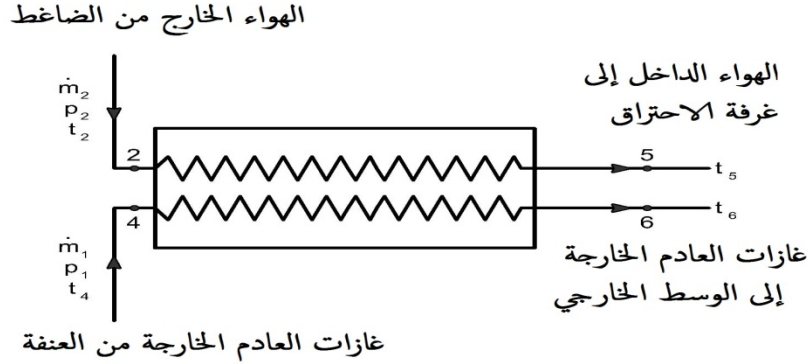
المسترجع ذو السطح الممتلئ يكون عادة ذو حجم أصغر من المسترجع ذو نموذج الانتقال المباشر المكافئ له.

وهناك ميزة أخرى إضافية وهامة جداً في المسترجعات ذات الجريان المتعكس وتتميز بها عن المسترجعات التي يكون فيها تدفق مستمر للحرارة وذات جريان متعكس أيضاً هوبساطة تصميم كل من مجمعات الدخول والخروج لكل من حزمتي الغازات الساخنة والباردة، وذلك لأن كل من الحزمتين تتدفق ضمن مقاطع مختلفة (حيث يتم فصلها بواسطة مانعات التسرب النصف قطرية) في المسترجع الدوار، أو يتم دخول إحدى حزمتي الغاز وخروجها ضمن المسترجع كل على حدا كما هو الحال في المسترجع الثابت، وعلى النقيض من ذلك فإن تصميم مجمعات الدخول والخروج لكل من حزمتي الغازات الساخنة والباردة في المسترجع ذو نموذج الانتقال المباشر وذو الجريان المتعكس يكون معقد ومكلف.

وأخيراً فإن كثافة مساحة السطح وطبيعة الترتيب المتعكس للحشوة في المسترجعات الدوارة يجعل منها مناسبة كمسترجع حراري من نوع (غاز - غاز) والتي تتطلب فعالية عالية للمسترجع الحراري ضمن حدود الضغط المسموحة حيث لا يمكن أن يكون فرق الضغط بين كل من الحزمتين أكثر من (4bar) [9].

4-2: التصميم الحراري للمسترجع:

يتم التصميم للعنفة المختارة باستخدام التسخين الاسترجاعي لزيادة درجة حرارة الهواء بعد الضاغط حسب المخطط الحراري للمسترجع الشكل (4-1) خلال فصل الشتاء وذلك لأن درجة حرارة خروج غازات العادم شتاء أخفض منها صيفاً، وبالتالي يكون التصميم على أساس أخفض درجة حرارة لخروج غازات العادم.



الشكل (4-1) : المخطط الحراري للمسترجع

4-2-1: بارامترات غازات العادم الخارجة من العنفة و الداخلة إلى المسترجع:

1. درجة حرارة غازات العادم الداخلة للمسترجع $t_4 = 345 \text{ }^{\circ}\text{C}$.
2. التدفق الكتلي لغازات العادم الداخلة للمسترجع $\dot{m}_1 = 17.14 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$.
3. ضغط غازات العادم الداخلة للمسترجع $p_1 = 1.053 \text{ bar}$.

4-2-2: بارامترات الهواء الخارج من الضاغط و الداخل إلى المسترجع:

1. درجة حرارة الهواء المضغوط الداخل للمسترجع $t_2 = 176 \text{ }^{\circ}\text{C}$.
2. التدفق الكتلي للهواء المضغوط الداخل للمسترجع $\dot{m}_2 = 15.01 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$.
3. ضغط الهواء المضغوط الداخل للمسترجع $p_2 = 3.9 \text{ bar}$.

4-2-3: إيجاد درجة حرارة الهواء المضغوط الخارج من المسترجع:

من خلال معادلة فعالية المسترجع يمكن إيجاد درجة حرارة الهواء المضغوط الخارج منه كما يلي :

$$\epsilon = \frac{h_5 - h_2}{h_4 - h_2} = \frac{T_5 - T_2}{T_4 - T_2} \dots \dots \dots (1 - 4)$$

وبالتعويض نجد :

$$0.75 = \frac{t_5 - 176}{345 - 176}$$

$$t_5 = 302.75 \text{ } ^\circ\text{C}$$

4-2-4: حساب استطاعة المسترجع:

يتم حساب استطاعة المسترجع من خلال المعادلة التالية :

$$Q = \dot{m}_2 C_{p2}(t_5 - t_2) = \dot{m}_1 C_{p1}(t_4 - t_6) \dots \dots \dots (2 - 4)$$

لذا لا بد من حساب السعة الحرارية بثبات الضغط لكل من الهواء المضغوط وغازات العادم، أي (C_{p2}) و(C_{p1})، ويتم حسابها كما يلي :

إن السعة الحرارية لغازات العادم هي مجموع السعات الحرارية للعناصر المكونة لغازات العادم مضروبة بنسبتها الحجمية :

$$C_{pg} = \sum r_k \times C_{pk} \dots \dots \dots (3 - 4)$$

تحتسب السعة الحرارية الوسطية لكل من العناصر المكونة لغازات العادم في مجال درجات الحرارة $[345 - 0 \text{ } ^\circ\text{C}]$ وذلك بالأخذ بعين الاعتبار أن علاقة السعة الحرارية بدرجة الحرارة خطية وذلك من خلال العلاقات التالية [5]:

• للآزوت :

$$C_{p_{N_2}} = 1.024 + 0.00008855(345) = 1.054 \frac{kJ}{Kg.deg}$$

• لغاز ثاني أكسيد الكربون :

$$C_{p_{CO_2}} = 0.8654 + 0.0002443(345) = 0.95 \frac{kJ}{Kg.deg}$$

• لبخار الماء :

$$C_{p_{H_2O}} = 1.833 + 0.0003111(345) = 1.94 \frac{kJ}{Kg.deg}$$

• للأكسجين :

$$C_{p_{O_2}} = 0.9203 + 0.0001065(345) = 0.957 \frac{kJ}{Kg.deg}$$

وبالتالي يكون :

$$C_{p_g} = C_{p_1} = C_{p_{N_2}} r_{N_2} + C_{p_{CO_2}} r_{CO_2} + C_{p_{H_2O}} r_{H_2O} + C_{p_{O_2}} r_{O_2} \dots \dots \dots (4 - 4)$$

وبالتعويض :

$$C_{p_g} = C_{p_1} = 1.054 \times 0.67 + 0.95 \times 0.08 + 1.94 \times 0.107 + 0.957 \times 0.143$$

$$C_{p_g} = C_{p_1} = 1.13 \frac{kJ}{Kg.deg}$$

والآن لنحسب السعة الحرارية للهواء المضغوط عند الضغط $p_2 = 3.9 \text{ bar}$ ودرجة حرارة وسطية بين الدخول للمسترجع والخروج منه أي بين درجتَي الحرارة ($302.75^\circ\text{C} - 176^\circ\text{C}$) وذلك من [6] :

$$C_{p_{air}} = C_{p_2} = 1.04 \frac{kJ}{Kg.deg}$$

وبالتالي تكون استطاعة المسترجع :

$$Q = 15.01 \times 1.04 \times (302.75 - 176) = 1978.62 \text{ KW}$$

$$Q = 1.98 \text{ MW}$$

4-2-5: إيجاد درجة حرارة خروج غازات العادم من المسترجع:

يمكن حساب درجة حرارة خروج غازات العادم من المسترجع من خلال المعادلة :

$$Q = \dot{m}_2 C_{p2}(t_5 - t_2) = \dot{m}_1 C_{p1}(t_4 - t_6) \dots \dots \dots (5 - 4)$$

بالتعويض :

$$1978.62 = 17.14 \times 1.13 \times (345 - t_6)$$

وبالتالي :

$$t_6 = 242.84^\circ\text{C}$$

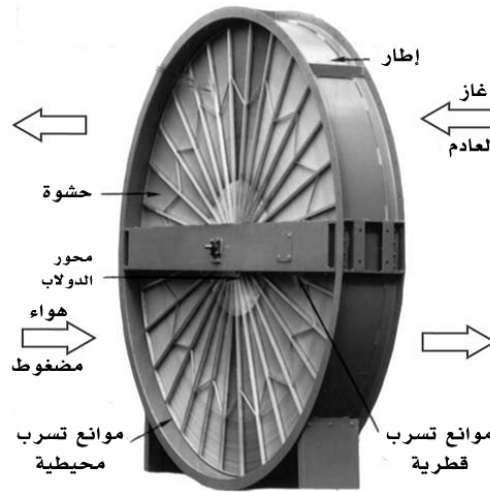
6-2-4: تحديد زوايا الدخول إلى المسترجع:

يتم تحديد زوايا المسترجع بالاعتماد على نسب التدفق الكتلي لكل من غازات العادم والهواء المضغوط، ففي حال تساويهما تكون زوايا دخول كل من غازات العادم والهواء المضغوط متساويتان أي يكون $(\theta_1 = \theta_2 = 180^\circ)$ ، وبما أن تدفق غازات العادم الداخل إلى المسترجع $(\dot{m}_1 = \dot{m}_g)$ بينما تدفق الهواء المضغوط الداخل إلى المسترجع $(\dot{m}_2 = \dot{m}_{air} = 15.01 \frac{kg}{s})$ فإن زوايا الدخول للمسترجع لكل من الحزمتين يكون كما يلي :

- زاوية الدخول من جهة غازات العادم $(\theta_1 = 192^\circ)$.
- زاوية الدخول من جهة الهواء المضغوط $(\theta_2 = 168^\circ)$ [9].

7-2-4: اختيار حشوة المسترجع و تحديد مواصفاتها:

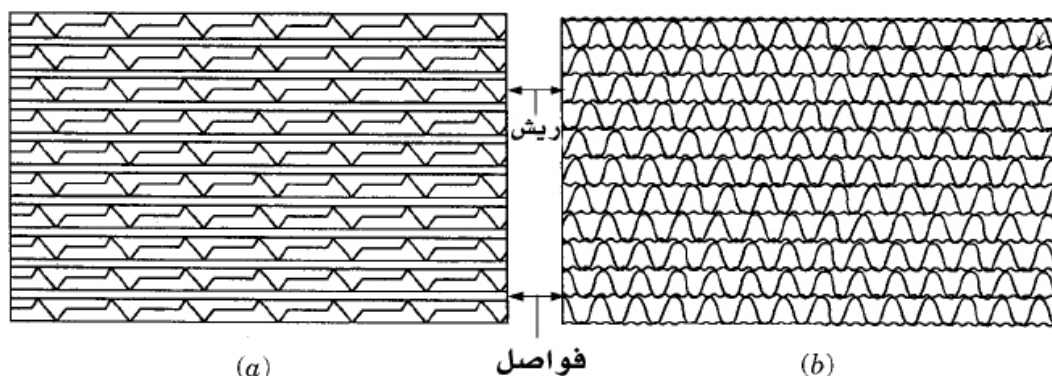
إن المسترجع الدوار الذي يظهر في الشكل (2-4) يعتمد على نوع التطبيق المدروس، ويطلق على هذا المسترجع عدة تسميات مختلفة فيطلق عليه اسم الدولاب الحراري أو دولاب التسخين، وعندما يكون جريان الغاز صفائحي ضمن المسترجع فإنه يطلق عليه اسم دولاب التدفق الصفائحي.



الشكل (2-4) : المسترجع الدوار أو الدولاب الحراري

وفي هذا النوع من المسترجعات فإنه يمكن استخدام الشكل الهندسي للسطح المستوي المريش البسيط، حيث تكون حشوة المسترجع الدوار مصنوعة من الصفائح المعدنية الرقيقة، أما سطوح المرور المتقاطعة فلا يمكن استخدامها لهذه الغاية وذلك بسبب إمكانية حصول تسرب بين تدفق كل من حزمتي الغازات

الباردة والساخنة، وخاصة في حال كانت هاتان الحزمتان تدخلان بضغوط مختلفة مما يؤدي إلى حصول تسرب واختلاط بين الحزمتين مسبباً تلوث في حزمة الغازات ذات الضغط المنخفض، وبالتالي تنخفض فعالية المسترجع.



الشكل (3-4) : ممرات التدفق المستمرة للمسترجع الدوار

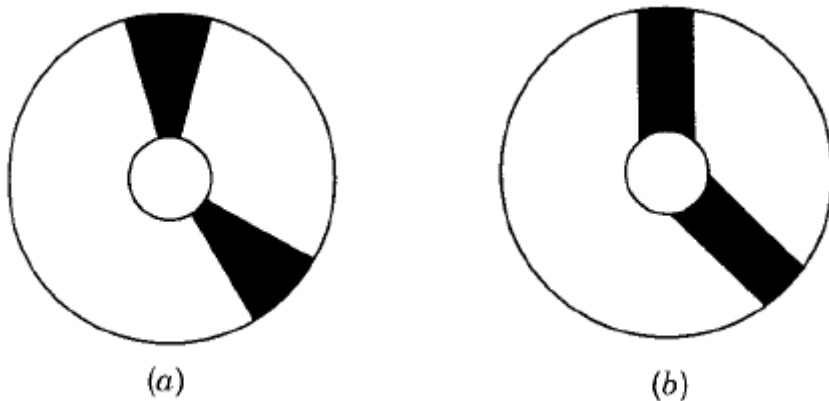
(a): ذات الصفائح المسننة ، (b): ذات الممرات المثاثية

وبناء على ما سبق فإن الحشوة تتميز بممرات تدفق مستمرة، وبالتالي فإن الفواصل المستوية أو المتموجة تستخدم لتجميع (تكديس) الريش كما يبين الشكل (3-4)، وبالتالي لا يمكن حصول أي اختلاط للغازات في أي مقطع عرضي لهذه السطوح، كما يبين الشكل مثالين لسطحين مختلفين يستخدمان في المسترجعات الدوارة.

أما الحشوات ذات الممرات التي تكون على شكل عظم السمكة أو تكون متقاطعة فهي لا تتطلب فواصل لتجميع الريش، ويتراوح عدد رينولدز للغاز عند المرور ضمن هذه السطوح بين (100 - 1000).

تدور الحشوة في المسترجعات الدوارة بواسطة عمود محور، وبالتالي فإن كل جزء من هذه الحشوة يمر بشكل دوري من حزمة الغازات الساخنة إلى حزمة الغازات الباردة ويعود ثانية، كما تزود هذه المسترجعات بسدادات توضع بشكل دقيق مما يحدد كمية التدفق المطلوبة من كل حزمة من حزمتي الغازات والداخلية إلى المسترجع، كما يساعد أيضاً في تقليل التسرب الأساسي من الغاز ذي الضغط المرتفع إلى الغاز ذي الضغط المنخفض.

وهناك عدد من أشكال السدادات المستخدمة في المسترجعات الدوارة، حيث يبين الشكل (4-4) اثنين من أشهرها :



الشكل (4-4) : موانع التسرب المستخدمة في المسترجع الدوار

(a): ذات المقطع الحلقي، (b): ذات العرض الموحد

الأول السدادة ذات المقطع الحلقي وفيها تكون ممرات تدفق الغازات في كل موقع معرضة لنفس التدفق، والثاني السدادة ذات العرض الموحد وفيها تكون ممرات تدفق الغازات معرضة لتدفقات مختلفة.

وفي حال كان لدينا مسترجعان لهما نفس مساحة سطح السدادات ولكن بأشكال مختلفة، فإن المسترجع ذي السدادة ذات المقطع الحلقي يتميز بفعالية أكبر [10].

في المسترجعات الدوارة تتراوح قيمة كثافة مساحة السطح للحشوة بين $(6600 - 1200 \frac{m^2}{m^3})$ ، وبالتالي يمكن استخدام مواد ذات سماكة منخفضة، وينتج عن ذلك فعالية عالية وانخفاض ضغط مقبول بالمقارنة مع أي مسترجع حراري عرف حتى اليوم.

يصمم المسترجع الدوار المعدني (أي أن الحشوة تكون مصنوعة من المعدن) لعمليات التشغيل المستمر وعندما تكون درجات حرارة الدخول إليه أصغر من $(790^\circ C)$ ، أما في التطبيقات ذات درجات الحرارة الأعلى من $(790^\circ C)$ يتم اختيار مادة الحشوة من السيراميك.

كما يتم استخدام حشوات من البلاستيك أو الورق أو الصوف عندما تكون درجات حرارة الدخول أقل من $(65^\circ C)$.

إلا أن المسترجعات التي تحتوي على حشوة من المعدن أو السيراميك لا تستطيع مقاومة اختلافات الضغط العالية بين حزمتي الغازات الباردة والساخنة الداخلة للمسترجع (أي التي تكون أكبر من 4 bar)، وذلك بسبب تصميم السدادات حيث تتعرض للتآكل والتلف والتشوهات الحرارية مما يؤدي إلى

حصول تسريبات، أما بالنسبة للمسترجعات التي تستخدم حشوات من البلاستيك أو الورق أو الصوف فإنها تعمل تحت ضغوط قريبة من الضغط الجوي.

إن التسرب خلال السدادات يخفض من فعالية المسترجع بشكل ملموس، كما أن المسترجع الدوار يتطلب طاقة لتدوير حشوته الداخلية من تدفق إحدى حزمتي الغاز إلى الحزمة الأخرى بالسرعة المطلوبة.

إن مسترجعات محطات الطاقة تكون ذات قطر أقل من (10 m)، وسرعة دوران تتراوح بين (0.5 – 3 r.p.m)، وفي مسترجعات تدوير الهواء فإنها تكون ذات قطر يتراوح بين (0.25 – 3 m) وسرعة دوران حوالي (10 r.p.m)، وأخيراً فإنه في المسترجعات الدوارة الخاصة بالعربات تكون ذات قطر حوالي (0.6 m) وسرعة دوران (18 r.p.m).

وأخيراً فإن من أهم تطبيقات المسترجع الدوار ذي الحشوة المعدنية في محطات توليد الطاقة وذلك في التسخين المسبق للهواء الداخل إلى حجرة الاحتراق وذلك للاستفادة من الحرارة الضائعة لغازات العادم، أما المسترجع الدوار ذي الحشوة المصنوعة من السيراميك فيستخدم للاستفادة من غازات العادم في الأفران ذات درجات الحرارة المرتفعة حيث تستخدم لتسخين الهواء الداخل لحجرة الاحتراق أيضاً [9].

وبناء على ما سبق تمّ اختيار المسترجع الدوار ذي الحشوة المعدنية وفقاً للمواصفات التالية :

- كثافة مساحة السطح للحشوة $\beta = 1200 \frac{m^2}{m^3}$

- مسامية الحشوة $\sigma = 0.76$

- نوع المعدن (كربون ستييل) وذلك لجودته ورخص ثمنه.

- كثافة مادة الحشوة $\rho_w = 7800 \frac{kg}{m^3}$

- قطر المسترجع (3 m)

- سرعة دوران المسترجع (2 r.p.m)

4-2-8: حساب عدد رينولدز للهواء المضغوط و لغازات العادم:

لا بد من حساب عدد رينولدز لكل من الهواء المضغوط وغازات العادم وذلك لتحديد نوع الجريان كما يلي:

4-2-8-1: حساب عدد رينولدز للهواء المضغوط :

$$Re = \left(\frac{G \times D_h}{\mu} \right)_{\text{air}} \dots \dots \dots (6 - 4)$$

حيث:

G : السرعة الكتلية.

D_h : القطر الهيدروليكي.

μ : اللزوجة التحريكية.

$$D_h = \frac{4 \sigma}{\beta} \dots \dots \dots (7 - 4)$$

$$D_h = \frac{4 \times 0.76}{1200} = 0.00253 \text{ m}$$

ويمكن حساب اللزوجة التحريكية للهواء (μ) المضغوط عند الضغط $p_2 = 3.9 \text{ bar}$ ودرجة حرارة وسطية بين الدخول للمسترجع والخروج منه أي بين درجتي الحرارة (176 °C – 302 °C) [6]:

$$\mu = 0.27 \cdot 10^{-4} \text{ [pa.s]}$$

$$G_{\text{air}} = \frac{\dot{m}_{\text{air}}}{(A_0)_{\text{air}}} \dots \dots \dots (8 - 4)$$

حيث :

$\dot{m}_{\text{air}}$: التدفق الكتلي للهواء المضغوط.

$(A_0)_{\text{air}}$: مساحة مقطع المسترجع لممرات الهواء المضغوط.

وبما أن :

$$\dot{m}_{\text{air}} = 15.01 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

ولكن :

$$(A_0)_{\text{air}} = A_0 \times \frac{\theta 2}{\theta} \dots \dots \dots (9 - 4)$$

$$A_0 = A_{\text{circle}} \times \sigma \dots \dots \dots (10 - 4)$$

$$A_{\text{circle}} = \frac{\pi \times D^2}{4} \dots \dots \dots (11 - 4)$$

نعوض :

$$A_{\text{circle}} = \frac{\pi \times (3)^2}{4} = 7.065 \text{ m}^2$$

$$A_0 = 7.065 \times 0.76 = 5.37 \text{ m}^2$$

$$(A_0)_{\text{air}} = 5.37 \times \frac{168}{360} = 2.51 \text{ m}^2$$

وبالتالي :

$$G_{\text{air}} = \frac{15.01}{2.51} = 5.98 \frac{\text{kg}}{\text{s.m}^2}$$

وبالتعويض بالعلاقة الأساسية (علاقة رينولدز) :

$$Re = \frac{5.98 \times 0.00253}{0.27 \cdot 10^{-4}} = 560.35 < 2300$$

إذن جريان الهواء المضغوط ضمن المسترجع جريان صفائحي.

2-8-2-4: حساب عدد رينولدز لغازات العادم:

$$Re = \left(\frac{G \times D_h}{\mu} \right)_{\text{gases}} \dots \dots \dots (12 - 4)$$

حيث:

G : السرعة الكتلية.

D_h : القطر الهيدروليكي.

μ : اللزوجة التحريكية.

$$\mathcal{D}_h = \frac{4 \sigma}{\beta} \dots \dots \dots (7 - 4)$$
$$\mathcal{D}_h = \frac{4 \times 0.76}{1200} = 0.00253 \text{ m}$$

إن العناصر المكونة لغازات العادم عند درجة حرارة وسطية بين الدخول للمسترجع والخروج منه أي بين درجتَي الحرارة (242.84 °C – 345 °C) وضغط قريب من الضغط الجوي [11]:

$$\mu_{N_2} = 27.8 \cdot 10^{-6} \text{ pa.s}$$
$$\mu_{CO_2} = 26.05 \cdot 10^{-6} \text{ pa.s}$$
$$\mu_{H_2O} = 20.29 \cdot 10^{-6} \text{ pa.s}$$
$$\mu_{O_2} = 32.6 \cdot 10^{-6} \text{ pa.s}$$

وبالتالي فإن اللزوجة التحريكية لغازات العادم ضمن المسترجع هي مجموع اللزوجات التحريكية للعناصر المكونة لغازات العادم مضروبة بنسبتها الحجمية :

$$\mu_g = \sum r_k \times \mu_k \dots \dots \dots (13 - 4)$$
$$\mu_g = 0.67 \times 27.8 \cdot 10^{-6} + 0.08 \times 26.05 \cdot 10^{-6} + 0.107 \times 20.29 \cdot 10^{-6} + 0.143 \times 32.6 \cdot 10^{-6} = 27.54 \cdot 10^{-6} \text{ pa.s}$$
$$G_{\text{gases}} = \frac{\dot{m}_{\text{gases}}}{(A_0)_{\text{gases}}} \dots \dots \dots (14 - 4)$$

حيث :

$\dot{m}_{\text{gases}}$: التدفق الكتلي لغازات العادم.

$(A_0)_{\text{gases}}$: مساحة مقطع المسترجع لممرات غازات العادم.

وبما أن :

$$\dot{m}_{\text{gases}} = 17.14 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

ولكن :

$$(A_0)_{\text{gase}} = A_0 \times \frac{\theta_1}{\theta} \dots \dots \dots (15 - 4)$$

$$A_0 = A_{\text{circle}} \times \sigma \dots \dots (10 - 4)$$

$$A_{\text{circle}} = \frac{\pi \times D^2}{4} \dots \dots (11 - 4)$$

نعوض :

$$A_{\text{circle}} = \frac{\pi \times (3)^2}{4} = 7.065 \text{ m}^2$$

$$A_0 = 7.065 \times 0.76 = 5.37 \text{ m}^2$$

$$(A_0)_{\text{gase}} = 5.37 \times \frac{192}{360} = 2.86 \text{ m}^2$$

وبالتالي :

$$G_{\text{gases}} = \frac{17.14}{2.86} = 5.99 \frac{\text{kg}}{\text{s.m}^2}$$

وبالتعويض بالعلاقة الأساسية (علاقة رينولدز) :

$$Re = \frac{5.99 \times 0.00253}{27.54 \cdot 10^{-6}} = 550.28 < 2300$$

إذن جريان غازات العادم ضمن المسترجع جريان صفائحي.

4-2-9: حساب معامل الانتقال الحراري للهواء المضغوط و لغازات العادم:

يتم حساب معامل الانتقال الحراري للهواء المضغوط و لغازات العادم انطلاقاً من علاقة نوسلت كما يلي:

4-2-9-1: حساب معامل الانتقال الحراري للهواء المضغوط:

$$h_{\text{air}} = \frac{K_{\text{air}} \times N_{UH1}}{D_h} \dots \dots (16 - 4)$$

حيث :

h_{air} : معامل الانتقال الحراري للهواء المضغوط.

K_{air} : معامل التوصيل الحراري للهواء المضغوط.

N_{UH1} : عدد نوسلت.

D_h : القطر الهيدروليكي.

ويمكن معرفة معامل التوصيل الحراري للهواء المضغوط (K_{air}) عند الضغط ($p_2 = 3.9 \text{ bar}$) ودرجة حرارة وسطية بين الدخول للمسترجع والخروج منه أي بين درجتي الحرارة ($176^\circ\text{C} - 302^\circ\text{C}$) وذلك من [6]:

$$K_{air} = 0.0405 \frac{w}{m.k}$$

كما يمكن معرفة عدد نوسلت للجريان الصفائحي (N_{UH1}) من [9]:

$$N_{UH1} = 3.111$$

وكما سبق وحسبنا فإن القطر الهيدروليكي (D_h) :

$$D_h = 0.00253 \text{ m}$$

وبالتعويض بالعلاقة الأساسية :

$$h_{air} = \frac{0.0405 \times 3.111}{0.00253} = 49.8 \frac{w}{m^2.k}$$

4-2-9-2: حساب معامل الانتقال الحراري لغازات العادم:

$$h_{gases} = \frac{K_{gases} \times N_{UH1}}{D_h} \dots \dots (17 - 4)$$

حيث :

h_{gases} : معامل الانتقال الحراري للهواء المضغوط.

K_{gases} : معامل التوصيل الحراري للهواء المضغوط.

N_{UH1} : عدد نوسلت.

D_h : القطر الهيدروليكي.

إن العناصر المكونة لغازات العادم عند درجة حرارة وسطية بين الدخول للمسترجع والخروج منه أي بين درجتي الحرارة (345 °C – 242.84 °C) وضغط قريب من الضغط الجوي [11]:

$$\begin{aligned}K_{N_2} &= 0.0418 \frac{w}{m.k} \\K_{CO_2} &= 0.0376 \frac{w}{m.k} \\K_{H_2O} &= 0.04341 \frac{w}{m.k} \\K_{O_2} &= 0.04342 \frac{w}{m.k}\end{aligned}$$

وبالتالي فإن معامل التوصيل الحراري لغازات العادم ضمن المسترجع هي مجموع معاملات التوصيل الحرارية للعناصر المكونة لغازات العادم مضروبة بنسبتها الحجمية :

$$\begin{aligned}K_g &= \sum r_k \times K_k \dots \dots (18 - 4) \\K_g &= 0.67 \times 0.0418 + 0.08 \times 0.0376 + 0.107 \times 0.04341 + 0.143 \\&\times 0.04342 = 0.042 \frac{w}{m.k}\end{aligned}$$

كما يمكن معرفة عدد نوسلت للجريان الصفائحي (N_{UH1}) من [9] :

$$N_{UH1} = 3.111$$

وكما سبق وحسبنا فإن القطر الهيدروليكي (D_h) :

$$D_h = 0.00253 \text{ m}$$

وبالتعويض بالعلاقة الأساسية :

$$h_{gases} = \frac{0.042 \times 3.111}{0.00253} = 51.65 \frac{w}{m^2.k}$$

4-2-10: حساب نسبة معدل السعة الحرارية:

في البداية لا بد من حساب معدل السعة الحرارية لكل من الغاز الساخن (غاز العادم) والغاز البارد (الهواء المضغوط) كما يلي:

$$C_h = \dot{m}_h \times C_{p,h} \dots \dots \dots (19 - 4)$$

في مجال درجات الحرارة [345 – 243 °C] وذلك بالأخذ بعين الاعتبار أن علاقة السعة الحرارية بدرجة الحرارة خطية وذلك من خلال العلاقة التالية [5]

$$C_p = a + \frac{b}{2}(t_1 + t_2) \dots \dots \dots (20 - 4)$$

وبالتالي يكون :

$$C_{pN_2} = 1.024 + 0.00008855(243 + 345) = 1.076 \frac{\text{kJ}}{\text{kg. K}^\circ}$$

$$C_{pCO_2} = 0.8654 + 0.0002443(243 + 345) = 1.009 \frac{\text{kJ}}{\text{kg. K}^\circ}$$

$$C_{pH_2O} = 1.833 + 0.0003111(243 + 345) = 2.016 \frac{\text{kJ}}{\text{kg. K}^\circ}$$

$$C_{pO_2} = 0.9203 + 0.0001065(243 + 345) = 0.983 \frac{\text{kJ}}{\text{kg. K}^\circ}$$

وبالتالي فإن السعة الحرارية لغازات العادم مجموع السعات الحرارية للعناصر المكونة لغازات الاحتراق مضروبة بنسبتها الحجمية :

$$C_{p,g} = \sum r_k \times C_{p,K} \dots \dots \dots (3 - 4)$$

$$\begin{aligned} C_{p,g} &= 0.67 \times 1.076 + 0.08 \times 1.009 + 0.107 \times 2.016 + 0.143 \times 0.983 \\ &= 1.16 \frac{\text{kJ}}{\text{kg. K}^\circ} \end{aligned}$$

$$C_h = 17.14 \times 1.16 = 19.88 \frac{\text{kw}}{\text{K}}$$

وبالنسبة للحزمة الأبرد (الهواء المضغوط) :

$$C_c = \dot{m}_c \times C_{p,c} \dots \dots \dots (21 - 4)$$

ولدينا :

$$C_{p,air} = 1.04 \frac{\text{kJ}}{\text{kg. K}^\circ}$$

$$C_c = 15.01 \times 1.04 = 15.61 \frac{\text{kw}}{\text{k}}$$

وبالتالي تكون نسبة معدل السعة الحرارية :

$$C^* = \frac{C_{\min}}{C_{\max}} \dots \dots \dots (22 - 4)$$

حيث :

$$C_{\min} = C_c = 15.61 \frac{\text{kw}}{\text{k}}$$

$$C_{\max} = C_h = 19.88 \frac{\text{kw}}{\text{k}}$$

وبالتعويض :

$$C^* = \frac{15.61}{19.88} = 0.785$$

4-2-11: حساب مساحة سطح التبادل الحراري:

يتم حساب مساحة سطح التبادل الحراري كما يلي :

$$NTU_0 = \frac{1}{C_{\min}} \times \frac{1}{\frac{1}{(h.A)_h} + \frac{1}{(h.A)_c}} \dots \dots \dots (23 - 4)$$

A_h : مساحة سطح الانتقال الحراري من جهة غازات الاحتراق.

A_c : مساحة سطح الانتقال الحراري من جهة الهواء المضغوط.

ويحسب كل منهما كما يلي :

$$A_h = A \left(\frac{\theta_1}{\theta} \right) = A \left(\frac{192}{360} \right) = 0.53 A \dots \dots \dots (24 - 4)$$

$$A_c = A \left(\frac{\theta_2}{\theta} \right) = A \left(\frac{168}{360} \right) = 0.47 A \dots \dots \dots (25 - 4)$$

نعوض في العلاقة الأساسية :

$$NTU_0 = \frac{1}{15.61 \times 10^3} \times \frac{1}{\frac{1}{51.65 \times 0.53 A} + \frac{1}{49.8 \times 0.47 A}}$$

$$NTU_0 = 0.81 \times 10^{-3} A$$

ومن علاقة فعالية المسترجع :

$$\varepsilon = \frac{1 - \exp[-NTU_0 (1 - C^*)]}{1 - C^* \exp[-NTU_0 (1 - C^*)]} \dots \dots \dots (26 - 4)$$

نعوض :

$$0.75 = \frac{1 - \exp[-0.81 \times 10^{-3} A (1 - 0.785)]}{1 - 0.785 \exp[-0.81 \times 10^{-3} A (1 - 0.785)]}$$

وبالتالي أصبح لدينا معادلة بمجهول واحد بحلها نجد مساحة سطح التبادل الحراري :

$$A = 2862 \text{ m}^2$$

12-2-4: حساب ارتفاع المسترجع:

يمكن حساب ارتفاع المسترجع من العلاقة التالية :

مساحة سطح التبادل الحراري = (مساحة المقطع الدائري للمسترجع - مساحة محور المسترجع) × ارتفاع المسترجع × كثافة مساحة السطح للحشوة × نسبة مساحة مقطع المسترجع الغير مغطاة من قبل مانع التسرب.

$$A = [A_{\text{circle}} - A_{\text{hub}}] \times H \times \beta \times (1 - X) \dots \dots \dots (27 - 4)$$

$$2862 = \left(\left[\frac{\pi}{4} (3)^2 \right] - \left[\frac{\pi}{4} (0.2)^2 \right] \right) \times H \times 1200 \times (1 - 0.1)$$

وبالحساب نجد :

$$H = 0.38 \text{ m}$$

4-2-13: حساب كتلة المسترجع:

كتلة المسترجع = (مساحة المقطع الدائري للمسترجع - مساحة محور المسترجع) × ارتفاع المسترجع × كثافة مادة المسترجع × صلابة مادة المسترجع.

$$M = [A_{circle} - A_{hub}] \times H \times \rho_w \times (1 - \sigma) \dots \dots (28 - 4)$$

$$M = [3.14 - 0.031] \times 0.38 \times 7800 \times (1 - 0.76)$$

$$M = 2211.62 \text{ Kg}$$

4-3: التصميم الهيدروليكي للمسترجع:

إن هبوط الضغط الزائد يمكن أن يسبب بضغط خلفي عالي على أنظمة المحرك وهذا يؤدي إلى انخفاض الفعالية والطاقة بالإضافة إلى زيادة التسخين. فيما يتعلق بالعنفات الغازية فإن الضغط الخلفي يخفض نسبة الضغط عبر العنفة وبالتالي يخفض من كمية الطاقة الخارجة من العنفة. العنفة سوف تخسر حوالي 0.25% من الطاقة لكل زيادة في الضغط الخلفي بمقدار 0.024 bar [7].

كما أن حجم وحدة إسترجاع الحرارة يعتمد على هبوط الضغط في كلا جانبي غازات العادم والهواء المضغوط.

إن التصميمات تعمل على التخفيض بشكل نموذجي من هبوط الضغط في وحدة إسترجاع الحرارة من أجل تقليل حجم وكلفة المسترجع.

4-3-1: حساب هبوط الضغط داخل المسترجع من جانب غازات العادم:

إن هبوط الضغط داخل المسترجع من جانب غازات العادم يتحدد من خلال العلاقة التالية :

$$(\Delta P)_a = \left(\frac{\Delta p}{p_i} \right) p_i \dots \dots (29 - 4)$$

حيث:

$(\Delta P)_a$: هبوط الضغط المطلق.

$\left(\frac{\Delta p}{p_i} \right)$: هبوط الضغط النسبي.

p_i : ضغط غازات العادم عند مدخل المسترجع.

ومن علاقة هبوط الضغط النسبي :

$$\frac{\Delta p}{p_i} = \frac{G^2}{2 g_c \rho_i p_i} \left[2 \left(\frac{\rho_i}{\rho_0} - 1 \right) + f \frac{4 L}{D_h} \rho_i \left(\frac{1}{\rho} \right)_m \right] \dots \dots \dots (30 - 4)$$

حيث :

G : السرعة الكتلية لغازات العادم ضمن المسترجع.

ρ_i : كثافة غازات العادم الداخلة إلى المسترجع.

ρ_0 : كثافة غازات العادم الخارجة من المسترجع.

p_i : ضغط غازات العادم الداخلة إلى المسترجع.

f : معامل الاحتكاك.

L : ارتفاع المسترجع.

D_h : القطر الهيدروليكي.

والآن نوجد البارامترات المجهولة :

$$\left(\frac{1}{\rho} \right)_m = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{\rho_i} + \frac{1}{\rho_0} \right) \dots \dots \dots (31 - 4)$$

وبالتعويض نجد :

$$\left(\frac{1}{\rho} \right)_m = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{0.567} + \frac{1}{\rho_0} \right) = \frac{1}{2} \left(1.76 + \frac{1}{\rho_0} \right)$$

لنوجد (f) :

$$Re \times f = 16 \Rightarrow f = \frac{16}{Re} \dots \dots \dots (32 - 4)$$

وبالتعويض نجد :

$$f = \frac{16}{Re} = \frac{16}{550.28} = 0.03$$

نعوض في العلاقة الأساسية :

$$\frac{\Delta p}{p_i} = \frac{(5.99)^2}{2 \times 1 \times 0.567 \times 1.053 \cdot 10^5} \left[2 \left(\frac{0.567}{\rho_0} - 1 \right) + 0.03 \frac{4 \times 0.38}{0.00253} \right. \\ \left. \times 0.567 \times \frac{1}{2} \left(1.76 + \frac{1}{\rho_0} \right) \right]$$

$$\frac{\Delta p}{p_i} = 3 \times 10^{-4} \left[\frac{1.134}{\rho_0} - 2 + 5.11 \left(1.76 + \frac{1}{\rho_0} \right) \right]$$

$$\frac{\Delta p}{p_i} = \left[\frac{1.87 \times 10^{-3}}{\rho_0} + 2.1 \times 10^{-3} \right] \dots (1)$$

وكما نعلم :

$$\rho_0 = \frac{P_0}{R \times T_0} = \frac{P_0}{300 \times 516} = \frac{P_0}{154800} \dots (2)$$

نعوض (2) في (1) فيكون :

$$\frac{\Delta p}{p_i} = \left[\frac{1.87 \times 10^{-3} \times 154800}{P_0} + 2.1 \times 10^{-3} \right]$$

$$\frac{\Delta p}{p_i} = \left[\frac{289.48}{P_0} + 2.1 \times 10^{-3} \right]$$

والآن بضرب طرفي المعادلة بـ (p_i) يصبح لدينا :

$$(\Delta P)_a = \left(\frac{\Delta p}{p_i} \right) p_i$$

بالتعويض نجد :

$$(\Delta P)_a = \left[\frac{289.48}{P_0} + 2.1 \times 10^{-3} \right] p_i$$

$$p_i - p_0 = \frac{289.48 p_i + 2.1 \times 10^{-3} p_i p_0}{p_0}$$

بالإصلاح :

$$- p_0^2 + 0.998 p_i p_0 - 289.48 p_i = 0$$

ولكن :

$$p_i = 1.053 \times 10^5 pa$$

وبالتعويض نجد :

$$- p_0^2 + 105089.4 p_0 - 304.82 \times 10^5 = 0$$

وبالتالي أصبح لدينا معادلة بمجهول واحد من الدرجة الثانية بحلها نجد :

$$p_0 = 104748.53 pa = 1.047 bar$$

ومن هنا نحسب انخفاض الضغط المطلق داخل المسترجع من جهة غازات العادم :

$$(\Delta P)_a = p_i - p_0 \dots \dots (33 - 4)$$

بالتعويض :

$$(\Delta P)_a = 1.053 - 1.047 = 0.006 bar$$

وكما نلاحظ إن هذه القيمة ضمن الحدود المسموح بها.

4-3-2: حساب هبوط الضغط داخل المسترجع من جانب الهواء المضغوط:

إن هبوط الضغط داخل المسترجع من جانب الهواء المضغوط يتحدد من خلال العلاقة التالية :

$$(\Delta P)_a = \left(\frac{\Delta p}{p_i} \right) p_i$$

حيث:

$(\Delta P)_a$: هبوط الضغط المطلق.

$\left(\frac{\Delta p}{p_i} \right)$: هبوط الضغط النسبي.

p_i : ضغط غازات العادم عند مدخل المسترجع.

ومن علاقة هبوط الضغط النسبي :

$$\frac{\Delta p}{p_i} = \frac{G^2}{2 g_c \rho_i p_i} \left[2 \left(\frac{\rho_i}{\rho_0} - 1 \right) + f \frac{4 L}{D_h} \rho_i \left(\frac{1}{\rho} \right)_m \right]$$

حيث :

G : السرعة الكتلية للهواء المضغوط ضمن المسترجع.

ρ_i : كثافة الهواء المضغوط الداخل إلى المسترجع.

ρ_0 : كثافة الهواء المضغوط الخارج من المسترجع.

p_i : ضغط الهواء المضغوط الداخل إلى المسترجع.

f : معامل الاحتكاك.

L : ارتفاع المسترجع.

r_h : نصف القطر الهيدروليكي.

والآن نوجد البارامترات المجهولة :

$$\left(\frac{1}{\rho} \right)_m = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{\rho_i} + \frac{1}{\rho_0} \right)$$

إن كثافة الهواء المضغوط الداخل إلى المسترجع (ρ_i) عند درجة حرارة الخروج من الضاغط وضغط الخروج من الضاغط يتم حسابه من [6] إذن :

$$\rho_i = 1.84 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

وبالتعويض نجد :

$$\left(\frac{1}{\rho} \right)_m = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{1.84} + \frac{1}{\rho_0} \right)$$

لنوجد (f) :

$$Re \times f = 16 \Rightarrow f = \frac{16}{Re}$$

وبالتعويض نجد :

$$f = \frac{16}{Re} = \frac{16}{560.35} = 0.028$$

نعوض في العلاقة الأساسية :

$$\frac{\Delta p}{p_i} = \frac{(5.98)^2}{2 \times 1 \times 1.84 \times 3.9 \cdot 10^5} \left[2 \left(\frac{1.84}{\rho_0} - 1 \right) + 0.028 \frac{4 \times 0.38}{0.00253} \times 1.84 \right. \\ \left. \times \frac{1}{2} \left(\frac{1}{1.84} + \frac{1}{\rho_0} \right) \right]$$

$$\frac{\Delta p}{p_i} = 2.5 \times 10^{-5} \left[\frac{3.68}{\rho_0} - 2 + 15.48 \left(\frac{1}{1.84} + \frac{1}{\rho_0} \right) \right]$$

$$\frac{\Delta p}{p_i} = \left[\frac{4.97 \times 10^{-4}}{\rho_0} + 1.6 \times 10^{-4} \right] \dots (1)$$

وكما نعلم :

$$\rho_0 = \frac{P_0}{R \times T_0} = \frac{P_0}{287 \times 576} = \frac{P_0}{165312} \dots (2)$$

نعوض (2) في (1) فيكون :

$$\frac{\Delta p}{p_i} = \left[\frac{4.97 \times 10^{-4} \times 165312}{P_0} + 1.6 \times 10^{-4} \right]$$

$$\frac{\Delta p}{p_i} = \left[\frac{79.18}{P_0} + 1.6 \times 10^{-4} \right]$$

والآن بضرب طرفي المعادلة بـ (p_i) يصبح لدينا :

$$(\Delta P)_a = \left(\frac{\Delta p}{p_i} \right) p_i$$

بالتعويض نجد :

$$(\Delta P)_a = \left[\frac{79.18}{P_0} + 1.6 \times 10^{-4} \right] p_i$$

$$p_i - p_0 = \frac{79.18 p_i + 1.6 \times 10^{-4} p_i p_0}{p_0}$$

بالإصلاح :

$$-p_0^2 + 0.999p_i p_0 - 79.18 p_i = 0$$

ولكن :

$$p_i = 3.9 \times 10^5 pa$$

وبالتعويض نجد :

$$-p_0^2 + 389610 p_0 - 308.8 \times 10^5 = 0$$

وبالتالي أصبح لدينا معادلة بمجهول واحد من الدرجة الثانية بحلها نجد :

$$p_0 = 389530.72 pa = 3.895 bar$$

ومن هنا نحسب انخفاض الضغط المطلق داخل المسترجع من جهة الهواء المضغوط :

$$(\Delta P)_a = p_i - p_0$$

بالتعويض :

$$(\Delta P)_a = 3.9 - 3.895 = 0.005 bar$$

إذن يخرج الهواء المضغوط من المسترجع ويدخل حجرة الإحتراق بانخفاض مقبول في الضغط وقدره (0.005 bar).

4-4: المواصفات النهائية للمسترجع:

الجدول (4-1) : المواصفات النهائية للمسترجع الدوار

$\beta = 1200 \frac{m^2}{m^3}$	كثافة مساحة السطح للحشوة	$Q = 1.98 MW$	استطاعة المسترجع
$\sigma = 0.76$	مسامية الحشوة	$\theta_1 = 192^\circ$	زاوية الدخول من جهة غازات العادم
$\rho_w = 7800 \frac{kg}{m^3}$	كثافة مادة الحشوة	$\theta_2 = 168^\circ$	زاوية الدخول من جهة الهواء المضغوط
(3 m)	قطر المسترجع	$A = 2862 m^2$	مساحة سطح التبادل الحراري
$M = 2211.62 Kg$	كتلة المسترجع	$H = 0.38 m$	ارتفاع المسترجع

الفصل الخامس

اختيار المسترجع الحراري المناسب للعنفة الغازية نوع

(Nuovo Pignone Frame 6)

ودراسة تصميمية له

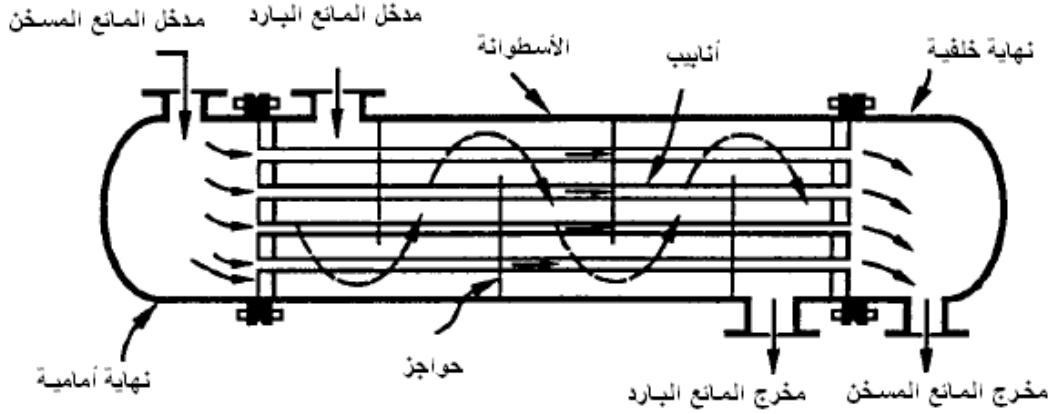
5-1: الأنواع الرئيسية للمسترجعات الحرارية:

يوجد هناك أنواع عديدة من المسترجعات الحرارية التي تنتمي إلى نموذج الانتقال المباشر حيث يكون فيها تدفق مستمر للحرارة من التيار الساخن إلى التيار البارد عبر جدار فاصل ومنها :

5-1-1: المسترجعات الحرارية الأنبوبية:

5-1-1-1: المسترجع الحراري ذو حزمة الأنابيب و الإسطوانة:

إن هذا المسترجع الحراري مكون من حزمة من الأنابيب متوضعة في اسطوانة حيث أن محور الأسطوانة منطبق على محور الأنابيب. أحد المائعين يتدفق داخل الأنابيب أما المائع الآخر يتدفق في الحيز المحصور بين الأنابيب والأسطوانة. إن هذا النوع من المسترجعات مكون من أنابيب ، الصفيحة ، الحواجز لزيادة معدل إنتقال الحرارة ، مداخل ومخارج المائعين والنهاية الأمامية والخلفية للمسترجع والشكل (5-1) يبين المسترجع الحراري ذو حزمة الأنابيب والإسطوانة:



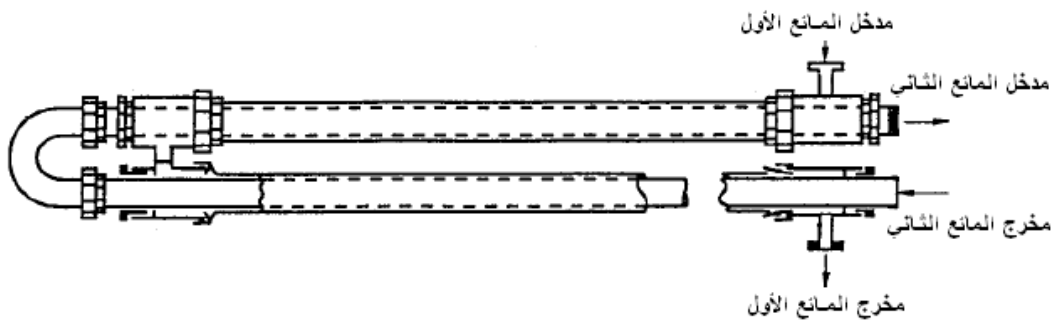
الشكل (5-1) : المسترجع الحراري ذو حزمة الأنابيب و الإسطوانة

إن هذه المسترجعات تستخدم بشكل واسع في الصناعة عند أي إستطاعة وظروف تشغيل حيث أنها تستخدم في المجال من الضغوط التخلخلية حتى الضغوط العالية جدا حوالي (100 MPa)، وفي مجال درجات الحرارة من درجات الحرارة المنخفضة جدا إلى درجات الحرارة المرتفعة (1100 °C) وعند أي فروقات بدرجات الحرارة والضغط بين المائعين. يمكننا أن نصمم مسترجعات من هذا النوع لأغراض خاصة مثل في حالة وجود إهتزازات، نسبة عالية للترسبات لكلا المائعين ، موائع ذات لزوجة عالية، وجود تأكل، وجود مواد سامة، مواد مشعة، خلائط وغيرها. يوجد هناك مواد عديدة معدنية وغير معدنية

يمكننا أن نستخدمها لإنشاء هذا النوع من المسترجعات (الغرافيت، الزجاج، التفلون). وهذه المسترجعات تتراوح بأحجام مختلفة حيث تتراوح مساحة سطح التبادل الحراري من (0.1 m^2) إلى (10^2 m^2) . إن هذه المسترجعات تستخدم كمسترجعات حرارية في العمليات الصناعية في الصناعات الكيميائية وفي مصافي تكرير النفط ، كمولدات بخار، مكثفات، مسخنات لمياه تغذية المرجل، في تطبيقات التبريد وتكييف الهواء، في تطبيقات إسترجاع الحرارة الضائعة من السوائل والموائع المتكاثفة [9] .

5-1-1-2: المسترجع الحراري ذو الأنبوب المزدوج:

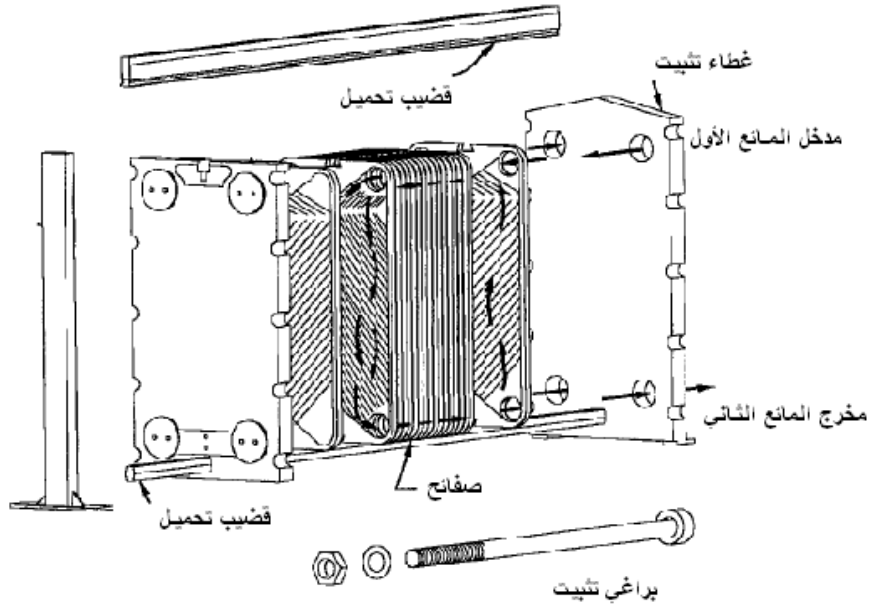
إن هذا المسترجع مكون من أنبوبين متمركزين حيث أن الأنبوب الداخلي يكون مريش أو مسطح. أحد المائعين يتدفق في الأنبوب الداخلي بينما المائع الآخر يتدفق في الحيز المحصور بين الأنبوبين ويكون إتجاه الجريان معاكس للحصول على أعلى أداء ضمن مساحة السطح المعطاة. إن هذا المسترجع يعتبر من أبسط المسترجعات ويتم تنظيفه بسهولة من خلال عملية فكه. إن هذا النوع من المسترجعات مناسب عندما يكون أحد المائعين بضغط عالي جدا وذلك لأن إحتواء المائع في أنبوب بقطر صغير يكون بكلفة أقل من إحتوائه في أسطوانة ذات قطر كبير. إن هذه المسترجعات تستخدم من أجل التطبيقات ذات الاستطاعات الصغيرة والتي تكون فيها مساحة سطح الانتقال الحراري الاجمالي المطلوبة هي (50 m^2) أو أقل. والشكل (5-2) يبين المسترجع ذي الأنبوب المزدوج [9] .



الشكل (5-2) : المسترجع الحراري ذو الأنبوب المزدوج

5-1-2: المسترجعات الحرارية الصفائحية:

إن المسترجعات الحرارية الصفائحية تصنع بالعادة من صفائح رقيقة. حيث أن هذه الصفائح تكون ناعمة أو متموجة. والشكل (5-3) يبين المسترجع الحراري الصفائحي:



الشكل (3-5) : المسترجع الحراري الصفائحي

إن هذا النوع من المسترجعات مصنع من الفولاذ المقاوم للصدأ والتيتانيوم ولا يتم إستخدام الفولاذ الكربوني نظرا لمقاومته المنخفضة للتآكل من أجل الصفائح الرقيقة. إن صفائح الغرافيت والبولىمر تستخدم مع الموائع التي لديها قابلية للتآكل. إن مساحة سطح الانتقال الحراري لواحدة الحجم من أجل هذا النوع من المسترجعات تتراوح من $(120 - 660 \text{ m}^2/\text{m}^3)$. من ميزات هذا النوع من المسترجعات هوسهولة فكها إلى المكونات البسيطة من أجل التنظيف والفحص والصيانة. مساحة سطح التبادل الحراري يمكن بسهولة تغييرها أو إعادة ترتيبها لوظيفة مختلفة أوفي حالة التغير المتوقع بالحمل. إن هذا النوع من المسترجعات يتميز بأن معامل الانتقال الحراري مرتفع، بالتالي فإن مساحة سطح الانتقال الحراري تكون من نصف إلى ثلث مساحة سطح الانتقال الحراري للمسترجع الحراري ذو حزمة الأنابيب و الإسطوانة من أجل نفس الحمل الحراري وبالتالي تخفيض الكلفة وحجم المسترجع والمساحة المطلوبة منه. إن فعالية هذا النوع من المسترجعات تصل إلى (93%). إن هذا النوع من المسترجعات يستخدم في تطبيقات إنتقال الحرارة من سائل إلى سائل آخر (حيث أن اللزوجة تصل حتى 10 pa.s) في معامل الألبان والعصير وفي معامل الأدوية ومعامل المطاط الصناعي ومعامل الورق [9].

3-1-5: المسترجعات الحرارية المريشة:

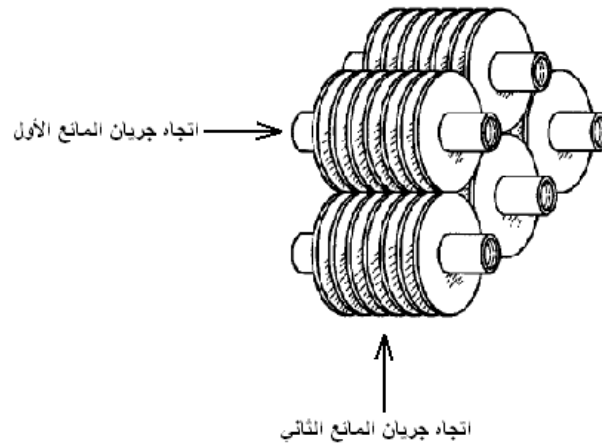
في بعض المسترجعات الحرارية عندما يكون أحد أوكل من المائعين غاز أو سائل ذي معامل إنتقال حرارة منخفض فإن ذلك يتطلب سطح إنتقال حراري كبير. إن أحد أكثر الطرق شيوعا لزيادة مساحة سطح المسترجع الحراري هي بإضافة ريش يوجد هناك نوعان رئيسيان من هذا النوع من المسترجعات وهي:

1-3-1-5: المسترجعات الحرارية ذات الأنابيب المريشة:

في المسترجعات الحرارية غاز - سائل معامل إنتقال الحرارة من جهة السائل أعلى من معامل إنتقال الحرارة من جهة الغاز. وبالتالي من أجل الحصول على توازن بالموصلية الحرارية (تقريبا قيم متساوية لـ hA) لكلا الجانبين فإنه يتم إستخدام ريش من جانب الغاز لزيادة مساحة سطح التبادل الحراري من جهة الغاز. بالإضافة إلى أنه عندما يكون ضغط أحد المائعين مرتفع ، فإنه من الأفضل إقتصاديا أن يتم إستخدام أنابيب. في المسترجعات الحرارية ذات الأنابيب المريشة، يتم إستخدام أنابيب ذات مقاطع مستطيلة أودائرية ويمكن في بعض الأحيان أن تكون ذات مقاطع بيضوية. يتم إستخدام الريش على السطح الخارجي للأنابيب، ولكن من الممكن إستخدامها على السطح الداخلي للأنابيب في بعض التطبيقات. وترتبط الأنابيب بواسطة ربط ميكانيكي أو بواسطة اللحام أو مواد لاصقة. حسب نوع الريشة، المسترجعات ذات الأنابيب المريشة تصنف كالتالي:

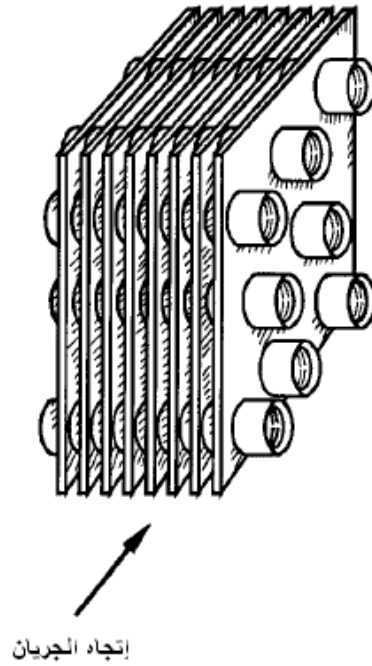
1. المسترجعات الحرارية المريشة بشكل فردي حيث أن كل انبوب يحتوي على الريشة الخاصة به

كما في الشكل (4-5):



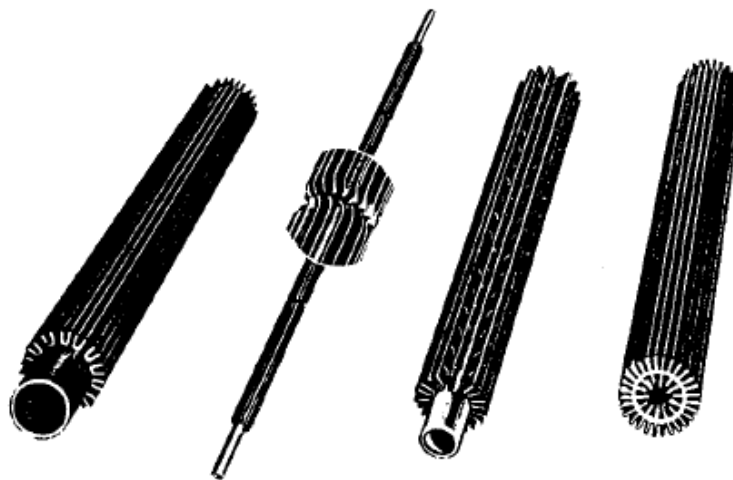
الشكل (4-5) : المسترجع الحراري ذو الأنابيب المريشة

2. المسترجعات الحرارية التي تحتوي على ريش مسطحة : حيث أن الريش تكون مسطحة مشتركة بين الأنابيب كما في الشكل (5-5):



الشكل (5-5) : المسترجع الحراري ذو الأنابيب ذات الصفائح المريشة

3. المسترجعات الحرارية ذات أنابيب مريشة طوليّاً : حيث تحتوي الأنابيب على ريش متوضعة بشكل طولي كما في الشكل (6-5):



الشكل (6-5) : الأنابيب المريشة طوليّاً

إن المسترجع الحراري من الصنف الأول مناسب في تطبيقات المسترجعات الحرارية الكبيرة لأنه عملي ومتين. أما المسترجعات من الصنف الثاني تكون بالعادة أرخص بالنسبة لوحدة مساحة سطح الانتقال الحراري وذلك لبساطتها ولكون الانتاج فيها كمي. المسترجعات التي تحتوي أنابيب ذات ريش متوضعة بشكل طولي تستخدم في تطبيقات التكاثف ومن أجل الموائع اللزجة في المسترجعات ذات الأنبوب المضاعف. إن المسترجعات ذات الأنابيب المريشة تستطيع أن تتحمل ضغوط عالية جداً من جهة الأنابيب وأعلى درجة حرارة يمكن تطبيقها تتعلق بنوع المواد المستخدمة وبطريقة الربط بين الريش والأنبوب. المسترجعات الحرارية ذات الأنابيب المريشة التي تكون فيها كثافة مساحة سطح التبادل الحراري $3300 \text{ m}^2/\text{m}^3$ متوفرة تجارياً. هذه المسترجعات تستخدم عندما يكون أحد المائعين بضغط عالي أو أحد المائعين يمتلك معامل إنتقال حراري أكبر من الآخر [9].

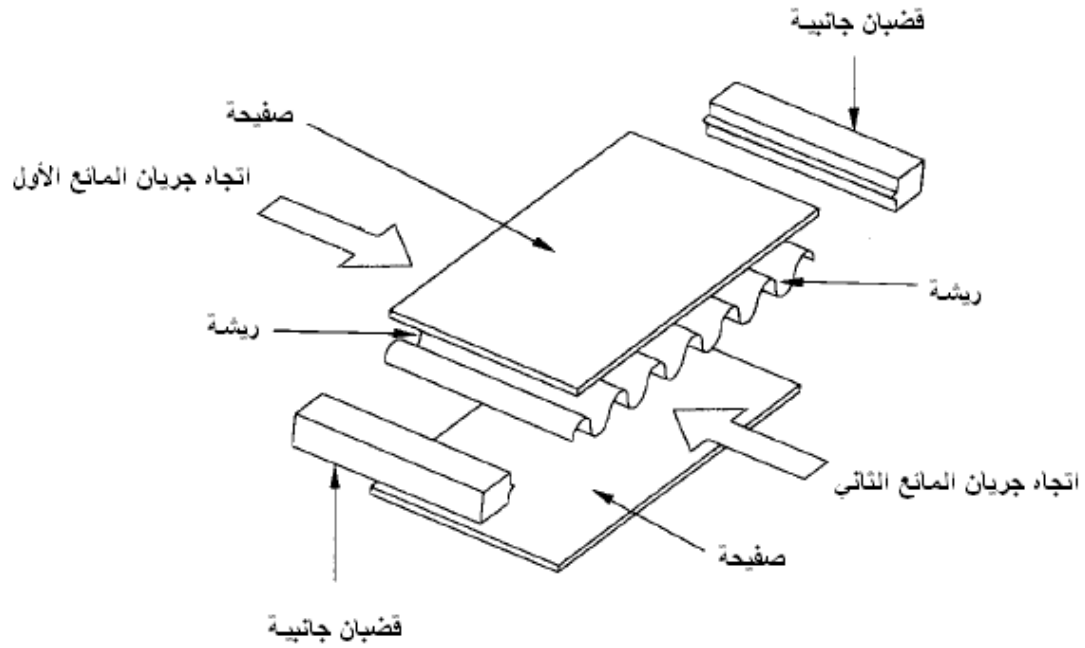
5-1-3-2: المسترجعات الحرارية ذات الصفائح المريشة:

إن هذا النوع من المسترجعات يتميز بريش متموجة (الأكثر شيوعاً ذات المقاطع المثلثية أو ذات المقاطع المستطيلة) وتقع الفواصل بين صفائح متوازية كما يبين الشكل (5-7).

تقوم الصفائح بالفصل بين الحزمتين الساخنة والباردة، وتشكل الريش ممرات التدفق الفردية، أما الممرات البديلة فإنها تتصل مع بعضها على التوازي بواسطة رؤوس مناسبة كي تشكل جانبي التدفق، حيث ترتبط الريش مع الصفائح بطرق مختلفة (لحام، الربط بالالصق، باستخدام وصلات ميكانيكية أو باستخدام البثق).

تستخدم الريش في كلا الجانبين وذلك في المسترجعات الحرارية من نوع غاز - غاز وذلك من أجل زيادة مساحة سطح الانتقال الحراري.

أما في حال المسترجعات الحرارية من نوع غاز - سائل فإن الريش تستخدم في جانب الغاز فقط أما إذا استخدمت على جانب السائل أيضاً فإنها تستخدم بشكل رئيسي من أجل زيادة القوة الهيكلية لتحسين عملية المزج (التبادل الحراري)، كما تستخدم الريش أحياناً لزيادة الصلابة واحتواء الضغط.



الشكل (5-7) : المسترجع الحراري ذو الصفائح المريشة

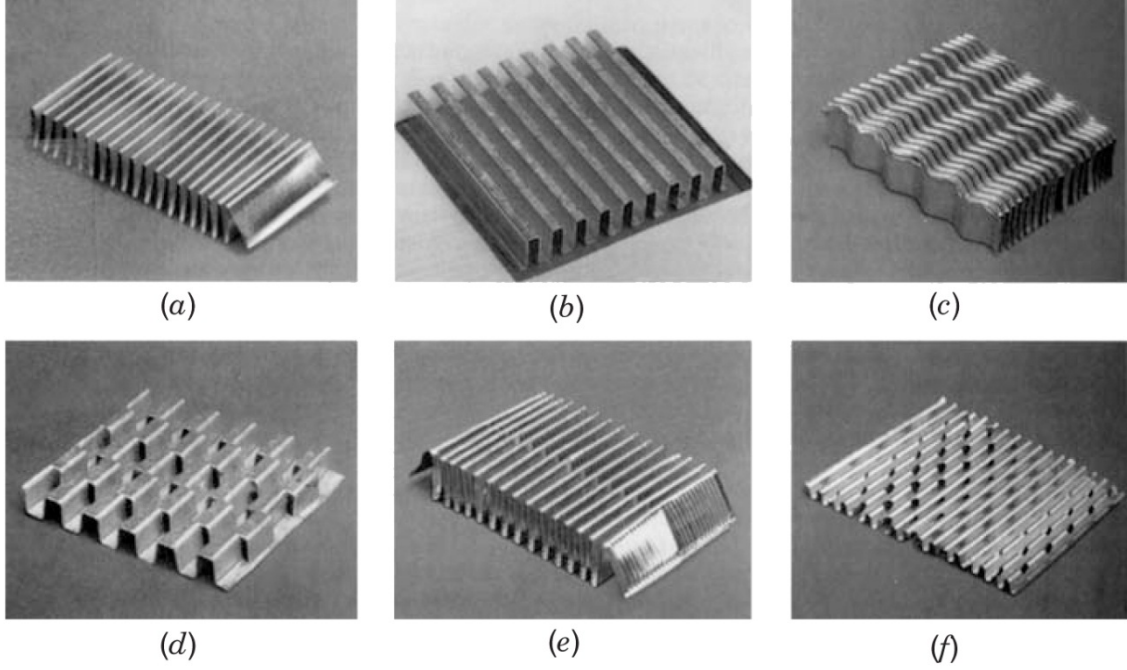
تصنف ريش المسترجع الصفائحي المبينة بالشكل (5-8) كما يلي :

1. ريش بسيطة أو عادية (أي غير مصقولة)، وريش مستقيمة (كالريش العادية ذات المقطع المثلثي أو المستطيل).

2. ريش عادية ولكن متموجة (حيث تكون متموجة في اتجاه تدفق المائع الرئيسي).

3. الريش المتقاطعة مثل (ذات الإزاحة الطولية، ذات الكوة، المثقبة).

وهناك الكثير من الاختلافات في أنواع الريش المتقاطعة واستخداماتها في الصناعة وذلك نظراً لاستخدامها مواد أكثر فعالية وكفاءة من تلك المستخدمة في الريش البسيطة، وبناء على ذلك فإنها تستخدم عندما تسمح قيود التصميم.



الشكل (5-8) : أنواع الريش المستخدمة في المسترجع الحراري ذو الصفائح المريشة

(a) : الريش العادية (البسيطة) ذات المقطع المثلثي (b) : الريش العادية (البسيطة) ذات المقطع المستطيل

(c) : الريش المتموجة (d) : الريش ذات الإزاحة الطولية

(e) : الريش ذات الكوة (f) : الريش المثقبة

تصمم المسترجعات الصفائحية ذات الريش بشكل عام من أجل ضغوط التشغيل العادية أي حوالي (7bar)، وعلى الرغم من ذلك فإن هذا النوع من المسترجعات متوافر تجارياً لتشغيل ضغوط تصل في بعض التطبيقات حتى (83bar).

إن القيود التي تحدد درجات حرارة الموائع الداخلة في المسترجع الصفائحي ذي الريش يعتمد على أسلوب الربط بين أجزاء المسترجع والمواد المستخدمة في صناعتها.

فالمسترجعات المصنوعة من المعادن تتحمل درجات حرارة حتى (840°C) أما المسترجعات المصنوعة من السيراميك فتتحمل درجات حرارة حتى (1150 °C) .

يستخدم العديد من المواد في تصنيع الريش والصفائح كالمعادن والسيراميك وفي بعض الحالات يتم استخدام أوراق معالجة بشكل خاص.

وتصل كثافة مساحة السطح في هذا النوع من المسترجعات حتى ($5900 \text{ m}^2/\text{m}^3$)، وهناك حرية مطلقة في اختيار مساحة سطح الريش وأبعادها في كل من جانبي الغاز حسب ما يقتضيه التصميم، وعلى الرغم من ذلك فإن كثافة الريش النموذجية تتراوح بين (700-120) ريشة في المتر، إلا أن هناك بعض التطبيقات التي تستلزم وجود رقم أكبر من ذلك الرقم المشار إليه سابقاً وقد يصل هذا الرقم إلى (2100) ريشة في المتر .

أما سماكة الريش فتتراوح بين (0.05-0.25 mm)، أما ارتفاع الريشة فيتراوح بين (2-25 mm). إن المسترجع الحراري ذي الصفائح المريشة الذي تكون كثافة الريش فيه (600) ريشة في المتر يقدم كثافة مساحة سطح التبادل الحراري حوالي ($1300 \text{ m}^2/\text{m}^3$) .

يصنع هذا النوع من المسترجعات الحرارية بجميع الأشكال والأحجام وبأنواع مختلفة من المواد، وأهم ما يميز هذا النوع من المسترجعات الحرارية أنها أصغر حجماً من مكافئاتها من المسترجعات.

تم إنتاج هذا النوع من المسترجعات الحرارية منذ (1910) على نطاق ضيق في صناعة السيارات باستخدام النحاس، وتطور استخدامه في (1940) في صناعة الطائرات (باستخدام الألمنيوم)، كما يستخدم في عمليات إسالة الغازات حيث يكون مصنوعاً من الألمنيوم وذلك بسبب خصائصه الميكانيكية الجيدة عند درجات الحرارة المنخفضة.

أما الآن فيستخدم بشكل واسع في محطات توليد الطاقة وخاصة في العنفات الغازية ولا سيما في أنظمة استرجاع الحرارة [9] .

وهكذا نرى أن المسترجعات الحرارية الصفائحية ذات الريش شائعة الاستخدام في المسترجعات الحرارية من نوع غاز- غاز حيث تكون معاملات انتقال الحرارة منخفضة أو عندما تكون فعالية المسترجع المطلوب مرتفعة.

فهي تتميز بسطوح انتقال حراري ذات كثافة عالية، كما تتميز بشيء من المرونة في اختيار كثافة السطح المناسب.

ويمكن تغيير ارتفاع المسار (أي المسافة الفاصلة بين الصفائح) بسهولة في كل من جانبي المائع، كما يمكن استخدام أنواع مختلفة من الريش وذلك لتحقيق أفضل أداء في التطبيقات المختلفة.

كما أن سماكة الريش وعددها قد تتغير بشكل مستقل عن الآخر في كل من جانبي المائعين، فإذا كانت الريش متموجة (غير بسيطة) فإنه يمكن شد أو ضغط هذه الريش لكي تلائم تغير خطوة الريشة وهذا ما يعطي هذا النوع من المسترجعات مرونة إضافية.

إن الريش في كل جانب يمكن أن ترتب كترتيب الجريان الكلي الذي يشكله المائعان كالجريان المتعامد أو المتوازي أو المتعاكس.

لا يتم استخدام هذا النوع من المسترجعات عادة في التطبيقات التي تحتوي على ملوثات ثقيلة وذلك لصعوبة تنظيفها إلا أن تصميم المسترجع على شكل وحدات صغيرة مكعدة بالطول والعرض والارتفاع واستخدام بعض المواد الكيميائية الخاصة للتنظيف أو استخدام تدفق الهواء بضغط عالي يمكن استخدامه في التطبيقات التي تحتوي على مواد ملوثة.

إن اختيار سطح الريش يعتمد على درجة حرارة التشغيل وعلى نوع المادة المستخدمة في صناعة المسترجع، ففي التطبيقات ذات درجات الحرارة المنخفضة فإن استخدام الوصلات الميكانيكية أو اللحام يكون كافياً، ويتم تصنيع الريش من النحاس الأصفر أو النحاس الأحمر أو من خلائط معينة وبالتالي لا بد من صيانتها للحفاظ على فعالية مرتفعة.

وبالنسبة للتطبيقات ذات درجات الحرارة المرتفعة فإن هناك تقنيات خاصة للحام، كما يمكن استخدام الستانلس ستيل وبعض الخلائط الخاصة، إلا أن هذا قد يخفض مردود الريش نظراً لانخفاض معامل التوصيل الحراري لها، وبالتالي فإن اختيار سطح ذي أداء عالي ومناسب يستخدم لتعويض الانخفاض المحتمل في مردود الريش.

إن الكلفة عامل مهم وأساسي في اختيار نوع المسترجع ومواده، فسطح المسترجع الصفائحي ذي الريش أقل تكلفة من المسترجع الأنبوبي ذي الريش المكافئ له، وفي معظم التطبيقات فإننا لا نختار الريش ذات الأداء الأفضل وإنما ذات الكلفة الأقل إذا كانت تقوم بالأداء المطلوب أي تلبي معايير الأداء المطلوبة للتطبيق المحدد، وهنا لا نستخدم ريش من نوع (ذات الإزاحة الطولية أو ذات الكوة) وذلك لكونها أكثر كلفة على الرغم من أنها ذات أداء أفضل [12].

والآن سنناقش بشكل نوعي سلوك وأداء انواع مختلفة من الريش المستخدمة في المسترجع الصفائحي ذي الريش :

1. الريش العادية (البسيطة) : وهي تشكل سطوح مستمرة وغير منقطعة، وذلك في اتجاه تدفق المائع، وعلى الرغم من ذلك فإن الممرات ذات المقاطع المثلثية أو المستطيلة هي الأكثر شيوعاً ، كما يمكن تشكيل أشكال أكثر تعقيداً بالاعتماد على قدرة المادة المصنوعة منها الريش على التشكيل.

وعلى الرغم من ذلك فإن الريش المتموجة تكون أرخص ثمناً ويمكن تصنيعها بسرعة أكبر كما تتميز بمرونة أكبر من حيث قدرة الريشة على تغيير الخطوة، وبشكل عام فإنها ليست بقوة الريش البسيطة ذات المقطع المستطيل وذلك عند نفس حجم المسارات وسماكة الريش.

يستخدم هذا النوع من الريش في التطبيقات التي يكون فيها عدد رينولدز منخفض، وذلك لأن الاستفادة الأنواع الأخرى من الريش من ارتفاع معامل الانتقال الحراري يقل كثيراً بينما تزداد التكلفة عند نفس عدد رينولدز المنخفض، كما تستخدم في التطبيقات التي يكون فيها هبوط الضغط المسموح به منخفض ولا تستطيع فيها الريش ذات السطوح المتقاطعة من تحقيقه.

2. الريش المتموجة : تتميز سطوح هذه الريش بأنها غير مستوية وغير مصقولة في اتجاه تدفق المائع الرئيسي، وتتميز بأشكال عرضية مشابهة لسطوح الريش البسيطة إن تموج السطح باتجاه تدفق المائع يزود هذا التدفق بتوقفات فعالة تزيد من فعالية الانتقال الحراري، وبالتالي فإن معامل انتقال الحرارة لهذا النوع من الريش أعلى من معامل انتقال الحرارة للريش العادية (البسيطة) المكافئة، إلا أنه أخفض من معامل انتقال الحراري للسطوح المتقاطعة كالريش (ذات الإزاحة الطولية وذات الكوة) .

وبما أنه لا يوجد انقطاعات في السطح فإن هذا النوع من الريش يستخدم في التطبيقات التي تكون فيها الريش ذات السطوح المتقاطعة خاضعة لتلوث محتمل أو انسدادات نتيجة وجود بعض الجسيمات الغريبة أو تشكل مواد ناتجة عن التكاثر.

3. الريش ذات الإزاحة الطولية : وهي من أكثر الأنواع توافراً واستخداماً في هذا النوع من المسترجعات نتيجة خصائصها الهندسية المميزة، وتتمتع هذه الريش بمقاطع مستطيلة الشكل حيث يتم تقطيع السطح إلى شرائح صغيرة بطول (ls)، كما يتم إزاحة كل صف بحوالي (50%)

من خطوة الريشة بالاتجاه العرضي، هذا وتعتبر المسافة الفاصلة بين الريش وارتفاع الريش بالإضافة إلى سماكة الريش وطول الريشة من المتحولات الرئيسية في تصميم المسترجع.

إن معامل الانتقال الحراري لهذا النوع من الريش أكبر بـ (4-1.5) مرات من معامل الانتقال الحراري للريش العادية (البسيطة)، وعند التصميم بشكل مناسب فإن المسترجع الحراري الذي يستخدم هذا النوع من الريش يتطلب مساحة سطح انتقال حراري أخفض بكثير من المساحة المطلوبة في حال استخدام الريش البسيطة وذلك عند نفس هبوط الضغط.

إن تحسين عملية الانتقال الحراري في هذا النوع من الريش ناتج عن إعادة تطوير طبقات الجريان الصفائحي ($Re \leq 10000$)، وعلى أية حال إذا كان ($Re > 10000$) فإنها تعمل كسطح خشن (أي تكون هناك قيمة ثابتة لمعامل الاحتكاك (f) مع زيادة المعامل (j) وذلك كلما ازداد عدد رينولدز.

ويستخدم عادة هذا النوع من الريش في المجال ($500 \leq Re \leq 10000$) ومن أجل الحصول على انتقال حراري وهبوط ضغط محدد فإن هذا النوع من الريش يتطلب مساحة سطح أمامي أكبر من تلك التي تحققها الريش البسيطة وطول مجرى تدفق أقصر وبالتالي يكون الحجم الكلي أصغر.

وينصح باستخدام هذا النوع من الريش في الصناعات التي تتطلب أداء انتقال حراري مرتفع كأنظمة استرجاع الحرارة.

4. الريش ذات الكوة : يتم تشكيل هذا النوع من الريش من خلال تقسيم المعدن وبعدها تشكيله من خلال ضغط القطع من القاعدة المعدنية المستندة عليها، ويمكن أن تصنع هذه الريش بأشكال مختلفة.

إن خطوة هذا النوع من الريش والتي يشار إليها أيضاً على أنها عرض الكوة وزاويتها بالإضافة إلى المسافة الفاصلة بين الريش وارتفاع الريشة تعتبر من أهم الخصائص الهندسية المؤثرة على سطح الانتقال الحراري وخصائص وقيم معاملات الاحتكاك.

فعلى المستوى المطلق فإن المعامل (j) في هذا النوع من الريش أعلى منه في حالة الريش ذات الإزاحة عند نفس عدد رينولدز، وحتى أن المعامل (f) في هذا النوع من الريش أعلى منه في حالة الريش ذات الإزاحة عند نفس عدد رينولدز أيضاً ، وبما أن هذا النوع من الريش ذي مقطع مثلي فإنه ليس بصلابة وقوة الريش ذات الإزاحة، إلا أنه يكون أرخص ثمناً منه وذلك عند إنتاجه بكميات كبيرة.

ويمكن التحكم بأداء الريش ضمن مجال واسع وذلك من خلال تغيير زاوية الكوة وعرضها، ويستخدم عادة هذا النوع من الريش في المجال ($100 \leq Re \leq 5000$) وينصح باستخدام هذا النوع من الريش في صناعة الآليات.

5. الريش المثقبة : يتميز هذا النوع من السطوح بوجود ثقب مستديرة أو مستطيلة بأحجام وأشكال مختلفة يفصل بينها فواصل طولية أو عرضية وتتميز بمسارات ذات مقطع مثلي.

إن وجود هذه الثقوب يقطع الجريان وبالتالي قد يزداد معامل الانتقال الحراري بعض الشيء إلا أننا نخسر جزء جيد من مساحة سطح الانتقال الحراري، وبالتالي فإننا لا نحقق الاستفادة المطلوبة، لذلك فإن هذا النوع من الريش يستخدم في عدد محدود من التطبيقات [12] .

5-2: اختيار المسترجع الحراري للعنفة الغازية نوع (6 Nuovo Pignone Frame):

إن المسترجع الحراري الذي تم اختياره حسب المعطيات السابقة هو مسترجع حراري ذي الصفائح المريشة ، وتكون الريش ذات الإزاحة الطولية ويتم اختيار الجريان المتصالب الغير المختلط حيث يتم جريان كل من الهواء المضغوط وغازات العادم دون أن يحصل اختلاط بينها و ذلك للأسباب التالية :

- يستخدم بشكل واسع في محطات توليد الطاقة وخاصة في العنفات الغازية ولاسيما في أنظمة استرجاع الحرارة.
- هذا النوع من المسترجعات الحرارية أصغر حجماً من مكافئاتها من المسترجعات، فهي تشكل حوالي (10 %) من حجم المسترجع الأنبوبي المكافئ لها في بعض الحالات.
- إن الكلفة عامل مهم وأساسي في اختيار نوع المسترجع ومواده، فسطح المسترجع الصفائحي ذي الريش أقل تكلفة من المسترجع الأنبوبي ذي الريش المكافئ له.

- يتحمل فروق ضغط كبيرة بين كل من الحزمتين الباردة و الساخنة حيث أن المسترجع الدوار لا يمكن أن يتحمل فرق ضغط بين كل من الحزمتين أكثر من (4bar).

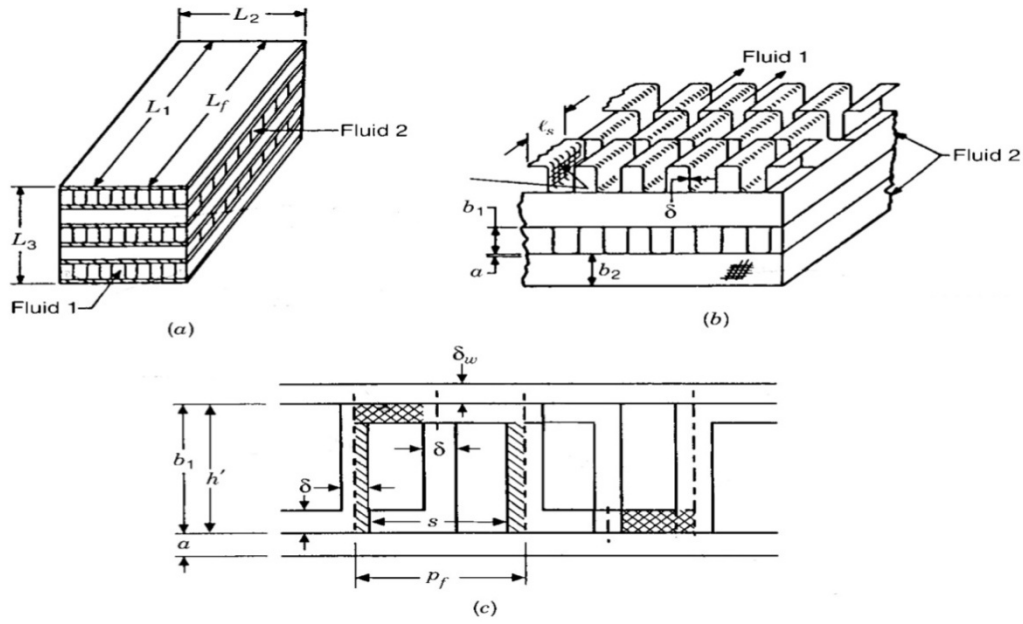
- وينصح باستخدام هذا النوع من الريش في الصناعات التي تتطلب أداء انتقال حراري مرتفع كأنظمة استرجاع الحرارة.

يوجد هناك أنواع عديدة من المعادن الممكن إستخدامها ولكن حسب توصيات المنظمة الأمريكية لمهندسي الميكانيك (ASME) فإن أفضل نوع ممكن إستخدامه في هذه الحالة هو الخليطة ذات الرقم [13] Inconel – 625

3-5: المواصفات الهندسية للمسترجع المدروس:

يتم إختيار المواصفات الهندسية للمسترجع المدروس كما يلي [9] :

- المسافة بين صفيحتين أوارتفاع الريشة من جهة غازات العادم : $b_g = b_1 = 10 \text{ mm}$.
- المسافة بين صفيحتين أوارتفاع الريشة من جهة الهواء المضغوط : $b_a = b_2 = 10 \text{ mm}$.
- سماكة الجدار (الصفيحة) : $\delta_w = 0.1 \text{ mm}$.
- سماكة الريشة : $\delta = 0.1 \text{ mm}$.
- طول إزاحة الريشة : $l_s = 9 \text{ mm}$.
- عدد الريش في كل مسار $n'_f = 500$.



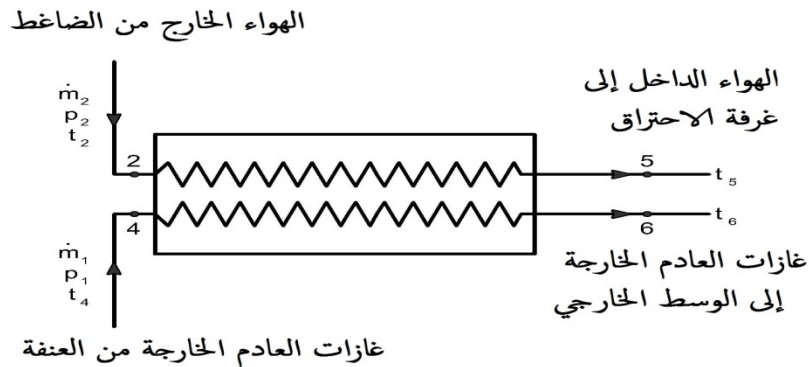
الشكل (5-9) : الأبعاد الهندسية للمسترجع الحراري

(a): المسترجع الحراري ذي الصفائح المريشة - (b): المواصفات الهندسية للريش ذات الإزاحة الطولية

(c): مقطع صغير في الريش ذات الإزاحة الطولية

4-5: التصميم الحراري للمسترجع:

يتم التصميم للعنفة المختارة باستخدام التسخين الاسترجاعي لزيادة درجة حرارة الهواء بعد الضاغط حسب المخطط الحراري للمسترجع الشكل (5-10) خلال فصل الشتاء وذلك لأن درجة حرارة خروج غازات العادم شتاء أخفض منها صيفاً، وبالتالي يكون التصميم على أساس أخفض درجة حرارة لخروج غازات العادم.



الشكل (5-10) : المخطط الحراري للمسترجع

5-4-1: بارامترات غازات العادم الخارجة من العنفة و الداخلة إلى المسترجع:

- درجة حرارة غازات العادم الداخلة للمسترجع $t_4 = 450 \text{ }^{\circ}\text{C}$
- التدفق الكتلي لغازات العادم الداخلة للمسترجع $\dot{m}_1 = 145.29 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$
- ضغط غازات العادم الداخلة للمسترجع $p_1 = 1.057 \text{ bar}$

5-4-2: بارامترات الهواء الخارج من الضاغط و الداخل إلى المسترجع:

- درجة حرارة الهواء المضغوط الداخل للمسترجع $t_2 = 293 \text{ }^{\circ}\text{C}$
- التدفق الكتلي للهواء المضغوط الداخل للمسترجع $\dot{m}_2 = 124.46 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$
- ضغط الهواء المضغوط الداخل للمسترجع $p_2 = 7.8 \text{ bar}$

5-4-3: إيجاد درجة حرارة الهواء المضغوط الخارج من المسترجع:

من خلال معادلة فعالية المسترجع يمكن إيجاد درجة حرارة الهواء المضغوط الخارج منه كما يلي :

$$\varepsilon = \frac{h_5 - h_2}{h_4 - h_2} = \frac{T_5 - T_2}{T_4 - T_2} \dots \dots \dots (1 - 5)$$

وبالتعويض نجد :

$$0.7 = \frac{t_5 - 293}{450 - 293}$$

$$t_5 = 402.9 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

5-4-4: حساب استطاعة المسترجع:

يتم حساب استطاعة المسترجع من خلال المعادلة التالية :

$$Q = \dot{m}_2 C_{p2}(t_5 - t_2) = \dot{m}_1 C_{p1}(t_4 - t_6) \dots \dots \dots (2 - 5)$$

لذا لا بد من حساب السعة الحرارية بثبات الضغط لكل من الهواء المضغوط وغازات العادم، أي (C_{p2}) و (C_{p1}) ، ويتم حسابها كما يلي :

إن السعة الحرارية لغازات العادم هي مجموع السعات الحرارية للعناصر المكونة لغازات العادم مضروبة بنسبتها الحجمية :

$$C_{pg} = \sum r_k \times C_{pk} \dots \dots \dots (3 - 5)$$

تحتسب السعة الحرارية الوسطية لكل من العناصر المكونة لغازات العادم في مجال درجات الحرارة $[450 - 0 ^\circ\text{C}]$ وذلك بالأخذ بعين الاعتبار أن علاقة السعة الحرارية بدرجة الحرارة خطية وذلك من خلال العلاقات التالية [5]:

• للأزوت :

$$C_{p_{N_2}} = 1.024 + 0.00008855(450) = 1.064 \frac{kJ}{Kg.deg}$$

• لغاز ثاني أكسيد الكربون :

$$C_{p_{CO_2}} = 0.8654 + 0.0002443(450) = 0.975 \frac{kJ}{Kg.deg}$$

• لبخار الماء :

$$C_{p_{H_2O}} = 1.833 + 0.0003111(450) = 1.973 \frac{kJ}{Kg.deg}$$

• للأكسجين :

$$C_{p_{O_2}} = 0.9203 + 0.0001065(450) = 0.968 \frac{kJ}{Kg.deg}$$

وبالتالي يكون :

$$C_{p_g} = C_{p_1} = C_{p_{N_2}} r_{N_2} + C_{p_{CO_2}} r_{CO_2} + C_{p_{H_2O}} r_{H_2O} + C_{p_{O_2}} r_{O_2} \dots \dots \dots (4 - 5)$$

وبالتعويض:

$$C_{p_g} = C_{p_1} = 1.064 \times 0.67 + 0.975 \times 0.08 + 1.973 \times 0.107 + 0.968 \times 0.143$$

$$C_{p_g} = C_{p_1} = 1.14 \frac{kJ}{Kg.deg}$$

والآن لنحسب السعة الحرارية للهواء المضغوط عند الضغط $p_2 = 7.8 \text{ bar}$ ودرجة حرارة وسطية بين الدخول للمسترجع والخروج منه أي بين درجتَي الحرارة $[402.9 - 293 ^\circ\text{C}]$ وذلك من [6] :

$$C_{p_{air}} = C_{p_2} = 1.05 \frac{kJ}{Kg.deg}$$

وبالتالي تكون استطاعة المسترجع :

$$Q = 124.46 \times 1.05 \times (402.9 - 293) = 14375.13 \text{ KW}$$

$$Q = 14.375 \text{ MW}$$

5-4-5: إيجاد درجة حرارة خروج غازات العادم من المسترجع:

يمكن حساب درجة حرارة خروج غازات العادم من المسترجع من خلال المعادلة :

$$Q = \dot{m}_2 C_{p2}(t_5 - t_2) = \dot{m}_1 C_{p1}(t_4 - t_6) \dots \dots \dots (5 - 5)$$

بالتعويض :

$$14375.13 = 145.29 \times 1.14 \times (450 - t_6)$$

وبالتالي :

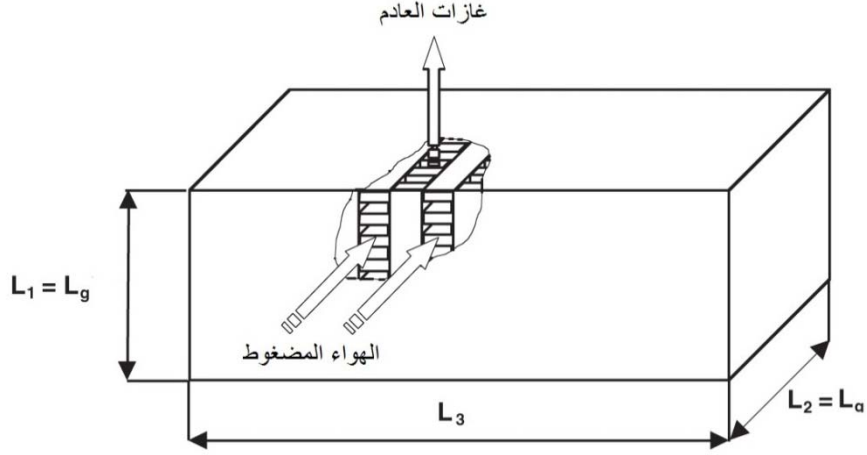
$$t_6 = 363.2 \text{ } ^\circ\text{C}$$

5-4-6: آلية تصميم المسترجع:

إن تحديد أبعاد المسترجع التي تحقق الحمل الحراري المطلوب يتم تحت شرط أساسي وهو أن يكون هبوط ضغط غازات الاحتراق عند مرورها في المسترجع ضمن المجال $(0.024 - 0.042)\text{bar}$ [7].

ولتحقيق ذلك نقوم بأخذ عدة مقاطع للمسترجع ومراقبة الحمل الحراري حتى الوصول للحمل الحراري المطلوب، وبعد ذلك نتأكد من أن هبوط الضغط لغازات الاحتراق في المسترجع المختار والذي يحقق الحمل الحراري المطلوب ضمن المجال المسموح به.

يبين الشكل (5-11) مقطع مرور غازات العادم والهواء المضغوط في المسترجع المختار، وبالتالي سنقوم بتهيئة مقطع مرور غازات الاحتراق وهو $(L_2 \times L_3)$ باعتبار مجرى غازات الاحتراق محدد بـ $m (3.5 \times 3.5)$ ونقوم بتغيير (L_1) حتى الوصول للحمل المطلوب من المسترجع.



الشكل (5-11) : الأبعاد الأساسية للمسترجع الحراري

7-4-5: تحديد جداء معامل الانتقال الحراري الكلي في مساحة سطح التبادل الحراري (UA) المطلوب من المسترجع:

يمكن تحديد الحمل الحراري المطلوب من خلال المعادلة:

$$\dot{Q} = AU\Delta T_{lm} \dots \dots \dots (6 - 5)$$

حيث :

$\dot{Q}$: الحمل الحراري للمسترجع.

ΔT_{lm} : درجة الحرارة الوسطية اللوغاريتمية وتعطى بالعلاقة

$$\Delta T_{lm} = \frac{\Delta T_I - \Delta T_{II}}{\ln \frac{\Delta T_I}{\Delta T_{II}}} \dots \dots \dots (7 - 5)$$

$$\Delta T_I = t_4 - t_5$$

$$\Delta T_{II} = t_6 - t_2$$

U: معامل الانتقال الحراري الإجمالي.

A: مساحة سطح التبادل الحراري.

$$\Delta T_I = 450 - 402.9 = 47.1$$

$$\Delta T_{II} = 363.2 - 293 = 70.2$$

وبالتالي :

$$\Delta T_{lm} = \frac{47.1 - 70.2}{\ln \frac{47.1}{70.2}} = \frac{-23.1}{-0.399} = 57.9$$

نعوض في العلاقة الأساسية :

$$UA = \frac{\dot{Q}}{\Delta T_{lm}} = \frac{14375000}{57.9} = 248272.88 \frac{W}{K}$$

5-4-8: حساب البارامترات الأساسية للمسترجع الحراري المدروس:

5-4-8-1: حساب الطول الذي يتم فيه مرور المائع باتجاه كل من غازات العادم و الهواء المضغوط:

• غازات العادم :

$$L_{f,g} = L_1 - \ell_s [m] \dots \dots \dots (8 - 5)$$

• الهواء المضغوط :

$$L_{f,a} = L_2 - \ell_s [m] \dots \dots \dots (9 - 5)$$

الجدول (5-1) : الطول الذي يتم فيه مرور المائع باتجاه غازات العادم والهواء المضغوط عند قيم مختلفة لـ (L1)

L1	L2	L3	L _{f,g}	L _{f,a}
0.5	3.5	3.5	0.41	3.41
1	3.5	3.5	0.91	3.41
1.5	3.5	3.5	1.41	3.41
2	3.5	3.5	1.91	3.41
2.5	3.5	3.5	2.41	3.41
3	3.5	3.5	2.91	3.41
3.5	3.5	3.5	3.41	3.41
4	3.5	3.5	3.91	3.41
4.5	3.5	3.5	4.41	3.41
5	3.5	3.5	4.91	3.41

5-4-8-2: حساب عدد الممرات الكلي لمرور كل من غازات العادم و الهواء المضغوط:

• غازات العادم :

$$N_{p,g} = \frac{L_3 - b_a + 2\delta_w}{b_g + b_a + 2\delta_w} \dots \dots \dots (10 - 5)$$

- الهواء المضغوط :

$$N_{p,a} = N_{p,g} + 1 \dots \dots (11 - 5)$$

الجدول (5-2) : عدد الممرات الكلي باتجاه غازات العادم والهواء المضغوط عند قيم مختلفة لـ (L1)

L1	L2	L3	Np,g	Np,a
0.5	3.5	3.5	172	173
1	3.5	3.5	172	173
1.5	3.5	3.5	172	173
2	3.5	3.5	172	173
2.5	3.5	3.5	172	173
3	3.5	3.5	172	173
3.5	3.5	3.5	172	173
4	3.5	3.5	172	173
4.5	3.5	3.5	172	173
5	3.5	3.5	172	173

3-8-4-5: تحديد خطوة الريشة باتجاه كل من غازات العادم و الهواء المضغوط:

- باتجاه غازات العادم:

$$p_{f,g} = \frac{L_2}{n'_f} [m] \dots \dots (12 - 5)$$

- باتجاه الهواء المضغوط :

$$p_{f,a} = \frac{L_1}{n'_f} [m] \dots \dots (13 - 5)$$

الجدول (5-3) : خطوة الريشة باتجاه غازات العادم والهواء المضغوط عند قيم مختلفة لـ (L1)

L1	L2	L3	Pf,g	Pf,a
0.5	3.5	3.5	0.007	0.001
1	3.5	3.5	0.007	0.002
1.5	3.5	3.5	0.007	0.003
2	3.5	3.5	0.007	0.004
2.5	3.5	3.5	0.007	0.005
3	3.5	3.5	0.007	0.006
3.5	3.5	3.5	0.007	0.007
4	3.5	3.5	0.007	0.008
4.5	3.5	3.5	0.007	0.009
5	3.5	3.5	0.007	0.01

4-8-4-5: تحديد العدد الكلي للريش باتجاه كل من غازات العادم و الهواء المضغوط:

- باتجاه غازات العادم :

$$n_{f,g} = n'_f \times N_{p,g} \dots \dots \dots (14 - 5)$$

- بالنسبة لغازات العادم :

$$n_{f,a} = n'_f \times N_{p,a} \dots \dots \dots (15 - 5)$$

الجدول (4-5) : العدد الكلي للريش باتجاه غازات العادم والهواء المضغوط عند قيم مختلفة لـ (L1)

L1	L2	L3	$n_{f,g}$	$n_{f,a}$
0.5	3.5	3.5	86000	86500
1	3.5	3.5	86000	86500
1.5	3.5	3.5	86000	86500
2	3.5	3.5	86000	86500
2.5	3.5	3.5	86000	86500
3	3.5	3.5	86000	86500
3.5	3.5	3.5	86000	86500
4	3.5	3.5	86000	86500
4.5	3.5	3.5	86000	86500
5	3.5	3.5	86000	86500

5-8-4-5: تحديد عدد إزاحات الريش باتجاه كل من غازات العادم و الهواء المضغوط:

- باتجاه غازات العادم :

$$n_{\text{off},g} = \frac{L_{f,g}}{\ell_s} \dots \dots \dots (16 - 5)$$

- بالنسبة لغازات العادم :

$$n_{\text{off},a} = \frac{L_{f,a}}{\ell_s} \dots \dots \dots (17 - 5)$$

الجدول (5-5) : عدد إزاحات الريش باتجاه غازات العادم والهواء المضغوط عند قيم مختلفة لـ (L1)

L1	L2	L3	noff,g	noff,a
0.5	3.5	3.5	4	37
1	3.5	3.5	10	37
1.5	3.5	3.5	15	37
2	3.5	3.5	21	37
2.5	3.5	3.5	26	37
3	3.5	3.5	32	37
3.5	3.5	3.5	37	37
4	3.5	3.5	43	37
4.5	3.5	3.5	49	37
5	3.5	3.5	54	37

5-4-8-6: حساب مساحة السطح الرئيسي (الأولي) باتجاه كل من غازات العادم و الهواء المضغوط.

• لغازات العادم :

$$A_{P,g} = 2L_1L_2N_{p,g} - 2\delta L_{f,g} n_{f,g} + 2b_1L_1N_{p,g} + 2(b_2 + 2\delta_w) \times (N_{p,a})L_2 [m^2] \dots \dots \dots (18 - 5)$$

• للهواء المضغوط :

$$A_{P,a} = 2L_1L_2N_{p,a} - 2\delta L_{f,a} n_{f,a} + 2b_2L_2N_{p,a} + 2(b_1 + 2\delta_w) \times (N_{p,g})L_2 [m^2] \dots \dots \dots (19 - 5)$$

الجدول (5-6) : مساحة السطح الرئيسي (الأولي) باتجاه غازات العادم و الهواء المضغوط عند قيم مختلفة لـ (L1)

L1	L2	L3	Ap,g	Ap,a
0.5	3.5	3.5	609.0202	560.3714
1	3.5	3.5	1204.14	1167.626
1.5	3.5	3.5	1799.26	1774.88
2	3.5	3.5	2394.38	2382.135
2.5	3.5	3.5	2989.5	2989.389
3	3.5	3.5	3584.62	3596.643
3.5	3.5	3.5	4179.74	4203.898
4	3.5	3.5	4774.86	4811.152
4.5	3.5	3.5	5369.98	5418.407
5	3.5	3.5	5965.1	6025.661

7-8-4-5: حساب مساحة السطح الثانوي (الريش) باتجاه كل من غازات العادم و الهواء المضغوط:

• لغازات العادم :

$$A_{f,g} = 2(b_1 - \delta)L_{f,g} n_{f,g} + 2(b_1 - \delta)\delta n_{off,g} n_{f,g} + (p_{f,g} - \delta)\delta(n_{off,g} - 1)n_{f,g} + 2p_{f,g}\delta n_{f,g} [m^2] \dots \dots \dots (20 - 5)$$

• للهواء المضغوط :

$$A_{f,a} = 2(b_2 - \delta)L_{f,a} n_{f,a} + 2(b_2 - \delta)\delta n_{off,a} n_{f,a} + (p_{f,a} - \delta)\delta(n_{off,a} - 1)n_{f,a} + 2p_{f,a}\delta n_{f,a} [m^2] \dots \dots \dots (21 - 5)$$

الجدول (7-5) : مساحة السطح الثانوي (الريش) باتجاه غازات العادم و الهواء المضغوط عند قيم مختلفة لـ (L1)

L1	L2	L3	Af,g	Af,a
0.5	3.5	3.5	699.1275	5846.942
1	3.5	3.5	1551.905	5847.27
1.5	3.5	3.5	2404.453	5847.599
2	3.5	3.5	3257.231	5847.928
2.5	3.5	3.5	4109.779	5848.256
3	3.5	3.5	4962.557	5848.585
3.5	3.5	3.5	5815.105	5848.914
4	3.5	3.5	6667.883	5849.242
4.5	3.5	3.5	7520.66	5849.571
5	3.5	3.5	8373.209	5849.9

8-8-4-5: حساب مساحة السطح الكلي باتجاه كل من غازات العادم و الهواء المضغوط.

• لغازات العادم :

$$A_g = A_{p,g} + A_{f,g} [m^2] \dots \dots \dots (22 - 5)$$

• للهواء المضغوط :

$$A_a = A_{p,a} + A_{f,a} [m^2] \dots \dots \dots (23 - 5)$$

الجدول (5-8) : مساحة السطح الكلي باتجاه غازات العادم و الهواء المضغوط عند قيم مختلفة لـ (L1)

L1	L2	L3	Ag	Aa
0.5	3.5	3.5	1308.148	6407.313
1	3.5	3.5	2756.045	7014.896
1.5	3.5	3.5	4203.714	7622.479
2	3.5	3.5	5651.611	8230.062
2.5	3.5	3.5	7099.279	8837.645
3	3.5	3.5	8547.177	9445.228
3.5	3.5	3.5	9994.845	10052.81
4	3.5	3.5	11442.74	10660.39
4.5	3.5	3.5	12890.64	11267.98
5	3.5	3.5	14338.31	11875.56

9-8-4-5: حساب كثافة مساحة السطح باتجاه كل من غازات العادم و الهواء المضغوط:

• لغازات العادم :

$$\beta_g = \frac{A_g}{L_1 L_2 (b_1 N_{p,g})} \left[\frac{m^2}{m^3} \right] \dots \dots \dots (24 - 5)$$

• للهواء المضغوط :

$$\beta_a = \frac{A_a}{L_1 L_2 (b_2 N_{p,a})} \left[\frac{m^2}{m^3} \right] \dots \dots \dots (25 - 5)$$

الجدول (5-9) : كثافة مساحة السطح باتجاه غازات العادم و الهواء المضغوط عند قيم مختلفة لـ (L1)

L1	L2	L3	β_g	β_a
0.5	3.5	3.5	434.6006	2116.371
1	3.5	3.5	457.8149	1158.529
1.5	3.5	3.5	465.5275	839.249
2	3.5	3.5	469.4029	679.6088
2.5	3.5	3.5	471.7129	583.8246
3	3.5	3.5	473.2656	519.9685
3.5	3.5	3.5	474.3638	474.357
4	3.5	3.5	475.197	440.1484
4.5	3.5	3.5	475.845	413.5417

10-8-4-5: حساب مساحة التدفق الحر الأصغرية باتجاه كل من غازات العادم و الهواء المضغوط.

• لغازات العادم :

$$A_{0,g} = b_1 L_2 N_{p,g} - [(b_1 - \delta) + p_{f,g}] \delta n_{f,g} [m^2] \dots \dots \dots (26 - 5)$$

- للهواء المضغوط :

$$A_{0,a} = b_2 L_1 N_{p,a} - [(b_2 - \delta) + p_{f,a}] \delta n_{f,a} [m^2] \dots \dots \dots (27 - 5)$$

الجدول (5-10) : مساحة التدفق الحر الأصغري باتجاه غازات العادم و الهواء المضغوط عند قيم مختلفة لـ (L1)

L1	L2	L3	A0,g	A0,a
0.5	3.5	3.5	5.87466	0.770715
1	3.5	3.5	5.87466	1.627065
1.5	3.5	3.5	5.87466	2.483415
2	3.5	3.5	5.87466	3.339765
2.5	3.5	3.5	5.87466	4.196115
3	3.5	3.5	5.87466	5.052465
3.5	3.5	3.5	5.87466	5.908815
4	3.5	3.5	5.87466	6.765165
4.5	3.5	3.5	5.87466	7.621515
5	3.5	3.5	5.87466	8.477865

5-4-8-11: حساب مساحة التدفق الأمامية باتجاه كل من غازات العادم و الهواء المضغوط:

- لغازات العادم :

$$A_{fr,g} = L_2 L_3 [m^2] \dots \dots \dots (28 - 5)$$

- للهواء المضغوط :

$$A_{fr,a} = L_1 L_3 [m^2] \dots \dots \dots (29 - 5)$$

الجدول (5-11) : مساحة التدفق الأمامية باتجاه غازات العادم و الهواء المضغوط عند قيم مختلفة لـ (L1)

L1	L2	L3	Afr,g	Afr,a
0.5	3.5	3.5	12.25	1.75
1	3.5	3.5	12.25	3.5
1.5	3.5	3.5	12.25	5.25
2	3.5	3.5	12.25	7
2.5	3.5	3.5	12.25	8.75
3	3.5	3.5	12.25	10.5
3.5	3.5	3.5	12.25	12.25
4	3.5	3.5	12.25	14
4.5	3.5	3.5	12.25	15.75
5	3.5	3.5	12.25	17.5

5-4-8-12: حساب نسبة مساحة التدفق الحر الأصغرية إلى مساحة التدفق الأمامية باتجاه كل من غازات العادم و الهواء المضغوط:

• لغازات العادم :

$$\sigma_g = \frac{A_{0,g}}{A_{fr,g}} \dots \dots \dots (30 - 5)$$

• للهواء المضغوط :

$$\sigma_a = \frac{A_{0,a}}{A_{fr,a}} \dots \dots \dots (31 - 5)$$

الجدول (5-12) : نسبة مساحة التدفق الحر الأصغرية إلى مساحة التدفق الأمامية باتجاه غازات العادم و الهواء المضغوط عند قيم مختلفة لـ (L1)

L1	L2	L3	σ_g	σ_a
0.5	3.5	3.5	0.479564	0.440409
1	3.5	3.5	0.479564	0.464876
1.5	3.5	3.5	0.479564	0.473031
2	3.5	3.5	0.479564	0.477109
2.5	3.5	3.5	0.479564	0.479556
3	3.5	3.5	0.479564	0.481187
3.5	3.5	3.5	0.479564	0.482352
4	3.5	3.5	0.479564	0.483226
4.5	3.5	3.5	0.479564	0.483906
5	3.5	3.5	0.479564	0.484449

5-4-8-13: حساب القطر الهيدروليكي لممرات تدفق كل من غازات العادم والهواء المضغوط:

• لغازات العادم :

$$D_{h,g} = \frac{4 A_{0,g} L_1}{A_g} [m] \dots \dots \dots (32 - 5)$$

• للهواء المضغوط :

$$D_{h,a} = \frac{4 A_{0,a} L_2}{A_a} [m] \dots \dots \dots (33 - 5)$$

الجدول (5-13) : القطر الهيدروليكي لممرات تدفق كل من غازات العادم والهواء المضغوط عند قيم مختلفة لـ (L1)

L1	L2	L3	Dh,g	Dh,a
0.5	3.5	3.5	0.008982	0.001684
1	3.5	3.5	0.008526	0.003247
1.5	3.5	3.5	0.008385	0.004561
2	3.5	3.5	0.008316	0.005681
2.5	3.5	3.5	0.008275	0.006647
3	3.5	3.5	0.008248	0.007489
3.5	3.5	3.5	0.008229	0.008229
4	3.5	3.5	0.008214	0.008885
4.5	3.5	3.5	0.008203	0.009469
5	3.5	3.5	0.008194	0.009994

14-8-4-5: حساب مساحة التوصيل للمقاومة الحرارية للجدار:

$$A_W = 2L_1L_2N_{p,g} [m^2] \dots \dots \dots (34 - 5)$$

الجدول (5-14) : مساحة التوصيل للمقاومة الحرارية للجدار عند قيم مختلفة لـ (L1)

L1	L2	L3	Aw
0.5	3.5	3.5	605.5
1	3.5	3.5	1211
1.5	3.5	3.5	1816.5
2	3.5	3.5	2422
2.5	3.5	3.5	3027.5
3	3.5	3.5	3633
3.5	3.5	3.5	4238.5
4	3.5	3.5	4844
4.5	3.5	3.5	5449.5
5	3.5	3.5	6055

15-8-4-5: حساب بعض الأبعاد الضرورية باتجاه كل من غازات العادم و الهواء المضغوط:

• بالنسبة لغازات العادم :

$$S_g = p_{f,g} - \delta [m] \dots \dots \dots (35 - 5)$$

$$h'_g = b_1 - \delta [m] \dots \dots \dots (36 - 5)$$

• بالنسبة للهواء المضغوط :

$$S_a = p_{f,a} - \delta [m] \dots \dots \dots (37 - 5)$$

$$h'_a = b_2 - \delta [m] \dots \dots \dots (38 - 5)$$

الجدول (5-15) : بعض الأبعاد الضرورية باتجاه غازات العادم و الهواء المضغوط عند قيم مختلفة لـ (L1)

L1	L2	L3	sg	sa	hg	ha
0.5	3.5	3.5	0.0069	0.0009	0.0099	0.0099
1	3.5	3.5	0.0069	0.0019	0.0099	0.0099
1.5	3.5	3.5	0.0069	0.0029	0.0099	0.0099
2	3.5	3.5	0.0069	0.0039	0.0099	0.0099
2.5	3.5	3.5	0.0069	0.0049	0.0099	0.0099
3	3.5	3.5	0.0069	0.0059	0.0099	0.0099
3.5	3.5	3.5	0.0069	0.0069	0.0099	0.0099
4	3.5	3.5	0.0069	0.0079	0.0099	0.0099
4.5	3.5	3.5	0.0069	0.0089	0.0099	0.0099
5	3.5	3.5	0.0069	0.0099	0.0099	0.0099

5-4-8-16: حساب السرعة الكتلية لكل من غازات العادم و الهواء المضغوط:

• لغازات العادم :

$$G_g = \frac{\dot{m}_g}{A_{0,g}} \left[\frac{kg}{s.m^2} \right] \dots \dots \dots (39 - 5)$$

• للهواء المضغوط :

$$G_a = \frac{\dot{m}_a}{A_{0,a}} \left[\frac{kg}{s.m^2} \right] \dots \dots \dots (40 - 5)$$

الجدول (5-16) : السرعة الكتلية باتجاه غازات العادم و الهواء المضغوط عند قيم مختلفة لـ (L1)

L1	L2	L3	Gg	Ga
0.5	3.5	3.5	24.73164	161.4864
1	3.5	3.5	24.73164	76.49356
1.5	3.5	3.5	24.73164	50.11647
2	3.5	3.5	24.73164	37.2661
2.5	3.5	3.5	24.73164	29.66077
3	3.5	3.5	24.73164	24.63352
3.5	3.5	3.5	24.73164	21.06345
4	3.5	3.5	24.73164	18.39719
4.5	3.5	3.5	24.73164	16.33009
5	3.5	3.5	24.73164	14.68058

5-4-8-17: حساب عدد رينولدز لكل من غازات العادم و الهواء المضغوط:

• لغازات العادم :

$$Re_g = \left(\frac{G \times D_h}{\mu} \right)_g \dots \dots \dots (41 - 5)$$

حيث:

μ_g : اللزوجة التحريكية لغازات العادم.

إن العناصر المكونة لغازات العادم عند درجة حرارة وسطية بين الدخول للمسترجع والخروج منه أي بين درجتي الحرارة (363.2 °C – 450 °C) وضغط قريب من الضغط الجوي [11]:

$$\mu_{N_2} = 33.5 \cdot 10^{-6} \text{ pa.s}$$

$$\mu_{CO_2} = 31 \cdot 10^{-6} \text{ pa.s}$$

$$\mu_{H_2O} = 26.5 \cdot 10^{-6} \text{ pa.s}$$

$$\mu_{O_2} = 39.45 \cdot 10^{-6} \text{ pa.s}$$

وبالتالي فإن اللزوجة التحريكية لغازات العادم ضمن المسترجع هي مجموع اللزوجات التحريكية للعناصر المكونة لغازات العادم مضروبة بنسبتها الحجمية :

$$\mu_g = \sum r_k \times \mu_k \dots \dots \dots (42 - 5)$$
$$\mu_g = 0.67 \times 33.5 \cdot 10^{-6} + 0.08 \times 31 \cdot 10^{-6} + 0.107 \times 26.5 \cdot 10^{-6} + 0.143 \times 39.45 \cdot 10^{-6} = 33.4 \cdot 10^{-6} \text{ pa.s}$$

• للهواء المضغوط :

$$Re_a = \left(\frac{G \times D_h}{\mu} \right)_a \dots \dots \dots (43 - 5)$$

حيث:

μ_a : اللزوجة التحريكية للهواء المضغوط.

ويمكن حساب اللزوجة التحريكية للهواء (μ_a) المضغوط عند الضغط $p_2 = 7.8 \text{ bar}$ ودرجة حرارة وسطية بين الدخول للمسترجع والخروج منه أي بين درجتَي الحرارة ($293^\circ\text{C} - 402.9^\circ\text{C}$) وذلك من [6]:

$$\mu = 0.272 \cdot 10^{-4} \text{ [pa.s]}$$

الجدول (5-17): عدد رينولدز باتجاه غازات العادم و الهواء المضغوط عند قيم مختلفة لـ (L1)

L1	L2	L3	Reg	Rea
0.5	3.5	3.5	6650.625	9997.997
1	3.5	3.5	6313.394	9132.038
1.5	3.5	3.5	6208.796	8404.128
2	3.5	3.5	6157.536	7783.695
2.5	3.5	3.5	6127.382	7248.57
3	3.5	3.5	6107.28	6782.292
3.5	3.5	3.5	6093.141	6372.376
4	3.5	3.5	6082.458	6009.186
4.5	3.5	3.5	6074.174	5685.163
5	3.5	3.5	6067.661	5394.296

5-4-8-18: حساب معاملات الاحتكاك (j) و (f) لهذا النوع من الريش عند عدد رينولدز المحسوب باتجاه كل من غازات العادم و الهواء المضغوط:

• لغازات العادم :

$$j_g = 0.6522 Re_g^{-0.5403} \left(\frac{S_g}{h'_g}\right)^{-0.1541} \left(\frac{\delta}{\ell_s}\right)^{0.1499} \left(\frac{\delta}{S_g}\right)^{-0.0678} \times [1 + 5.269 \cdot 10^{-5} Re_g^{1.340} \left(\frac{S_g}{h'_g}\right)^{0.504} \left(\frac{\delta}{\ell_s}\right)^{0.456} \left(\frac{\delta}{S_g}\right)^{-1.055}]^{0.1} \dots \dots \dots (44 - 5)$$

$$f_g = 9.6243 Re_g^{-0.7422} \left(\frac{S_g}{h'_g}\right)^{-0.1856} \left(\frac{\delta}{\ell_s}\right)^{0.3053} \left(\frac{\delta}{S_g}\right)^{-0.2659} \times [1 + 7.669 \cdot 10^{-8} Re_g^{4.429} \left(\frac{S_g}{h'_g}\right)^{0.920} \left(\frac{\delta}{\ell_s}\right)^{3.767} \left(\frac{\delta}{S_g}\right)^{0.236}]^{0.1} \dots \dots \dots (45 - 5)$$

• للهواء المضغوط :

$$j_a = 0.6522 Re_a^{-0.5403} \left(\frac{S_a}{h'_a}\right)^{-0.1541} \left(\frac{\delta}{\ell_s}\right)^{0.1499} \left(\frac{\delta}{S_a}\right)^{-0.0678} \times [1 + 5.269 \cdot 10^{-5} Re_a^{1.340} \left(\frac{S_a}{h'_a}\right)^{0.504} \left(\frac{\delta}{\ell_s}\right)^{0.456} \left(\frac{\delta}{S_a}\right)^{-1.055}]^{0.1} \dots \dots \dots (46 - 5)$$

$$f_g = 9.6243 Re_a^{-0.7422} \left(\frac{S_a}{h'_a} \right)^{-0.1856} \left(\frac{\delta}{\ell_s} \right)^{0.3053} \left(\frac{\delta}{S_a} \right)^{-0.2659} \times$$

$$[1 + 7.669.10^{-8} Re_a^{4.429} \left(\frac{S_a}{h'_a} \right)^{0.920} \left(\frac{\delta}{\ell_s} \right)^{3.767} \left(\frac{\delta}{S_a} \right)^{0.236}]^{0.1} \dots \dots \dots (47 - 5)$$

الجدول (5-18) : معاملات الاحتكاك (j) و (f) باتجاه غازات العادم و الهواء المضغوط عند قيم مختلفة لـ (L1)

L1	L2	L3	Jg	fg	Ja	fa
0.5	3.5	3.5	0.003913	0.00579	0.003005	0.003635
1	3.5	3.5	0.003998	0.006017	0.003193	0.00413
1.5	3.5	3.5	0.004026	0.006092	0.003375	0.004543
2	3.5	3.5	0.00404	0.006129	0.003542	0.004924
2.5	3.5	3.5	0.004048	0.006151	0.003698	0.005286
3	3.5	3.5	0.004053	0.006166	0.003844	0.005635
3.5	3.5	3.5	0.004057	0.006177	0.003983	0.005976
4	3.5	3.5	0.00406	0.006185	0.004115	0.006309
4.5	3.5	3.5	0.004063	0.006191	0.004243	0.006636
5	3.5	3.5	0.004064	0.006196	0.004365	0.006959

5-4-8-19: حساب معامل الانتقال الحراري باتجاه كل من غازات العادم و الهواء المضغوط:

• لغازات العادم :

$$h_g = \left(\frac{j \times G \times C_p}{pr^{2/3}} \right)_g \left[\frac{w}{m^2.k} \right] \dots \dots \dots (48 - 5)$$

حيث:

pr_g : عدد براندل لغازات العادم.

إن العناصر المكونة لغازات العادم عند درجة حرارة وسطية بين الدخول للمسترجع والخروج منه أي بين درجتَي الحرارة (363.2 °C – 450 °C) وضغط قريب من الضغط الجوي [11]:

$$pr_{N_2} = 0.708$$

$$pr_{CO_2} = 0.722$$

$$pr_{H_2O} = 0.915$$

$$pr_{O_2} = 0.751$$

وبالتالي فإن عدد براندل لغازات العادم ضمن المسترجع هي مجموع عدد براندل للعناصر المكونة لغازات العادم مضروبة بنسبتها الحجمية :

$$pr_g = \sum r_k \times pr_k \dots \dots \dots (49 - 5)$$

$$pr_g = 0.67 \times 0.708 + 0.08 \times 0.722 + 0.107 \times 0.915 + 0.143 \times 0.751 \\ = 0.74$$

• للهواء المضغوط :

$$h_a = \left(\frac{j \times G \times C_p}{pr^{2/3}} \right)_a \left[\frac{w}{m^2.k} \right] \dots \dots \dots (50 - 5)$$

حيث:

pr_a : عدد براندل للهواء المضغوط.

ويمكن حساب عدد براندل للهواء المضغوط (pr_a) عند الضغط $p_2 = 7.8 \text{ bar}$ ودرجة حرارة وسطية بين الدخول للمسترجع والخروج منه أي بين درجتي الحرارة ($293^\circ\text{C} - 402.9^\circ\text{C}$) وذلك من [6] :

$$pr_a = 0.69$$

الجدول (5-19) : معامل الانتقال الحراري باتجاه غازات العادم و الهواء المضغوط عند قيم مختلفة لـ (L1)

L1	L2	L3	hg	ha
0.5	3.5	3.5	135.0011	653.3004
1	3.5	3.5	137.9275	328.8345
1.5	3.5	3.5	138.881	227.7275
2	3.5	3.5	139.3567	177.7336
2.5	3.5	3.5	139.6392	147.6748
3	3.5	3.5	139.8287	127.4974
3.5	3.5	3.5	139.9625	112.9544
4	3.5	3.5	140.0638	101.9369
4.5	3.5	3.5	140.1426	93.27655
5	3.5	3.5	140.2047	86.27276

5-4-8-20: حساب البارامترات الأساسية لحساب مردود الريش باتجاه كل من غازات العادم و الهواء المضغوط:

• غازات العادم :

$$m_g = \left[\frac{2 h_g}{k_f \delta} \left(1 + \frac{\delta}{\ell_s} \right) \right]^{\frac{1}{2}} [m^{-1}] \dots \dots \dots (51 - 5)$$

$$\ell_g = \frac{b_1}{2} - \delta [m] \dots \dots \dots (52 - 5)$$

• الهواء المضغوط :

$$m_a = \left[\frac{2 h_a}{k_f \delta} \left(1 + \frac{\delta}{\ell_s} \right) \right]^{\frac{1}{2}} [m^{-1}] \dots \dots \dots (53 - 5)$$

$$\ell_a = \frac{b_2}{2} - \delta [m] \dots \dots \dots (54 - 5)$$

الجدول (5-20) : البارامترات الأساسية لحساب مردود الريش باتجاه غازات العادم و الهواء المضغوط عند قيم مختلفة لـ (L1)

L1	L2	L3	mg	ma	lg	la
0.5	3.5	3.5	387.515	852.4646	0.0049	0.0049
1	3.5	3.5	391.6926	604.7955	0.0049	0.0049
1.5	3.5	3.5	393.0441	503.3009	0.0049	0.0049
2	3.5	3.5	393.7167	444.636	0.0049	0.0049
2.5	3.5	3.5	394.1156	405.2968	0.0049	0.0049
3	3.5	3.5	394.3829	376.5915	0.0049	0.0049
3.5	3.5	3.5	394.5715	354.4634	0.0049	0.0049
4	3.5	3.5	394.7143	336.7329	0.0049	0.0049
4.5	3.5	3.5	394.8253	322.1114	0.0049	0.0049
5	3.5	3.5	394.9127	309.7824	0.0049	0.0049

5-4-8-21: حساب مردود الريش باتجاه كل من غازات العادم و الهواء المضغوط:

• غازات العادم :

$$\eta_{f,g} = \frac{\tanh(m\ell)_g}{(m\ell)_g} \dots \dots \dots (55 - 5)$$

• الهواء المضغوط :

$$\eta_{f,a} = \frac{\tanh(m\ell)_a}{(m\ell)_a} \dots \dots \dots (56 - 5)$$

الجدول (5-21) : مردود الريش باتجاه غازات العادم و الهواء المضغوط عند قيم مختلفة لـ (L1)

L1	L2	L3	$\eta_{f,g}$	$\eta_{f,a}$
0.5	3.5	3.5	0.503542	0.239289
1	3.5	3.5	0.499069	0.335644
1.5	3.5	3.5	0.497634	0.399681
2	3.5	3.5	0.496923	0.447374
2.5	3.5	3.5	0.496502	0.484916
3	3.5	3.5	0.49622	0.515527
3.5	3.5	3.5	0.496021	0.541124
4	3.5	3.5	0.495871	0.562946
4.5	3.5	3.5	0.495754	0.581839
5	3.5	3.5	0.495662	0.598404

5-4-8-22: حساب مردود السطح الكلي باتجاه كل من غازات العادم و الهواء المضغوط:

• غازات العادم :

$$\eta_{0,g} = \left[1 - (1 - \eta_f) \frac{A_f}{A} \right]_g \dots \dots \dots (57 - 5)$$

• الهواء المضغوط :

$$\eta_{0,a} = \left[1 - (1 - \eta_f) \frac{A_f}{A} \right]_a \dots \dots \dots (58 - 5)$$

الجدول (5-22) : مردود السطح الكلي باتجاه غازات العادم و الهواء المضغوط عند قيم مختلفة لـ (L1)

L1	L2	L3	$\eta_{0,g}$	$\eta_{0,a}$
0.5	3.5	3.5	0.734672	0.30582
1	3.5	3.5	0.71793	0.446226
1.5	3.5	3.5	0.712655	0.539465
2	3.5	3.5	0.710058	0.607328
2.5	3.5	3.5	0.708524	0.659147
3	3.5	3.5	0.707501	0.700009
3.5	3.5	3.5	0.70678	0.733017
4	3.5	3.5	0.706235	0.760193
4.5	3.5	3.5	0.705813	0.782919
5	3.5	3.5	0.705479	0.802174

5-4-8-23: حساب المقاومة الحرارية للجدار.

$$R_w = \frac{\delta_w}{K_w A_w} \left[\frac{K}{W} \right] \dots \dots \dots (59 - 5)$$

الجدول (5-23) : المقاومة الحرارية للجدار عند قيم مختلفة لـ (L1)

L1	L2	L3	Rw
0.5	3.5	3.5	9.18E-09
1	3.5	3.5	4.59E-09
1.5	3.5	3.5	3.06E-09
2	3.5	3.5	2.29E-09
2.5	3.5	3.5	1.84E-09
3	3.5	3.5	1.53E-09
3.5	3.5	3.5	1.31E-09
4	3.5	3.5	1.15E-09
4.5	3.5	3.5	1.02E-09
5	3.5	3.5	9.18E-10

5-4-8-24: حساب الحمل الحراري من خلال تحديد جداء معامل الانتقال الحراري الكلي في مساحة سطح التبادل الحراري (UA):

$$\frac{1}{UA} = \frac{1}{(\eta_0 h A)_h} + R_w + \frac{1}{(\eta_0 h A)_c} \dots \dots (60 - 5)$$

الجدول (5-24) : جداء معامل الانتقال الحراري الكلي في مساحة سطح التبادل الحراري (UA) عند قيم مختلفة لـ (L1)

L1	L2	L3	1/UA	UA
0.5	3.5	3.5	8.5E-06	117677.2
1	3.5	3.5	4.64E-06	215502.9
1.5	3.5	3.5	3.47E-06	287815.6
2	3.5	3.5	2.92E-06	342923.4
2.5	3.5	3.5	2.59E-06	386398.4
3	3.5	3.5	2.37E-06	421862.7
3.5	3.5	3.5	2.21E-06	451641.9
4	3.5	3.5	2.1E-06	477295
4.5	3.5	3.5	2E-06	499865.7
5	3.5	3.5	1.92E-06	520079.8

5-5: التصميم الهيدروليكي للمسترجع:

إن هبوط الضغط النموذجي في نظام إسترجاع الحرارة من جانب غازات العادم والذي يتضمن فتحة الدخول من العنفة إلى المسترجع الحراري ، وحدة إسترجاع الحرارة ، كواتم الصوت والمخرج إلى المدخنة يكون حوالي (0.042-0.024) bar [7].

5-5-1: حساب هبوط الضغط داخل المسترجع من جانب غازات العادم:

إن هبوط الضغط داخل المسترجع من جانب غازات العادم يتحدد من خلال العلاقة التالية :

$$\Delta P = \frac{G_g^2}{2g_c \rho_i} \left[(1 - \sigma_g^2 + K_C) + 2 \left(\frac{\rho_i}{\rho_0} - 1 \right) + f \frac{4 L_1}{D_{h,g}} \rho_i \left(\frac{1}{\rho} \right)_m - (1 - \sigma_g^2 - K_e) \frac{\rho_i}{\rho_0} \right] \dots \dots \dots (61 - 5)$$

حيث:

ΔP : هبوط الضغط المطلق.

G_g : السرعة الكتلية لغازات العادم ضمن المسترجع.

ρ_i : كثافة غازات العادم الداخلة إلى المسترجع.

ρ_0 : كثافة غازات العادم الخارجة من المسترجع.

f : معامل الاحتكاك.

D_h : القطر الهيدروليكي لممرات تدفق غازات العادم.

والآن نوجد البارامترات المجهولة:

يتم تحديد المعاملات (K_C) و (K_e) من خلال معرفة (Re) و (σ) [9].

$$\left(\frac{1}{\rho} \right)_m = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{\rho_i} + \frac{1}{\rho_0} \right) \dots \dots \dots (62 - 5)$$

وبالتعويض نجد:

$$\left(\frac{1}{\rho} \right)_m = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{0.487} + \frac{1}{0.558} \right) = 1.92$$

لنوجد (f):

$$f = f_g \left(\frac{T_W}{T_m} \right)^m \dots \dots \dots (63 - 5)$$

حيث:

$$T_W = \frac{T_{g,m} + (R_g/R_a)T_{a,m}}{1 + (R_g/R_a)} [K] \dots \dots \dots (64 - 5)$$

$T_{g,m}$: درجة الحرارة الوسطية لغازات العادم بين الدخول والخروج من المسترجع.

$$T_{g,m} = \frac{T_{g,i} + T_{g,o}}{2} \dots \dots \dots (65 - 5)$$

$T_{a,m}$: درجة الحرارة الوسطية للهواء المضغوط بين الدخول والخروج من المسترجع.

$$T_{a,m} = \frac{T_{a,i} + T_{a,o}}{2} \dots \dots \dots (66 - 5)$$

R_g : المقاومة الحرارية من جانب غازات العادم.

$$R_g = \frac{1}{(\eta_0 h A)_h} \left[\frac{K}{W} \right] \dots \dots \dots (67 - 5)$$

R_a : المقاومة الحرارية من جانب الهواء المضغوط.

$$R_a = \frac{1}{(\eta_0 h A)_c} \left[\frac{K}{W} \right] \dots \dots \dots (68 - 5)$$

وأخيراً فإن الأس (m) في العلاقة الأساسية يتم حسابه من [9] كما يلي :

$$m = 1 \quad \text{عندما} \quad 1 < \frac{T_w}{T_m} < 3$$

$$m = 0.81 \quad \text{عندما} \quad 0.5 < \frac{T_w}{T_m} < 1$$

الجدول (5-25) : تغير هبوط الضغط عند قيم مختلفة لـ (L1)

L1	L2	L3	Rg	Ra	Rg/Ra	Tw	f	ΔP
0.5	3.5	3.5	7.71E-06	7.81E-07	9.866575	626.3473	0.00542	0.009658
1	3.5	3.5	3.66E-06	9.72E-07	3.771674	633.2413	0.005682	0.018237
1.5	3.5	3.5	2.4E-06	1.07E-06	2.250708	638.9922	0.005795	0.026945
2	3.5	3.5	1.79E-06	1.13E-06	1.588553	643.6074	0.005865	0.035738
2.5	3.5	3.5	1.42E-06	1.16E-06	1.224753	647.3125	0.005913	0.044582
3	3.5	3.5	1.18E-06	1.19E-06	0.996945	650.3199	0.00595	0.053466
3.5	3.5	3.5	1.01E-06	1.2E-06	0.841847	652.793	0.005979	0.062374
4	3.5	3.5	8.83E-07	1.21E-06	0.729833	654.855	0.006002	0.071303
4.5	3.5	3.5	7.84E-07	1.22E-06	0.645359	656.5957	0.006021	0.080246
5	3.5	3.5	7.05E-07	1.22E-06	0.579497	658.0821	0.006036	0.089197

وبالتالي نلاحظ أن الخيارين الثالث والرابع ضمن الحدود المسموحة لهبوط الضغط، وبما أن كل منهما يحقق الحمل الحراري المطلوب من المسترجع فإنه يتم اختيار الخيار الثالث وذلك لأن الخيار الرابع يؤمن حمل أكبر من المطلوب وذلك على حساب زيادة الكلفة.

5-6: المواصفات النهائية للمسترجع:

الجدول (5-26) : المواصفات النهائية للمسترجع

Inconel 625	نوع المعدن	$Q = 14.375 \text{ MW}$	استطاعة المسترجع
$b_1 = b_a = 10 \text{ mm}$	ارتفاع الريش من جهة الهواء المضغوط	$b_1 = b_g = 10 \text{ mm}$	ارتفاع الريش من جهة غازات العادم
$\delta = 0.1 \text{ mm}$	سماعة الريشة	$\delta_w = 0.1 \text{ mm}$	سماعة الصفيحة
$n'_f = 500$	عدد الريش في كل مسار	$l_s = 9 \text{ mm}$	طول إزاحة الريشة
$L_1 \times L_3 = 1.5 \times 3.5 \text{ m}$	مقطع مرور الهواء المضغوط	$L_2 \times L_3 = 3.5 \times 3.5 \text{ m}$	مقطع مرور غازات الاحتراق
$\Delta p = 0.0269 \text{ bar}$	هبوط الضغط	$A = 11826.2 \text{ m}^2$	مساحة سطح التبادل الحراري

الفصل السادس

الدراسة الاقتصادية والبيئية

6-1: حساب الكلفة التأسيسية للمسترجعات:

يتم تحديد الكلفة التأسيسية للمسترجع الحراري بشكل أساسي بالاعتماد على كلفة سطح التبادل الحراري [14] وبالتالي يكون :

- بالنسبة للمسترجع الأول من نوع (Rotary Regenerator) المستخدم في العنفة الأولى
: (GT_{Solar})

إن مساحة سطح التبادل الحراري كما تم حسابها في الفصل الرابع:

$$A_{Rotary\ Regenerator} = 2862\ m^2$$

وبما أن كلفة سطح التبادل الحراري بالنسبة لهذا النوع من المسترجعات [14] :

$$C_{Rotary\ Regenerator} = 250\ \$/m^2$$

بالتالي فإن كلفة مساحة سطح التبادل الحراري والتي تشكل الكلفة الأساسية للمسترجع:

$$C_1 = 250 \times 2862 = 715,500\ \$$$

- بالنسبة للمسترجع الثاني من نوع (Plate Fin Heat Exchanger) المستخدم في العنفة الأولى (GT_1):

إن مساحة سطح التبادل الحراري الكلي بالنسبة لهذا النوع من المسترجعات يكون عبارة عن مجموع مساحات سطح التبادل الحراري لكل سطح من سطوح الموائع التي تعبر هذا المسترجع [14] :

$$A_{Plate\ Fin} = A_g + A_a = 4203.71 + 7622.48 = 11826.19\ m^2$$

وبما أن كلفة سطح التبادل الحراري بالنسبة لهذا النوع من المسترجعات [14] :

$$C_{Plate\ Fin} = 150\ \$/m^2$$

بالتالي فإن كلفة مساحة سطح التبادل الحراري والتي تشكل الكلفة الأساسية للمسترجع :

$$C_2 = 150 \times 11826.2 = 1773930\ \$$$

6-2: حساب سعر الوقود الموفر بعد تركيب المسترجعات:

نحسب الاستهلاك النوعي للوقود لكل من العنفتين قبل تركيب المسترجع [16]، [15] :

- بالنسبة للعنفة الأولى (GT_{Solar}) :

$$C_{C1(Solar)} = \frac{3600 \times 10^3}{\eta_{th} I_P} = \frac{3600 \times 10^3}{0.206 \times 50221.64} = 347.97 \text{ gr/KW} - h$$

• بالنسبة للعنفة الأولى (GT₁):

$$C_{C1(Frame 6)} = \frac{3600 \times 10^3}{\eta_{th} I_P} = \frac{3600 \times 10^3}{0.282 \times 50221.64} = 254.19 \text{ gr/KW} - h$$

I_P : القيمة الحرارية الدنيا للوقود مقدرة بـ (KJ/Kg) .

والآن نحسب الاستهلاك النوعي للوقود لكل من العنفتين بعد تركيب المسترجع :

• بالنسبة للعنفة الأولى (GT_{Solar}) :

$$C_{C2(Solar)} = \frac{3600 \times 10^3}{\eta_{th} I_P} = \frac{3600 \times 10^3}{0.285 \times 50221.64} = 251.52 \text{ gr/KW} - h$$

• بالنسبة للعنفة الأولى (GT₁):

$$C_{C2(Frame 6)} = \frac{3600 \times 10^3}{\eta_{th} I_P} = \frac{3600 \times 10^3}{0.337 \times 50221.64} = 212.71 \text{ gr/KW} - h$$

وبالتالي تكون نسبة الوقود الموفرة لكل من العنفتين كما يلي :

• بالنسبة للعنفة الأولى (GT_{Solar}) :

$$E_{Solar} = \frac{347.97 - 251.52}{347.97} = 27.72 \%$$

• بالنسبة للعنفة الأولى (GT₁):

$$E_{Frame 6} = \frac{254.19 - 212.71}{254.19} = 16.32 \%$$

وبالتالي تكون كمية الوقود الموفرة عبارة عن جداء نسبة الوقود الموفرة في تدفق الوقود الأساسي:

• بالنسبة للعنفة الأولى (GT_{Solar}) :

$$Q_{Solar} = 0.2772 \times 0.31 = 0.086 \text{ m}^3/\text{s}$$

• بالنسبة للعنفة الأولى (GT₁):

$$Q_{Frame 6} = 0.1632 \times 1.62 = 0.264 \text{ m}^3/\text{s}$$

وتكون كمية الوقود الموفرة خلال سنة لكل من العنفتين كما يلي :

- بالنسبة للعنفة الأولى (GT_{Solar}) :

$$Q_{Solar} = 0.086 \times 60 \times 60 \times 24 \times 365 = 271.21 \times 10^4 m^3/Y$$

$$Q_{Solar} = 9.58 \times 10^7 ft^3/Y$$

- بالنسبة للعنفة الأولى (GT_1) :

$$Q_{Frame 6} = 0.264 \times 60 \times 60 \times 24 \times 365 = 832.55 \times 10^4 m^3/Y$$

$$Q_{Frame 6} = 29.4 \times 10^7 ft^3/Y$$

وبما أن سعر كل مليون قدم مكعب من الغاز المباع ($1MSCF = 3800 \$$) فإن سعر الوقود الموفر خلال عام لكل من العنفتين كما يلي :

- بالنسبة للعنفة الأولى (GT_{Solar}) :

$$S_{Solar} = 9.58 \times 10 \times 3800 = 364,040 \$/Y$$

- بالنسبة للعنفة الأولى (GT_1) :

$$S_{Frame 6} = 29.4 \times 10 \times 3800 = 1,117,200 \$/Y$$

3-6: حساب فترة استرداد رأس المال:

يمكن حساب فترة استرداد رأس المال من خلال العلاقة التالية :

التكلفة التأسيسية للمسترجع الحراري مقسوماً على سعر الوقود الموفر خلال عام :

- بالنسبة للعنفة الأولى (GT_{Solar}) :

$$T_{Solar} = \frac{C_1}{S_{Solar}} = \frac{715,500}{364,040} = 2 Y$$

- بالنسبة للعنفة الأولى (GT_1) :

$$T_{Frame 6} = \frac{C_2}{S_{Frame 6}} = \frac{1,773,930}{1,117,200} = 1.6 Y$$

4-6: حساب انخفاض كمية غاز ثاني أكسيد الكربون المنبعثة:

بما أن غاز ثاني أكسيد الكربون (CO_2) يشكل (8%) من نسبة انبعاثات غازات العادم فإن الانخفاض في كمية (CO_2) المنبعثة يساوي التوفير في كمية الانبعاثات مضروبة بنسبته في تلك الكمية كما يلي :

• بالنسبة للعنفة الأولى (GT_{Solar}) :

$$M_{Solar} = 0.08 \times 0.2772 \times 17.14 = 0.38 \frac{Kg \text{ of } Co_2}{s}$$

$$M_{Solar} = \frac{0.38 \times 60 \times 60 \times 24}{1000} = 32.8 \frac{ton \text{ of } Co_2}{day}$$

• بالنسبة للعنفة الأولى (GT_1):

$$M_{Frame 6} = 0.08 \times 0.1632 \times 145.29 = 1.9 \frac{Kg \text{ of } Co_2}{s}$$

$$M_{Frame 6} = \frac{1.9 \times 60 \times 60 \times 24}{1000} = 164.16 \frac{ton \text{ of } Co_2}{day}$$

النتائج و التوصيات

1. رفع مردود العنفة الغازية نوع (Solar) من (20.6%) إلى (28.5%).
 2. رفع مردود العنفة الغازية نوع (Nuovo Pignone Frame 6) من (28.2%) إلى (33.7%).
 3. إن كمية الوقود الموفرة في العنفة المختارة من نوع (Solar) هي:
$$(Q_{Solar} = 9.58 \times 10^7 \text{ ft}^3 / Y)$$
وفي العنفة المختارة من نوع (Nuovo Pignone Frame 6) هي:
$$(Q_{Frame 6} = 29.4 \times 10^7 \text{ ft}^3 / Y)$$
وهي كمية كبيرة وتبرز أهمية هذا التوفير في ظل إرتفاع أسعار الوقود الأحفوري.
 4. التقليل من كمية إنبعاثات غازات ثاني أكسيد الكربون المضرّة بالبيئة بمقدار (32.8) طن يومياً في العنفة المختارة من نوع (Solar) وبمقدار (164.16) طن يومياً في العنفة المختارة من نوع (Nuovo Pignone Frame 6) فالمشروع مجدي بيئياً.
 5. إن فترة إسترداد رأس المال هي (2) سنة تقريباً بالنسبة للمسترجع (Rotary Regenerator) المستخدم في العنفة المختارة من نوع (Solar)، وهي فترة قصيرة نسبياً فالمشروع مجدي اقتصادياً.
 6. إن فترة إسترداد رأس المال هي (1.6) سنة تقريباً بالنسبة للمسترجع (Plate Fin) المستخدم في العنفة المختارة من نوع (Nuovo Pignone Frame 6)، وهي فترة قصيرة نسبياً فالمشروع مجدي اقتصادياً.
- بناءً على الاستنتاجات السابقة نلاحظ بأن استرجاع الطاقة الحرارية الضائعة من مختلف أنواع العنفات الغازية في شركة الفرات للنفط تتميز بفوائد طاقية وبيئية عديدة والتي تتضمن التوفير في كمية الوقود وبالتالي التقليل من كمية الطاقة المستهلكة ورفع مردود المنشأة بالإضافة إلى التقليل من كمية الملوثات المنبعثة المضرّة بالبيئة و نوصي بتنفيذ هذه الدراسة على المنشآت العنفية المدروسة و متابعة الدراسة على العنفات الغازية المنتشرة في القطر.

المراجع

المراجع العلمية العربية:

- [1] مرعشلي عبدالله، الآلات الحرارية العنقية العنفات الغازية، جامعة حلب، 2002.
- [3] حمش علي، الاستفادة من الطاقة الحرارية لغازات عادم العنفات الغازية لأغراض التدفئة والتكييف، رسالة ماجستير بإشراف د. نديم مخير، جامعة دمشق، 2011.
- [4] حميد أحمد وعباس جمال، آلات حرارية العنفات الغازية، جامعة دمشق، 2003.
- [5] هلال مفيد، الترموديناميك التكنيكي ، جامعة دمشق ، 2003.

English Reference

- [2] Giampaolo, Tony, Gas turbine handbook: principles and practices Third Edition, The Fairmont Press Inc, 2006.
- [6] Perry , Robert & Green , Don , Perry's Chemical Engineering Hand Book , Mcgraw Hill Companies Inc , 1999.
- [7] P. Boyce, Meherwan, handbook for cogeneration and combined cycle power plant, 2002.
- [8] Bennett, Richard L, Increased Efficiency through Waste Heat Recovery, Janus Technology Group Inc, 2001.
- [9] Shah , Ramesh & Sekulic, Dusan, Fundamentals of Heat Exchangers Design , John Wiley & Sons Inc, 2003.
- [10] Swanepoel, D.C & Kroger, D.G , Rotary Regenerator Design Theory And Optimisation , R& D Journal, 1996.
- [11] Lienhard , John , Heat Transfer Text Book , 2001.

[12] Dewatwal, Jainender, Design of Compact Plate Fin Heat Exchanger, National Institute of Technology Inc, 2009.

[13] Group of engineers ,ASME, 2004.

[14] Lunsford , Kevin.M , Advantages of Brazed Heat Exchangers in the Gas Processing Industry, National Bryan Research & Engineering Inc, 1996.

[15] Operation Manual for Solar Turbine in ALfurat Petroleum Company.

[16] Operation Manual for Frame 6 Nuovo Pignone Turbine in ALfurat Petroleum Company.