المراجل البخارية

الوقود - الاحتراق - التآكل - الصيانة

الأستاذ الدكتور
كاظم فنطيل السلطاني
كلية هندسة المواد - جامعة بابل

www.darsafa.net

حيث لا إحتكار للمعرفة

www.books4arab.com

بسم الله الرحمن الرحيم

﴿ وَقُلِ اعْمَلُوا فَسَيَرَى اللَّهُ عَمَلَكُمْ وَرَسُولُهُ وَالْمُؤْمِنُونَ وَسَتُرَدُّونَ إِلَىٰ عَالِمِ الْغَيْبِ وَالشَّهَادَةِ فَيُنَبِّئُكُم بِمَا كُنتُمْ تَعْمَلُونَ ﴾

صدق الله العظيم

المراجل البخارية

الوقود، الاحتراق، التآكل، الصيانة

المراجل البخارية

الوقود، الاحتراق، التآكل، الصيانة

الاستاذ الدكتور

كاظم فنطيل السلطاني

كلية هندسة المواد – جامعة بابل

الطبعة الأولى

2016م - 1437هـ

دار صفاء للنشر والتوزيع - عمان

دار صفاء للنشر والتوزيع

رقم التصنيف 621.1

المراجل البخارية :الوقود .الاحتراق.التآكل.الصيانة

ا.د.كاظم فنطيل السلطاني

الواصفات: المراجل البخارية// الوقود// الصيانة

رقم الإيداع لدى دائرة المكتبة الوطنية (2015/1/33)

ردمك ISBN 978-9957-24-969-4

عمان ـ شارع الملك حسين

مجمع الفحيص التجاري ـ تلفاكس ـ 4612190 6 962+

هاتف ـ 4611169 6 962+ ص . ب 922762 عمان ـ 11192 الأردن

DAR SAFA Publishing - Distributing

Telefax: +962 6 4612190- Tel: + 962 6 4611169

P.O.Box: 922762 Amman 11192- Jordan

E-mail:safa@darsafa1.net

E-mail:safa@darsafa.info

www.darsafa.net

جميع حقوق الطبع محفوظة

All RIGHTS RESERVED

جميع الحقوق محفوظة للناشر. لا يسمح بإعادة إصدار الكتاب أو أي جزء منه أو خزينه في نطاق استعادة المعلومات أو نقله بأي شكل من الأشكال دون إذن خطي من الناشر

All rights Reserved. No part of this book may be reproduced. Stored in a retrieval system. Or transmitted in any form or by any means without prior written permission of the publisher.

الفهرس

المقدمة 9

الفصل الأول

الوقود

1-1 مقدمـــة 15

1-2 إمدادات الطاقة عالميا 17

1-3 النفط 18

1-4 الغاز الطبيعي 20

1-5 الفحم 21

1-6 ملوثات الوقود 21

1-7 الخواص الفيزيائية لزيت الوقود 27

1-8 ملوثات الوقود الصلب 28

الفصل الثاني

تصنيف الوقود

2-1 مقدمة 33

2-2 القيمة الحرارية للوقود 34

2-3 الوحدات الحرارية 35

2-4 إجمالي وصافي القيمة الحرارية 36

2-5 درجة حرارة اللهب..... 38

2-6 المرونة والسيطرة..... 39

2-7 معايير اختيار الوقود 39

2-8 الوقود الصلب..... 41

2-9 الوقود السائل..... 48

2-10 الوقود الغازي 62

الفصل الثالث

الاحتراق

3-1 الاحتراق..... 75

3-2 حسابات الاحتراق..... 82

الفصل الرابع

المراجل البخارية (الوصف، الأنواع، الملحقات)

4-1 المرجل..... 105

4-2 تصنيف المراجل 105

4-3 تصميم المراجل..... 107

الفصل الخامس

تآكل انابيب المراجل البخارية

تآكل في جانب الماء

5-1 المقدمة 129

5-2 ميكانيكية التآكل في المحيط المائي 132

5-3 المشاكل التي يسببها الماء المستعمل في المراجل 137

5-4 معادن المراجل البخارية 159

الفصل السادس

تآكل انابيب المراجل البخارية

تآكل في جانب النار

6-1 مقدمة 167

6-2 الأكسدة 168

6-3 التآكل الحار 170

6-4 ميكانيكية التآكل الحار 179

الفصل السابع

صيانة المراجل

7-1 المقدمة 193

7-2 معالجة المياه المستخدمة 193

3-7 الوحدات الغازية 198

4-7 السيطرة على التآكل / معاملة الوقود 205

5-7 المقارنة بين المحطات البخارية والغازية..... 206

6-7 تشغيل المرجل..... 209

المراجع 219

المقدمـــة

الكهرباء صناعة معقدة تتطلب تخطيطا وجهدا استثنائيين مصحوبا بعمل هندسي وفني متميز يواصل الليل بالنهار لتوفير الطاقة الكهربائية للمواطن.

ان الكهرباء لكي تصل إلى المواطن يجب أن تمر في ثلاث مراحل رئيسه هي إنتاج الكهرباء ومن ثم نقلها وآخرها توزيعها للمواطن وان أي مشكلة في هذه المراحل ستمنع من وصول الكهرباء للمواطن إلا إن المحسوس هو محور التوزيع يقربه من ذهن المواطن وعينه وان زيادة انتاج الطاقة الكهربائية يجب ان يصاحبها تطوير في مرحلتي النقل والتوزيع حتى تصل الكهرباء بصورة منتظمة وجيدة وان أي إضافة في محور دون الآخر سيؤثر على حصة المواطن باعتبار أي مشكلة في الإنتاج أو النقل أو التوزيع سيعرقل وصول الكهرباء إلى المواطنين بصورة صحيحة. وان الحفاظ على الكميات المنتجة في محطات إنتاج الطاقة الكهربائية يحتاج إلى تأهيل وصيانة مستمرين، حيث ان الصيانة في غياب او ضعف في التخطيط وكذلك تقادم المنظومات وصعوبة الحصول على مواد احتياطية من مناشئ عالمية وفي حالة الحصول على تلك المواد تكون أسعارها مرتفعة وكذلك غياب وثائق الصيانة الخاصة بالمعدات يؤدي الى ضعف في تأهيل وصيانة تلك المنظومات وان عدم اعتماد هيكلية موحدة لمشاريع تأهيل محطات التوليد وشبكات النقل والتوزيع تحدد الحد الأدنى من المتطلبات والنتائج المتوقعة. ان محطات انتاج الطاقة الكهربائية التي تعمل

بالوقود تنقسم حسب نوعية تلك المحطات سواء أكانت محطات توليد تعمل بالوقود الغازي او محطات التوليد التي تعمل بالوقود السائل، حيث يتطلب النوع الأخير وجوده بالقرب من مصادر المياه بالإضافة الى توفر مصادر الوقود، وان من أهم أجزاء تلك المحطات هو مولدات البخار او ما يعرف بالمرجل (Boilers).

تكاملت مولدات البخار الحديثة من حيث تضمنها العديد من الأجزاء الأساسية التي تقوم بتحويل الماء إلى بخار تحت ظروف محسوبة من ضغط ودرجة حرارة، فبعد أن تعمل الحرارة على تحويل السائل الى بخار فان البخار الناتج يزود إلى التوربين حيث تتحول الطاقة الحرارية إلى طاقة حركية ومن ثم إلى طاقة كهربائية في دراستنا هذه سنركز على مولدات البخار لإنهاء المشاكل التي تحدث فيها حيث تمثل ما يقارب 70٪ من مشاكل انتاج الطاقة الكهربائية في محطات الإنتاج التي تستخدم البخار الناتج من المرجل لتوليد الكهرباء.

ان مصطلح مولدة البخار حل محل مصطلح المرجل(Boiler) في دراسة محطات القدرة الكهربائية حيث ان مولدة البخار تشمل كل من الفرن والمرجل وجدران الماء وسقوف وأرضيات الماء والمحمصة (Super heater) والمسخن البيني (Reheater) والمقتصد (Economizer) ومعدات الاحتراق، تعرف مولدة البخار، حسب مواصفات الجمعية الأمريكية لمهندسي

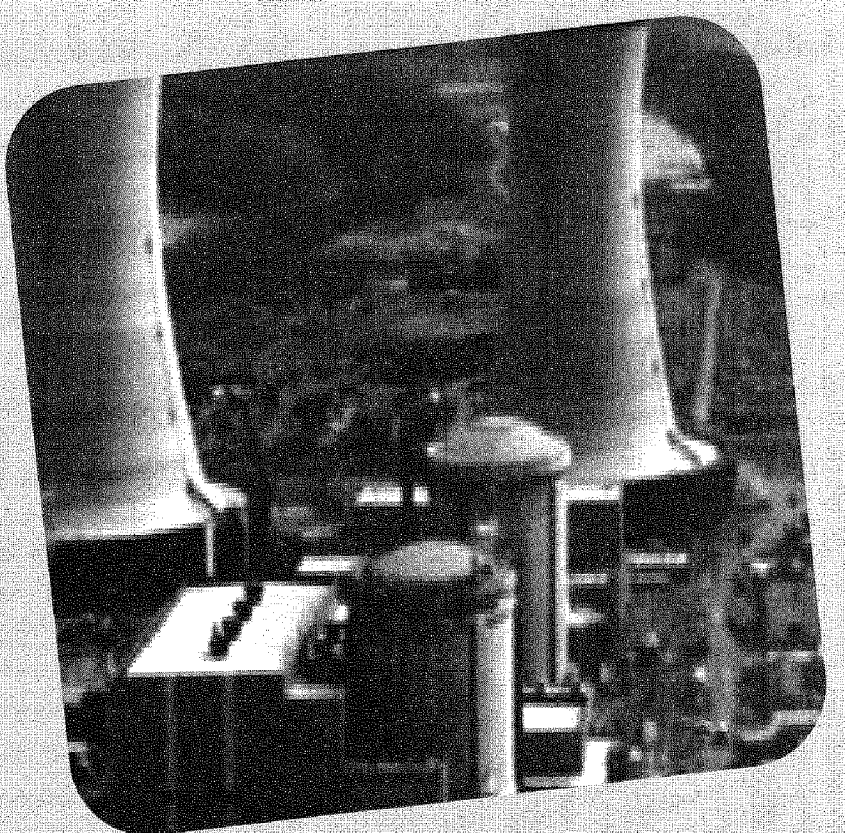
الميكانيك (ASME Codes)، على إنها مجموعة مؤتلفة من المعدات لإنتاج أو لاستعادة الحرارة سوية مع معدات نقل الحرارة إلى التشغيل.

هذا الكتاب هو محاولة جادة لسد جزء فراغ كبير في المكتبة العراقية بخصوص توفر مادة علمية تبحث في مشاكل انتاج الطاقة الكهربائية في العراق والتي تتعمد بشكل مطلق على محطات انتاج الكهرباء العاملة بالوقود الأحفوري سواء اكانت تلك التي تعمل بالوقود الغازي او السائل بكل انواعه، حيث تضمن الكتاب فصلاً عن أنواع الوقود، اما الفصل الثاني فقد تناول الاحتراق وامثلة عن الاحتراق وذلك لأهمية معرفة طبيعة الاحتراق الحاصل في معدات الاحتراق. اما الفصل الثالث فقد تناول المراجل البخارية وماهيتها اما الفصلين الرابع والخامس فقد تطرقا الى تآكل انابيب المراجل البخارية في جانبي الماء والنار، اما الأخير فقد تضمن اهم الطرق الشائعة في صيانة المراجل.

ان الكتاب مفيد للطلبة الباحثين في مجال محطات انتاج الطاقة الكهربائية، كذلك مهم بشكل كبير للمهندسين والفنيين العاملين في محطات انتاج الكهرباء وخصوصاً المحطات التي تعمل بالوقود الأحفوري السائل، كذلك مفيد لكل العاملين والباحثين في مجال المراجل البخارية على مستوى وزارة الصناعة او أي مؤسسة أخرى تستخدم المراجل البخارية لشتى الأغراض.

الفصل الأول

الوقود



1

الفصل الأول

الوقود

1-1 مقدمة

تعد الطاقة احد المفاهيم الشائعة والمألوفة الاستعمال في الحياة اليومية ويمكن وصف الطاقة بعدة طرائق واي طريقة منها لا تعطي تعريفا شاملا للطاقة، فالطاقة هي الحرارة وهي الضوء والكهرباء والقابلية على انجاز شغل مفيد. والحياة على هذه الأرض غير ممكنة من دون الطاقة لان الطاقة هي التي تنمي النبات والتي يمثل المصدر الأساس لغذاء جميع الكائنات الحية. ويحتاجها الإنسان في حياته اليومية احتياجا شديدا، فهو يستخدمها كل يوم في إدارة آلاته في المصنع ويحرك بها وسائط النقل بأنواعها المختلطة في كل مكان ويدير بها كثيراً من أدواته المنزلية إلى غير ذلك من الأغراض.

اعتمد تقدم البشرية وتطورها عقب التاريخ الى حد بعيد على تطور مقدرة الإنسان على تسيير الطاقة من مصادرها المختلفة لمواجهة المتطلبات المواكبة لهذا التطور. الجدول رقم (1 -1) يبين العلاقة الوثيقة بين تقدم المجتمعات البشرية في ضوء تطور استهلاكها من الطاقة عبر حقب التاريخ.

جدول (1 -1) تقديرات الاستهلاك الفردي للطاقة في الأدوار التاريخية المختلفة

ت	الدور	كغم فحم حجري مكافئ في اليوم
1 -	المجتمع البدائي	0.3
2 -	المجتمع الإقطاعي	0.7
3 -	المجتمع الزراعي الابتدائي	1.8
4 -	المجتمع الزراعية المتطور	3.8
5 -	المجتمع الصناعي	11.2
6 -	المجتمع المتطور تكنولوجيا	33.3

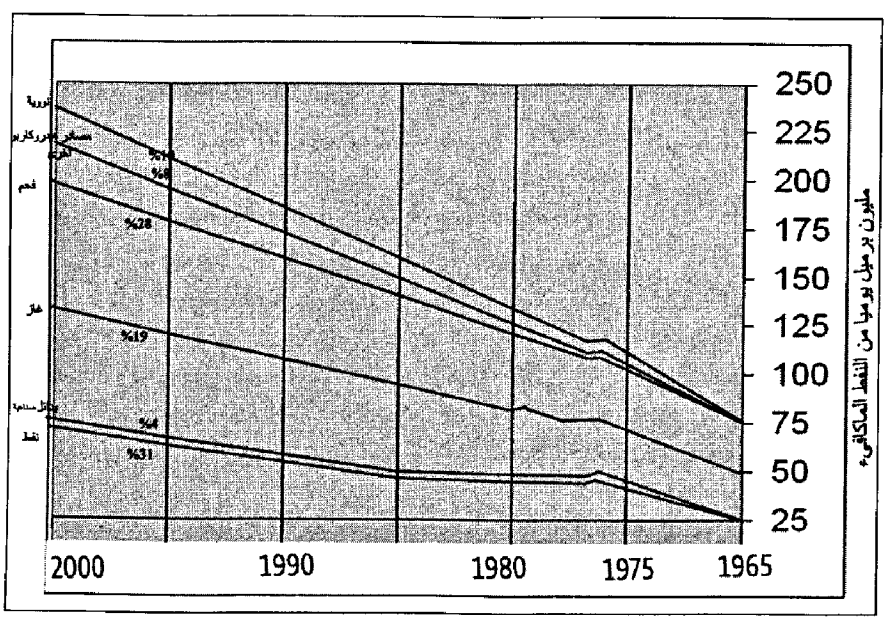
إن التطور في كل القطاعات الزراعية و الصناعية والتجارية والعسكرية والنقل قد أدى إلى زيادة الطلب بصورة حادة على مختلف أنواع الوقود ، مما شكل ضغطا هائلا على مصادر الطاقة المختلفة وهدد بعض مصادر الطاقة غير المتجددة بالنضوب، لذا ترشيد استعمال الطاقة والبحث عن مصادر بديلة للطاقة من الأمور الحيوية وخصوصا في الدول التي تعتمد بشكل أساسي على الطاقة القابلة للنفاذ وفي هذا الصدد أشارت احدى الدراسات إلى أن نضح قطره من الوقود في الثانية هذا يعني نضح 31536000 بليون قطرة في السنة وهذا يعادل خسارة تقدر 35000 كيلو واط ساعة سنويا ويغطي احتياجات مسكن من الطاقة مدة سنة كاملة.

أن احتراق الوقود في غرف الاحتراق سواء أن كانت هذه الغرف محركات السيارات أو أفران احتراق المراجل البخارية أو التوربينات الغازية أو أي غرف احتراق أخرى يؤدي إلى مشاكل أثناء الاحتراق نتيجة احتواء الوقود على شوائب فلزية وهذه الشوائب يتباين تركيزها بحسب نوعية الوقود.

1-2 إمدادات الطاقة عالميا

كان النفط والغاز يشكلان القسم الأعظم من معدلات النمو في المصادر التنموية للطاقة في العالم خلال السنين التي سبقت عام 1973. ولقد لعب النفط دورا فعالا في مختلف مرافق الاقتصاد العالمي، وخلال الأعوام 1965 -1973 بلغ معدل نمو العرض العالمي للنفط (8٪) سنويا والغاز (7٪) سنويا، وقد تجاوزت هذه المعدلات الزيادة في معدلات العرض العالمي للطاقة، حيث بلغت الكميات المعروضة عالميا من النفط والغاز خلال 1973 حوالي (2/3) من العرض العالمي للطاقة.

لقد خلق التطور الذي بداء عام 1073 التحولات الدرامية في تشكيلة الوقود الأولية كما مبين في الشكل (1 -1) وان معدلات نمو العرض العالمي للنفط التقليدي المتوقعة تشكل اقل من (1٪) سنويا خلال الحقبة القادمة والسبب في ذلك يعود إلى الانخفاض المتزايد في حصة النفط من المشاركة في تموين مصادر الطاقة.



شكل رقم (1 -1) مصادر الطاقة في العالم

3-1 النفط Oil

يبلغ الاحتياطي المؤكد للنفط في العالم حوالي 600 مليار برميل (٪ 55) منها في الأقطار العربية الخليجية. أما بالنسبة للطلب العالمي على النفط يبقى مرتفعا بالرغم من السياسات النفطية الجديدة في الاستعاضة عنه بمصادر الطاقة الأخرى إلا أن معدلات الطلب تبقى متزايدة وذلك لكون النفط مصدرا لعدد هائل من المشتقات الصناعية البتروكمياوية والتي يزداد الطلب عليها يوميا.

1-3-1 مصادر جديدة للنفط

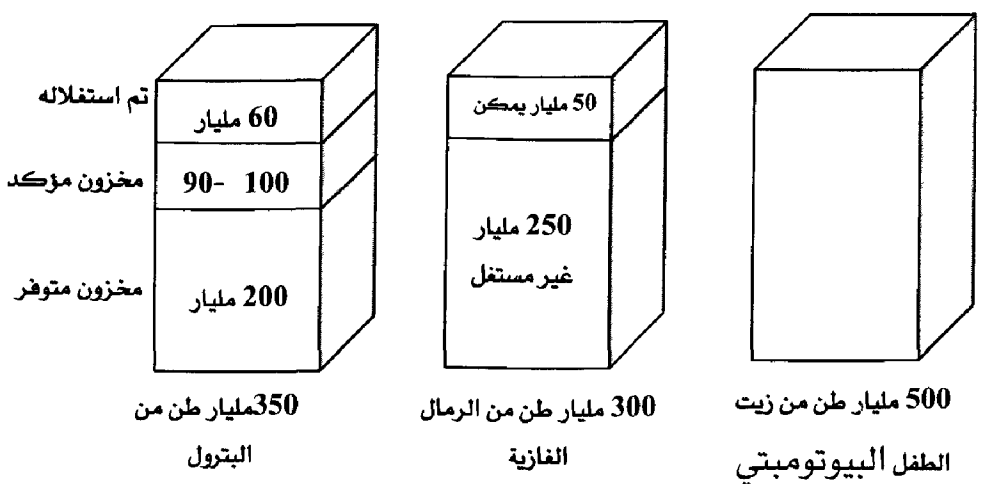
1 -الطفل الزيتي: - ويعرف كذلك بالطفل البيوتومبتي وهو يحتوي على ما يعرف بالكيروجين وهي مادة تشبه القار وتتركب من جزئيات عضوية كبيرة تنتج عند تعرض بقايا الحيوانات البحرية والطحالب للحرارة والضغط ويعطي هذا الطفل عند تسخينه بعض الوسائل التي تشبه زيت البترول في خواصه. وتبلغ القيمة الحرارية للكيروجيين نحو (10000 Cal/g) وتستخدم طريقة التقطير الائتلافي للحصول على الزيت ولكن تكاليف الإنتاج باهظة نوعا ما فنسبة الزيت الناتجة لا تزيد في المعتاد على 50Kg لكل طن من المادة الخام.

2 - الرمال الغازية توجد الرمال الغازية في بعض المناطق شرق فنزويلا وفي كندا ويحتوي هذا النوع من الرمال على سوائل كثيفة تشبه القار وهي تختلف في تركيبها عن البترول العادي. وعادة ما يتم استعمال البخار المحمص لاستخراج الزيت من هذه الرمال وقد تم إنتاج نحو 20 مليون طن في العالم بهذا الأسلوب في كل من كندا وفنزويلا وتعترض عملية تقطير الرمال القارية عدة صعوبات أهمها أن الزيت الناتج يحتوي على قدر كبير

من المواد الإسفلتية ذات الكثافة العالية ولهذا فان الأمر يقتضي تعديل نظام التكرير كما حدث في فرنسا بالقرب من ليون، حيث أقيمت معامل التكرير الخاصة للزيت الناتج من الرمال الغازية تستطيع معالجة نحو 200000 طن من هذا الزيت في العام. الشكل رقم (1 -2) يبين المخزون العالمي من البترول والرمال الغازية والطفل البيوتومبتي.

جدول رقم (1 -2) يبين حصة النفط من حجم الطلب على الطاقة الكلية في الدول الصناعية حسب القطاعات الاقتصادية الرئيسية

السنة / القطاع	1980	2010- 2000	2020
1 -توليد الطاقة الكهربائية	0.17	0.05	0.02
2 -الصناعة	0.41	0.25- 0.30	0.15- 2
3 -الخدمات التجارية	0.37	0.25- 0.30	0.05- 0.15
4 -النقل	0.99	0.90- 0.95	0.76- 0.90



الشكل (1-2) المخزون العالمي من البترول والرمال الغازية والطفل البيوتومبتي

4-1 الغاز الطبيعي Natural Gas

يوجد الغاز الطبيعي بكميات هائلة مصاحبا للنفط الخام أو في آبار مستقلة. ويمكن نقلة من الآبار لمساحات طويلة عبر أنابيب ناقلة أو عبر النقل البحري، ويعد الغاز الطبيعي مصدرا مكملا لغاز الفحم وقد جرت محاولات للحصول على غاز الميثان المجتمع بين كتل الفحم الحجري بحفر ثقوب مناسبة غير أن هذه التجارب لم يكتب لها النجاح اقتصاديا. الاحتياطات العالمية المثبتة من الغاز الطبيعي مدرجة في الجدول (1 -3).

جدول رقم (1 -3) الاحتياطات العالمية المثبتة من الغاز الطبيعي

ت	المنطقة	الاحتياطي المتبقي		النسبة المئوية
		ب ب م ن*	قدم مكعب $\times 10^{12}$	
1	اوبك	137	788	35.8
2	امريكا الشمالية	46	288	12
3	اوربا الغربية	31	181	8.11
4	باقي العالم	28	160	7.17
5	اوربا الشرقية	144	835	7341
المجموع		386	22232	100

* ب ب م ن = بليون برميل مكافئ نفطي، حيث أن 1 مليون برميل يوميا مكافئ نفطي = 57 بليون متر مكعب غاز سنويا = 50 مليون طن مكافئ نفطي سنويا

5-1 الفحم Coal

ان السياسات التي أعيد النظر فيها حديثا في مجال الطاقة تعطي للفحم دورا أكبر في وقتنا الحاضر وفي المستقبل في مجالات الاستخدام التقليدية وان المساهمة الحالية للفحم تشكل 20٪ برغم قاعدة الاحتياطي العالمي المكتشف من الفحم. كما يعد الفحم مصدرا مهماً لكثير من المواد الكيميائية التي يعتمد عليها في الصناعات الكيميائية اليوم. الجدول رقم (1 -4) يمثل الاحتياطي العالمي من الفحم.

جدول رقم (1 -4) يوضح الاحتياطي العالمي من الفحم (مليار طن)

ت	المناطق	الاحتياطي المؤكد	الاحتياطي المحتمل	المجموع
1 -	دول الاتحاد السوفيتي السابقة	145	3976	4121
2 -	الولايات المتحدة	72	1028	1100
3 -	اوربا الغربية	88	9	97
4 -	اوربا الشرقية	39	20	59
5 -	الصين	-	-	1000
6 -	باقي العالم	112	196	308
	المجموع	456	5229	6685

6-1 ملوثات الوقود Fuel Contaminants

عندما يحترق وقود هيدروكربوني مع اقل مقدار ممكن من الهواء اللازم للاحتراق، حرارة عالية تتولد على السبائك المكونة لغرف الاحتراق مرتبطة بمشاكل التآكل الحار لهذه السبائك.

بشكل عام عند حرق وقود كالفحم الحجري أو متبقي الوقود Residual Fuel يصبح التآكل الحار خطراً جدا وذلك لاحتواء هذين النوعين من الوقود على نسب عالية من الشوائب الفلزية.

6-1-1 ملوثات الوقود السائل Fuel Oil Contaminants

من المعروف أن نسب الشوائب الفلزية في النفط الخام ليست عالية مقارنة بالوقود الصلب، بالرغم من محتوى الكبريت العالي من النفط الخام الذي يتراوح ما بين (٪ 3 -0.5) والذي يكون قريباً على محتوى الوقود الصلب من الكبريت حيث يتراوح ما بين (٪ 3 -0.8)، أما ملوثات الكلور الناتجة من المحاليل المحلية في المكائن النفطية لا يتجاوز (2٪) كحد أعلى. أما العناصر الأخرى تكون بنسب قليلة (Trace) وكما مبين بالجدول (1 -5).

أما متبقي الوقود Residual Fuel والذي يعرف على انه الوقود الذي يحتوي على بقايا عملية التصفية للنفط والذي يخفف بالهيدروكربونات المقطرة ولهذا فهو يحتوي على معظم الشوائب الضارة الموجودة ابتداء من النفط الخام حيث تشير الدراسات إلى أن في حالة التقطير المثالي فان نسب الشوائب في متبقي الوقود تكون ضعف احتواء النفط الخام من الشوائب الذي نتج عنه ذلك المتبقي من الوقود.

جدول (1 -5) العناصر الفلزية في النفط الخام (جزء لكل مليون جزء ppm)

Element	U.S.A	Venezuela	Colombia	East Indies	Middle East
Al	0.1-0.3	1	0.3	1.9- 6	0.3-7
Ca	1.2-12	1.4	Nil	0.2	0.1
Cr	0.1	1.4	Nil	0.2	0.1
Co	1.6	Nil	Nil	1.9	Nil

Element	U.S.A	Venezuela	Colombia	East Indies	Middle East
Cu	0.2- 0.5	0.2- 7.3	7	0.4- 1	0.1- 5
Fe	3- 4.6	1.2- 30	0.4	15- 61	1- 5
Pb	0.2-0.7	Nil-2.1	Nil	0.6- 0.7	Nil- 0.1
Mg	0.5-2	0.6- 1.7	1.2	0.8- 1.7	0.1- 7
Mn	Nil	Nil	Nil	Trace	Trace
Mo	Nil-0.1	Nil-0.3	Nil	0.2- 0.6	Nil- 0.2
Ni	0.8- 1.2	0.3-6	10	0.4-1	0.4-30
K	Nil-2.9	Nil-2.1	Nil	Nil	Nil-0.7
Si	0.1-0.5	0.7-1.7	0.8	3.5-6.9	0.2-1.0
Na	2.7-3.8	13-33	9.4	6-15	0.1-50
Sn	Nil-0.1	Nil-0.5	0.3	0.2-0.9	Nil
Ti	0.1-0.2	Nil-0.3	Nil	Tranc-0.3	Nil-0.4
V	0.7-1.9	Nil-30	72	Nil	3-100
Zn	1.2-2.1	Nil-3	Nil	0.3-0.6	Nil-2

6-2-1 العناصر ذات التأثيرات الضارة

1. الرماد Ash

الرماد هو المادة غير القابلة للاحتراق في زيت الوقود، المواد المكونة للرماد ممكن أن تكون مواداً صلبة موجودة أصلا في الزيت وهي مركبات معدنية ذائبة في الزيت أو في الماء الموجود في الزيت، المواد الصلبة المكونة للرماد ممكن أن تسبب إتلاف وانسداد في أجهزة احتراق زيت الوقود مثل(المرشحات، الصمامات) وفوهات الحريق (Nozzles).

2. الصوديوم والبوتاسيوم Sodium and Potassium

الصوديوم والبوتاسيوم يمكن أن يتحدان مع الفناديوم مكونة مركبات ذات درجات انصهار واطئة. وأكثر من ذلك ممكن للصوديوم والبوتاسيوم أن يتحد مع الكبريت الموجود في الوقود مكوناً مركبات معقده التي درجة انصهارها ضمن درجة الحرارة التشغيلية للمراجل البخارية والتوربينات الغازية.

أن النسبة المقبولة وغير المسببة للتآكل من الصوديوم والبوتاسيوم لا تتجاوز (0.5 ppm) والتي لا يمكن الوصول إلى هذه النسب الا عن طريق غسل النفط الخام حيث يمكن التخلص بنسبة تتجاوز (80٪) من كميات الصوديوم والبوتاسيوم، وذلك لقدرة هذين المركبين على الإذابة في الماء وتكوين الأملاح، حيث تتم العملية بمزج النفط الخام بالماء واستخدام مادة تسمى كاسر الاستحلاب Demulsifiesلأزاله الماء بعد عملية الغسل.

أما إذا كانت نسب الصوديوم والبوتاسيوم اقل من (10 ppm) فان تأثيرهما يمكن أن يعطل بإضافة مادة ملطفة تحتوي على الكروم (Cr). كذلك يمكن لهذين المركبين أن يدخلا إلى غرف الاحتراق عن طريق هواء الاحتراق وخصوصا في الأجواء البحرية حيث يزداد (تركيزهما في المناطق القريبة من البحر ولهذا تم وضع مرشحات لهواء الاحتراق قبل دخولها إلى غرف الاحتراق للتخلص من الأتربة والمواد الحاملة والأملاح.

3. الفناديوم Vanadium

يعد الفناديوم من العناصر المؤثرة التي لها القابلية على تكوين مركبات تأكليه والتي لها القابلية على الاتحاد مع الصوديوم والبوتاسيوم والكبريت والمركبات الناتجة بحيث تكون ذات درجة انصهار واطئة. نسبة الفناديوم في الزيوت المقطرة هي اقل بكثير مما هو علية في النفط الخام وزيوت بقايا التقطير، لذلك فان الأخيرين يحتاجان إلى معاملة خاصة بإضافة الملطفات لتقليل تأثير مركبات الفناديوم.

4. الرصاص Lead

الرصاص ليس بذات شان في زيت الوقود ، وجوده يعزى إلى التلوث الحاصل للزيت خلال عمليات تصنيعه أو خلال النقل. لا توجد طريقة معروفة لتخفيض نسبة الرصاص من زيوت الوقود والتوصيات تتطلب أن تكون نسبة الرصاص قليله ومقبولة.

5. الكالسيوم Calcium

وجود الكالسيوم ذات فائدة لأنه يعمل على تعطيل تأثير التآكل المتسبب عن وجود الفناديوم ولكنة يميل لتكوين رواسب ذات صلابة عالية غير قابلة للإزالة بطريقة الغسل بالماء و كما هو معمول به برواسب مركبات الصوديوم والبوتاسيوم ولكن بتأثير قليل جدا فهي لذلك ذات تأثير على كفاءة الأداء من جهة إعاقة التبادل الحراري بكفاءة عالية.

6. الكبريت Sulfur

تتباين نسب محتوى عنصر الكبريت بحسب مصدر النفط الخام ويعد محتوى الكبريت في زيت الوقود من المحددات السعرية في أثناء عملية الحرق بتحويل الكبريت بتفاعله مع مول واحد من أوكسجين إلى هواء إلى ثاني اوكسيد الكبريت.

$$S + O_2 \rightarrow SO_2 \quad \text{..... (1-1)}$$

وباستمرار التفاعل من الممكن أن تأكسد (1 -2٪) من SO_2 إلى ثالث اوكسيد الكبريت SO_3.

أن نسباً من تحول ثاني اوكسيد الكبريت إلى ثالث اوكسيد الكبريت تعتمد بشكل جوهري على كمية الهواء الزائدة (Excess Air) وتعد مرحلة تحول اوكسيد الكبريت الثنائي إلى ثلاثي من أخطر المراحل كونه يتفاعل مع مول واحد من بخار الماء ويتحول إلى حامض الكبريتيك.

$$So_3 + H_2O \rightarrow H_2SO_4 \quad \text{..... (1-2)}$$

7. متبقي الكاربون Residual Carbon

يعرف متبقي الكاربون على انه الكمية من الكاربون الناتجة من احتراق زيت الوقود مع أوكسجين الهواء، وفي الحقيقة الكاربون المتخلف هو مقياس لكمية المواد الكربونية المتبقية في الوقود بعد تبخير جميع مكونات الوقود المتطايرة في ظروف انعدام الهواء.

8. المواد المترسبة والماء Sedimentary Mutter and Water

ان وجود المواد المترسبة في الخطوط الناقلة لزيت الوقود وصهاريج الخزن تسبب مشاكل من حيث الصيانة المبذولة للتخلص من تلك المترسبات والتي تشكل خطورة على شبكة زيت الوقود. أما الماء المتواجد في زيت الوقود نتيجة الأمطار أو بحسب مصدر الوقود يسبب تآكل صهاريج زيت الوقود حيث يجتمع في المنحنيات أو مواقع اللحام وحيث يتكون خط فاصل (Interface) بين الماء والزيت نتيجة فرق التركيز حيث يكون هناك فرق في تركيز الهواء (الاوكسيجين) بحسب ذوبان الأوكسجين في الماء والوقود مما يسبب ما يسمى فرق التهوية (differential Aeration) ونتيجة لذلك تتكون خلال خلايا كهروكيميائية (كاثود وانود) ومن ثم يسبب التآكل.

7-1 الخواص الفيزيائية لزيت الوقود Physical Properties for Oil Fuel

للخواص الفيزيائية لزيت الوقود تأثير كبير في تشغيل الوحدات البخارية والتوربينات الغازية على حد سواء وممكن أن نجملها بالآتي:

1 -اللزوجة Viscosity

تعد اللزوجة من الخواص المهمة لزيت الوقود أو النفط الخام حيث كلما كانت اللزوجة منخفضة كان الضخ أسهل واقل كلفة وكذلك يفضل الوقود ذات اللزوجة المنخفضة للحقن بسهولة في فوهات المحارق ((Burners أثناء عملية التذرية (Atomization). تتحدد لزوجة الوقود الدنيا بأعلى حرارة تشغيلية متوقعة بالمتطلبات القياسية للزوجة لمضخات دفع زيت الوقود. معظم أنواع زيت الوقود

ممكن ضخها بالمضخات الاعتيادية والزيوت الأخف يمكن ضخها بمضخات ذات مواصفات خاصة تتحمل لزوجة واطئة. كذلك هناك حدود للزوجة العليا المسموح بها للزيوت بأوطأ درجة حرارة لضمان عملية التذرية الجيدة في المحارق.

2 -درجة الانسكاب Degree of Fluidity

لضمان جريان زيت الوقود خلال شبكة الوقود يجب ان تكون درجة حرارة الزيت أعلى من درجة الانسكاب لذلك الزيت حيث أن في التطبيقات العملية يفترض أن تكون درجة حرارة الزيت أو النفط الخام في الأنابيب الناقلة أو الصهاريج تبعا لمعدل درجات الحرارة خلال مواسم السنة المختلفة. بعض من النفط الخام وكثيرا من الزيوت الثقيلة تحتوي على كميات محدودة من الشمع ولضمان جريان الزيت بصورة تامة خلال الشبكة يجب رفع درجة حرارة الزيت إلى درجة حرارة أعلى من درجة تكوين الشمع.

8-1 ملوثات الوقود الصلب Solid Fuel Contaminates

يحتوي الوقود الصلب كالفحم الحجري (Coal) او أي نوع اخر من انواع الوقود الصلب على شوائب معدنية (Metallic Impurities)كالسليكون، بالإضافة الى ملوثات كبريتية قد تصل الى (0.8-3%) وزنا من الفحم الحجري. اما محتوى الفسفور في الوقود الصلب فهو عادة يتراوح بين (0.001-0.1%)، كذلك يوجد الكلوريد على شكل ايونات وهي بشكل عام اقل من (1.2%). هنالك بعض العناصر التي تتواجد بنسب قليلة جدا (Trace) فان نسبتها تختلف حسب مصدر الوقود الصلب، الجدول ادناه الشوائب المعدنية الاخرى (Trace)

كجزء لكل مليون جزء لثلاث مصادر للفحم الحجري (امريكا ، بريطانيا ، استراليا)

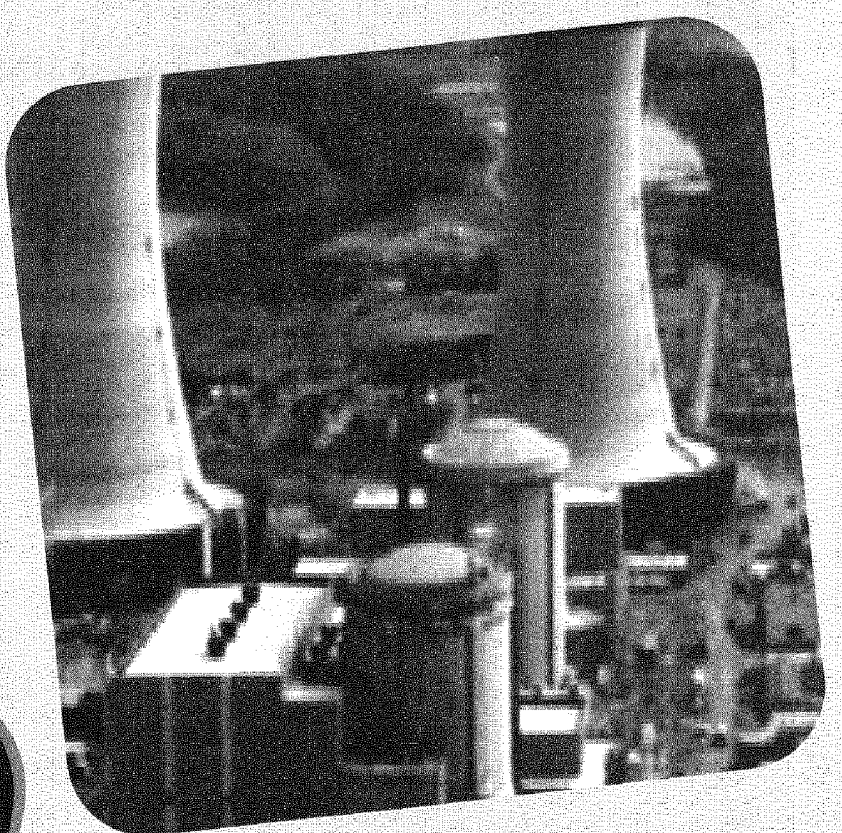
جدول رقم (6 -1) يوضح نسب العناصر (Trace) في الفحم الحجري

Element	Great Britain ppm	U.S.A ppm	Australia ppm
Antimony			>30
Arsenic	0- 100		3
Barium			<100
Beryllium		1.5- 2.5	1.5
Boron	2- 140	25- 1/6	60
Chromium		7- 20	6
Cobalt		2.7- 5.1	4
Copper	5- 50	11- 15	15
Fluorine	5- 500		
Gallium	3- 10	4.1- 5.5	4
Germanium	8- 10	1.6- 1.3	6
Lanthanum		5.1- 9.5	10
Lead	10- 30		10
Manganese			150
Molybdenum		1.7- 4.3	1- 5
Nickel		7.2- 14	15
Silver			< 0.5
Strontium			100

Element	Great Britain ppm	U.S.A ppm	Australia ppm
Tin		0.4- 1.5	< 3
Titanium		340- 590	900
Tungsten			< 10
Vanadium	10- 60	16- 12	20
Ytterbium		7.4- 14	7
Zinc	> 5	7.6- 59	100
Zirconium			100

الفصل الثاني

تصنيف الوقود



2

الفصل الثاني
تصنيف الوقود

2-1 مقدمة

في هذا الفصل نتطرق الى أصناف الوقود وأقسامه ونظرة فاحصة عن أصل نشوء الوقود وكذلك القيم الحرارية التي يعطيها كل نوع من أنواع الوقود عن الاحتراق الكامل وعلى هذا الأساس يقسم الوقود الى نوعين: -

1 -**الوقود الابتدائي (Primary Fuels)**: وهو الموجود في الطبيعة دون عمليات تكرير.

2 -**الوقود الثانوي (Secondary Fuels)**: وهو المنتج أو المشتق من الوقود الابتدائي كذلك ممكن أن يصنف الوقود إلى ثلاثة مجاميع.

a- الوقود الصلب (Solid Fuels).

b- الوقود السائل (Liquid Fuels).

d- الوقود الغازي (Gaseous Fuels).

أمثلة للأصناف الرئيسية لكل نوع من أنواع الوقود أدرجت ضمن جدول رقم (2 -1). هذا التصنيف عمليا مهم وذلك بسبب أن أجهزة الاحتراق لكل نوع من أنواع الوقود تختلف بحسب اختلافات الوقود.

جدول رقم (2 -1) أصناف الوقود

الوقود الغازي	الوقود السائل	الوقود الصلب
الابتدائي الغاز الطبيعي	الابتدائي النفط الخام	الابتدائي الخشب، الخبث، لجينت، الفحم البني، الفحم القاري، فحم الأثراسيت، الطفل الزيتي، زيت القطران، قير
الثانوي غاز الفحم، غاز الطبخ، غاز الماء، زيت الغاز، غاز الفرن النفاخ، الغازات الصناعية، غاز البترول المسال.... الخ	الثانوي البنزين، النفط الأبيض، وقود الديزل، الكحول ...الخ	الثانوي فحم الكوك، الفحم النباتي، فحم النفط الخام، الوقود الفيرواني، الوقود الصاروخي الصلب.... الخ

2-2 القيمة الحرارية للوقود (Calorific Value))

تعد القيمة الحرارية وحدة من الخواص المهمة للوقود للحكم على كفاءة ذلك الوقود ويمكن تعريف القيمة الحرارية (Calorific Value) على انها كمية الحرارة التي تم الحصول عليها من الاحتراق الكامل لكل وحدة كتلة من الوقود.

3-2 الوحدات الحرارية (Units Heats)

الوحدات الحرارية المستخدمة هي السعرة الحرارية (calorie) كيلو غرام سعرة (Kilogram Calorie)، الوحدات الحرارية البريطانية (British Thermal Units) ووحدات الحرارة بالسنت غراد (Centigrade Heat Unite).

a- السعرة (Cal) أو غرام سعرة (gcal).

في جميع الأغراض التطبيقية السعرة أو غرام سعره ممكن أن تعرف هي كمية الحرارة المطلوبة لرفع درجة الحرارة واحد غرام من الماء إلى درجه مئوية واحده ($1C^o$).

$$1\ Cal = 4.185\ Joules = 4.185 \times 10^7\ ergs$$

b- كيلو سعره أو كيلو غرام سعره (Kcal or Kg Cal)

هذا القياس يساوي 1000 سعره وهي تعرف على إنها كمية الحرارة اللازمة لرفع درجة حرارة 1 كيلو غرام من الماء درجة مئوية واحدة ($1C^o$)

$$1KCal = 1000\ Cal$$

c- الوحدة الحرارية البريطانية (BTU)

ممكن أن تعرف على انها كمية الحرارة اللازمة لرفع درجة حرارة 1 باوند من الماء درجة فهرنهايتية واحده (1^oF).

$$1BTU = 1054.6\ Joules = 154.6 \times 10^7\ ergs$$

d- وحدة الحرارة بالسني غراد تعرف على انها كمية الحرارة اللازمة لرفع درجة حرارة 1 باوند من الماء درجة مئوية واحدة.

$$1Kcal = 1000\ Cals = 3.9688BTU = 2.2\ CHU$$

1 BTU = 252 Cals

1Cal/g = 1KCal/Kg = 1.8 BTU/Ib

1K Cal /m^3 =50/770 BTU/ft^3

4-2 إجمالي وصافي القيمة الحرارية (Cross and Net the Calorific Value)

اجمالي القيمة الحرارية، هو الحرارة الكلية المتولدة عند حرق كمية من الوقود احتراقا كاملا وان (نواتج الاحتراق تبرد في درجة حرارة الغرفة)، عندما يحتوي الوقود المحترق على الهيدروجين سوف يحترق مع اوكسجين الهواء ويتحول إلى بخار ماء (Steam) حيث أن نواتج الاحتراق تبرد في درجة حرارة الغرفة، البخار يكثف إلى ماء وتحرر حرارة البخار الكامنة (Latent Heat)الحرارة الكامنة للبخار المتحرر هي تمثل إجمالي القيمة الحرارية.

صافي القيمة الحرارية (Net calorific Value) تمثل صافي الحرارة الناتجة عندما تحرق كمية وحدة من الوقود احتراقا كاملا وان نواتج الاحتراق يسمح لها بالهروب أما صافي القيمة الحرارية فتحسب كالآتي

صافي القيمة الحرارية = إجمالي القيمة الحرارية ـ الحرارة الكامنة لتكثيف بخار الماء الناتج =

إجمالي القيمة الحرارية ـ (كتلة الهيدروجين لكل وحدة وزن من الوقود المحترق ×9 × الحرارة الكامنة للماء المبخر

حيث أن 1 جزء من الهيدروجين وزنا أعطي تسعة أجزاء من الماء وزنا وحسب ألمعادلة : -

الحرارة الكامنة للبخار هي 587 Cal/g أو 1060 BTU/Ib من بخار الماء الناتج

∴ صافي القيمة الحرارية = إجمالي القيمة الحرارية -

$H_2 + O \longrightarrow H_2O$

2 16 18

1 8 9

$\left[587 \times \frac{H}{100} \times 9 \right]$

= إجمالي القيمة الحرارية - $\left[587 \times 0.09H \right]$

ويمكن حساب صافي القيمة الحرارية من خلال الصيغة التالية: -

صافي القيمة الحرارية Net C.V= إجمالي القيمة الحرارية Gas C.V - الحرارة الكامنة لبخار الماء خلال عملية احتراق كمية من الوقود المقاسة بالغرام (g).

Net C.V = Gross C.V-0.09 XHX 587

حيث إن H تمثل نسبة الهيدروجين في الوقود وان الحرارة الكامنة للبخار تساوي (587 Cal/g). وفي حالة وجود كبريت في الوقود الصلب فانه من الممكن ان يتحول الى حامض الكبريتيك H_2SO_4 اثناء الاحتراق.

$$S + O_2 \longrightarrow SO_2 \quad \text{..... (21-2)}$$

$$2SO_2 + O_2 + 2H_2O \longrightarrow 2H_2SO_4 \; {}_{\Delta}H = -144600.Cals \text{ .... (22-2)}$$

كذلك في حالة وجود نسبة من النتروجين في الوقود فانه يتحول إلى النتريك

$$2N_2 + 5O_2 + 2H_2O \longrightarrow 4H\,NO_3; \; \Delta H = -57160.Cals \text{ .....(23-2)}$$

التفاعلات أعلاه من التفاعلات الباعثة للحرارة وان الحرارة المتحررة لا يمكن الحصول عليها عملياً من الفحم وذلك بسبب ان ثاني اوكسيد الكبريت SO_2 وثاني اوكسيد النتروجين NO_2 لا يمكن ان تتكون في الظروف الجوية

الاعتيادية لذلك تصحيح درجة الحرارة المتحررة من خلال تكوين H_2SO_4 ، HNO_3 تكون بالشكل التالي :

a- 3.6 Cals يجب ان تنزل من كل (مليلتر واحد) من حامض الكبريتيك المتكون N/10 H_2SO_4.

b - 1.43 Cals يجب ان تطرح من كل (مليلتر واحد) من حامض النتريك المتكون N/10 HNO_3.

كذلك يمكن حساب القيمة الحرارية للوقود الصلب والوقود الغازي بوحدات KJ/kg من النسب المئوية الوزنية للمركب باستعمال معادلة دولونك (Dulong's Equation)

$$\text{Net C.V} = V = \frac{3380 \times C\% + 144300\,[H_2\% - 0.08(O\%)] + 9400\,S\%}{100} \quad \ldots (24\text{-}2)$$

2-5 درجة حرارة اللهب (Flame Temperance)

خلال احتراق الوقود (صلب، سائل، غاز)، يمتلك كميات من المواد المتطايرة مما يؤدي سحب جميع الحرارة الناتجة من احتراق الوقود حيث تتحرر فوق كامل المساحة للكتلة المحترقة وان المساحة الكبيرة من اللهب تعمل على تقليل تركيز الحرارة.

بشكل عام درجة حرارة اللهب ممكن حسابها وفقا للفرضيات الآتية: -

1 - الاحتراق لا يحدث بشكل سريع والاحتراق يكون كامل.

2 - بعض من الحرارة المتحررة تفقد إلى المحيط (Surroundings) بواسطة الإشعاع.

3 - بعض من الحرارة المفقودة تكون كحرارة كامنة للبخار الناتج.

4 - قليل من الحرارة تمتص بواسطة تفكك جزيئات الغاز.

5 - الحرارة النوعية (Specific Heat) للغازات تزداد مع ازدياد درجة الحرارة.

درجة حرارة اللهب النظري	حرارة الاحتراق +الحرارة المحسوسة في الوقود والهواء الكمية الكلية لنواتج الاحتراق × معدل الحرارة النوعية	(2- 2) ...

2-6 المرونة والسيطرة Flexibility and Control

بالرغم ان القيمة الحرارية من أهم العوامل في تحديد كلفة الوقود، إلا أن بعض العوامل يحتاج أن تأخذ بنظر الاعتبار منها سهولة اتقاد الوقود وهذه الخاصية تعتبر من المعطيات المهمة في تحديد نوعية الوقود حيث ان الاحتراق اما ان يكون سريع او بطيء عندها يتم تحديد سهولة السيطرة على الاحتراق أو امتلاك مرونة عالية، حيث من الممكن أن وقود ما يمتلك قيمة حرارية عالية لكنه لا يمتلك مرونة كبيرة. المرونة ممكن أن نعدها على إنها معدل الاستجابة في الحرارة المتولدة مع الظروف المتغيرة كتغير الهواء أو الوقود المجهز.

2-7 معايير اختيار الوقود Criteria for Selecting a Fuel

هناك مجموعة من الاعتبارات التي يجب ان تؤخذ بنظر الاعتبار عند اختيار الوقود وحسب الغرض الواجب استخدام الوقود لأجله: -

1 - يجب أن يكون الوقود الذي يتم اختياره مناسبا لطبيعة العملية المراد استخدام الوقود لها ، مثلا فحم الكوك (Coke) مناسبا للأفران العاصفة (Blast Furnace) المستخدمة لصهر المعادن.

2 - أن الوقود المستخدم يجب أن يمتلك قيمة حرارية عالية (High Calorific Value).

3 - من المفروض أن يكون الوقود رخيصاً ومتوفراً.

4 - الوقود المستخدم يجب أن يمتلك درجة اتقاد متوسطة (Ignition Temperature).

5 - موقع تجهيز الوقود يجب أن يكون موثقاً.

6 - سرعة الاحتراق يجب أن تكون متوسطة.

7 - ضمان النظافة والأمان أثناء عملية الاحتراق.

8 - الامان والاقتصاد هما العاملان الأساسيان التي يجب أن يمتلكها الوقود أثناء النقل والتخزين.

9 - يجب أن يكون محتوى الرطوبة (Moisture)قليل.

10 - في حالة الوقود الصلب يجب أن يكون محتوى الرماد (Ash) اقل ما يمكن.

2-8 الوقود الصلب Solid Fuels

الأنواع الرئيسة من الوقود الصلب تشمل الخشب(Wood)، الخشب الصخري (Peat)، (Lignite)، الفحم الحجري (Coal)، الفحم النباتي اوالفحم الحيواني (Char Coal)، الوقود الاحفوري (Briquetted Fuels). بالإضافة إلى ذلك أن المخلفات الزراعية والصناعية مثلا مخلفات قصب السكر (Bagasse)، قشور الرز (Rice Husk)، مخلفات الدباغة (Spent Tan) ...الخ هي تقع ضمن أنواع الوقود الصلب المستخدم.

2-8-1 الخشب Wood

هو المصدر الأساس للوقود الصلب في الأزمنة الغابرة وذلك لأنه سهل النمو والتحضير و امكانية الحصول علية من مصادره بسهولة، لكن التقدم الحاصل للحياة البشرية والطلب الكبير في استخدام الطاقة في الصناعة قاد إلى البحث واستخدام أنواع أخرى من الوقود الصلب.

الأخشاب التي تقطع حديثا من الغابة يكون محتوى الماء فيها يتراوح (25-50%) مقارنة بالخشب الجاف الذي يحتوي على رطوبة لا تتجاوز (15٪)حيث أن قيمته الحرارية تتناسب مباشرة مع محتواه من الماء. أن مكونات الأخشاب الجافة ممكن أن تحتوي على (C 50%)، (O_2 43%)، (H_2 6%)، (1%) مواد نيتروجينية وراتنجات . الخشب الجاف يكون عادة سهل الاشتعال، ويحرق بلهب طويل بدون دخان وهو يعطي أقصى شدة حرارة بسرعة. أن القيمة الحرارية

للخشب تتراوح بين (4710-5085 KCal/Kg) ومحتوى الرماد جدا قليل يقع ضمن (0.3-0.6 %)، الخشب يستخدم بشكل واسع في الاستخدامات المنزلية.

8-2-2 الخشب الصخري Peat

يمثل الخشب الصخري المرحلة الأولى من تحويل حطام النبات إلى فحم وينتج بتاثير الفطريات(Fungi) والبكتريا اللاهوائية (Anaerobic Bacteria) يتكون الخشب الصخري من ثلاثة أنواع رئيسية:

أ - النوع الأول هو الناتج من تحلل الخلنج (Heaths) والطحالب (Mosses).

ب - النوع الثاني هو الناتج من البردي (Sedges)، الأعشاب (Grasses) والصفصاف (Willows).

ت - النوع الثالث هذا النوع يتكون من الخشب الصخري للغابات المتراكم من الأخشاب الساقطة وغيرها، أن هذا النوع من الوقود يتواجد بشكل أساسي في دول الاتحاد السوفيتي سابقا (USSR)، ايرلندا، المملكة المتحدة، كندا، فلنده، بولندا، سيبيريا، فرنسا، ألمانيا وايطاليا، حوالي 42% من هذا النوع من الوقود يتواجد في دول الاتحاد السوفيتي السابقة (تقريبا).

8-3-2 اللجنيت Lignite

اللجنيت أو المسمى بالفحم البني هو حالة وسطية بين الخشب الصخري (Peat) وبين الفحم الحجري) الفحم الأسود). محتوى الرطوبة يتراوح بين (-35

50%) أمـا محتـوى الكـاربون في أنواعـه اليابسـة يـتراوح بـين (60-75%) والأوكسـجين بحـدود 20%.اللجينيـت يحتـوي علـى كميـات عاليـة مـن المـادة المتطايرة وهي عادة تتراوح (بين 48% -50) ومحتوى الرماد 4% أو اكثر وتكون قيمته الحرارية (5800-7000 Kcal/Kg).

يصـنف اللجينيـت إلى ثلاثـة أنـواع أساسـية تبعـا للنضـج (Maturity) والمواصفات الخارجية

1 - الفحم البني الأرضي وامثلته الفحم البني الاسترالي.

2 - الفحم البني لخشبي ومن امثلته الايطالي.

3 - اللجينيت الصفائحي.

2-4-8 الفحم القاري Bituminous Coal

هذا النوع من الفحم يشتعل بلهب اصفر وينتج من تقطير فحم القطران وهـو يقسم إلى ثلاث مجاميع:

1 - القار الثانوي (Sub-**Bituminous**) يقع بين اللجينيت والفحم القاري ويكون أكثر كثافة عادة من اللجينيت.

2 - الفحم القاري(Bituminous)، هـو ذات لـون اسـود وهـو ذات تركيـب صفائحي ويمتلك خواص جدا واسعة.

3 - الفحم شبه القاري (Semi-Bituminous) وهـو عـادة يقـع بين الفحـم القـاري والانثراسيت (Anthracite) وهـو يمتـاز بأنـه ذات محتـوى مـن المواد المتطايرة قليل.

الفحم القاري بأنواعه الثلاثة أعلاه يقع بشكل أساسي في الهند.

8-5-2 الانثراسيت Anthracite

هو رتبة عالية من الفحم الحجري وهو يحتوي على نسبة عالية من الكاربون (الجدول رقم (2 -2)) وهو يحتوي على نسبة قليلة جدا من المادة المتطايرة وذات لون اسود داكن ويحترق بلهب جدا قليل وبدون دخان وذات لون ازرق . يستخدم الانثراسيت في عمليات التعدين، الأغراض البحرية، الأفران الحرارية، وتوليد وإنتاج الغاز.

جدول رقم (2 -2) يوضح التنوع في معدل المكونات من الخشب إلى الانثراسيت خلال مختلف مراحل التفحم (Coalification)

Moisture at 40 C° %	Volatile Matter %	C %	H %	W %	O %	Calorific Value kcal/kg
25	75	50	6	0.5	43.5	20- 9
25	65	57	5.7	2.0	35.3	23- 0
18	50- 56	67	5.0	1.5	26.5	27.2
11	45- 50	77	5.0	1.8	16.2	30.2
4	20- 45	83	5.0	2.0	10.0	36.0
1	9- 20	90	4.5	1.5	4.0	36- 4
1.5	15.6	93	3.0	0.7	3.0	35.6

2-6-8 الفحم الحجري Coal

هو عبارة عن وقود احفوري (Fossil) ينتج عن طريق تراكم كميات هائلة من حطام النباتات حيث تتعفن جزئيا وبتأثير الضغط والحرارة عبر ملايين السنين.

أن تكون الفحم الحجري يمكن توضيحه عبر نظريتين: -

1 - النظرية الموقعية وهي النظرية التي تشير إلى التراكم النباتي ذات اللون الرمادي في نفس الموقع، أن الذي يدعم هذه النظرية هو النقاوة العالية التي يظهر فيها الفحم الحجري.

2 - النظرية الانتقالية أو الجرف (Drift) هذه النظرية تشير إلى الفحم الحجري غير متجمع في موقع واحد بل جاء متنقلا خلال مياه الأنهار أو البحيرات ثم تراكم في مواقع قريبة من الضفاف، أن الذي يدعم هذه النظرية هو السمك الكبير الذي يوجد عليه الفحم الحجري.

أن العوامل التي قادت إلى تكوين الفحم الحجري:

a. البكتريا (تحت الماء).

b. الزمن ملايين السنين.

c. درجات الحرارية (أكثر من 300°C).

d. الضغط.

على سبيل المثال أن الزمن اللازم للحصول على الفحم الحجري البني (Brown Coals) (10^7 سنه) أما الفحم الحجري المعتق (Mature Coals) فانه يحتاج من الوقت إلى (3×10^8 سنة).

أما تأثير البكتريا فان المادة النباتية المطمورة تحت الأرض فإنها تتحلل بوجود الهواء إلى ثاني اوكسيد الكاربون (CO_2)وماء دون أن يبقى أي شيء من المادة العضوية. عموما انتقال الحطام النباتي وتحويله إلى فحم حجري يتم عبر مرحلتين: -

1 - مرحلة الكيمياء الحياتية أو مرحلة نصف التفحم.

2 - مرحلة المسخ (Metamorphic) حيث يتحول من نصف متفحم (Peat) إلى فحم حجري.

2 -1 -6 -8 القيمة الحرارية للفحم الحجري Calorific Value of Coal

القيمة الحرارية للفحم الحجري يمكن تحديدها من خلال حرق (1g) من الفحم في جهاز الكالوميتر (Calorimeter) من خلال قياس الارتفاع في درجة حرارة محتوى الماء في الفحم. يمكن للمهندس العمل على احد الطرق المذكورة ادناه لمعرفة القيمة الحرارية للفحم الحجري.

1 -صيغة Davie's Davie's Formula

القيمة الحرارية (BTU/Ib) =[(6.543 H + 403)] $H-\frac{O-S}{8}+\frac{C}{3}$ .....(3- 2)

2 -صيغة Seyler's Seyler's Formula

القيمة الحرارية (BTU/Ib)=7684–0.45O +698.6 H+ 223.1C .....(2- 4)

حيث أن: O، H، C، S تشير إلى الأوكسجين، الهيدروجين، الكاربون، الكبريت على التوالي.

2 -2 -6 -8 احتراق الفحم الحجري Combustion of Coal

يتحول الفحم الحجري إلى طاقة عن طريق الاحتراق . 75%من الفحم الحجري في العالم يستخدم في توليد البخار في محطات توليد الطاقة الكهربائية، على سبيل المثال في الولايات المتحدة الأمريكية أن ما يقارب 50% من إنتاج الطاقة الكهربائية يعتمد على الفحم الحجري. كل من C، H، S هي من مكونات الفحم الحجري والتي تحترق في الهواء. أما غازات الاحتراق فإنها تتكون بشكل أساسي من CO، بخار الماء، SO، SO_2، SO_3 و N_2 وأوكسجين غير محترق مع مكونات أخرى تعتمد بالأساس على مكونات الفحم الحجري الأصلية.

اقصى كفاءة يمكن الحصول عندما يحترق الوقود احتراقا كاملا (Completely Combustion) مع الكميات النظرية من الهواء. على كل حال أن الاحتراق الكامل بوجود الهواء النظري من خلال التجربة العلمية يحدث في هذه الحالة فقدان في الطاقة الكامنة ويتكون دخان لكن عند استخدام 20%من الهواء الزائد (Excess Air) يمكن الوصول لظروف الاحتراق الملائمة وفي نفس الوقت أن استخدام الهواء الزائد يعمل على فقدان محسوس في درجة الحرارة الخارجة عن طريق غازات الاحتراق. أما نسبة من الهواء الزائد الواجب اعطاءها للحصول على احتراق مناسب فإنها تعتمد على تصميم الفرن ونوعية الوقود المستخدم وان أفضل نسبة للهواء الزائد هي التي تبقي درجة حرارة غازات الاحتراق في حدودها الدنيا.

9-2 الوقود السائل Liquid Fuel

من مكونات الوقود السائل المهمة، النفط الخام Petroleumوجميع أنواع الوقود المشتقة منه، الكحوليات Alcohols، القار (القطران) Tar والوقود الفيرواني Colloidal/Fuel ، كذلك ممكن الحصول على الوقود السائل من هدرجة الفحم الحجري Hydrogenation of Coal.

9-1-2 الخواص الحسنة للوقود السائل Merits of Liquid Fuels

1 - الوقود السائل، سهل الاستعمال والخزن والنقل، حيث ممكن ان ينقل بوسائل غير مكلفة كالنقل بالأنابيب. كذلك يحتاج حجم قليل بالنسبة للخزن مقارنة بالوقود الصلب والغازي. حيث يحتاج إلى 30% أكثر وزنا وكذلك 50% أكثر حجما بالنسبة للفحم الحجري مقارنة بالوقود السائل للحصول على نفس القيمة الحرارية.

2 - يحترق الوقود السائل بدون أي رماد(Ash) متبقي.

3 - الاتقاد بالنسبة للوقود السائل يكون سهلاً حيث ممكن أن يبتدئ وينتهي بنفس اللحظة. كذلك معدل الاحتراق سهل السيطرة علية بالشكل المقبول.

4 - من الممكن أن يستخدم هذا النوع من الوقود الذي تم ضخه خلال الأنابيب لأكثر من فرن في وقت واحد.

5 - كمية الهواء الزائد المستخدم لاحتراق الوقود السائل اقل منه في حالة احتراق الوقود الصلب.

6 - حيز الاحتراق في الفرن يكون اقل في حالة الوقود السائل عندما يقارن مع الوقود الصلب.

7 - الاحتراق الآني غير خطر مقارنة بالوقود الغازي.

8 - كذلك يكون الاحتراق بالنسبة للوقود السائل أكثر نظافة لو قورن مع الوقود الصلب.

2-2-9 الخواص السيئة للوقود السائل Demerits of Liquid Fuels

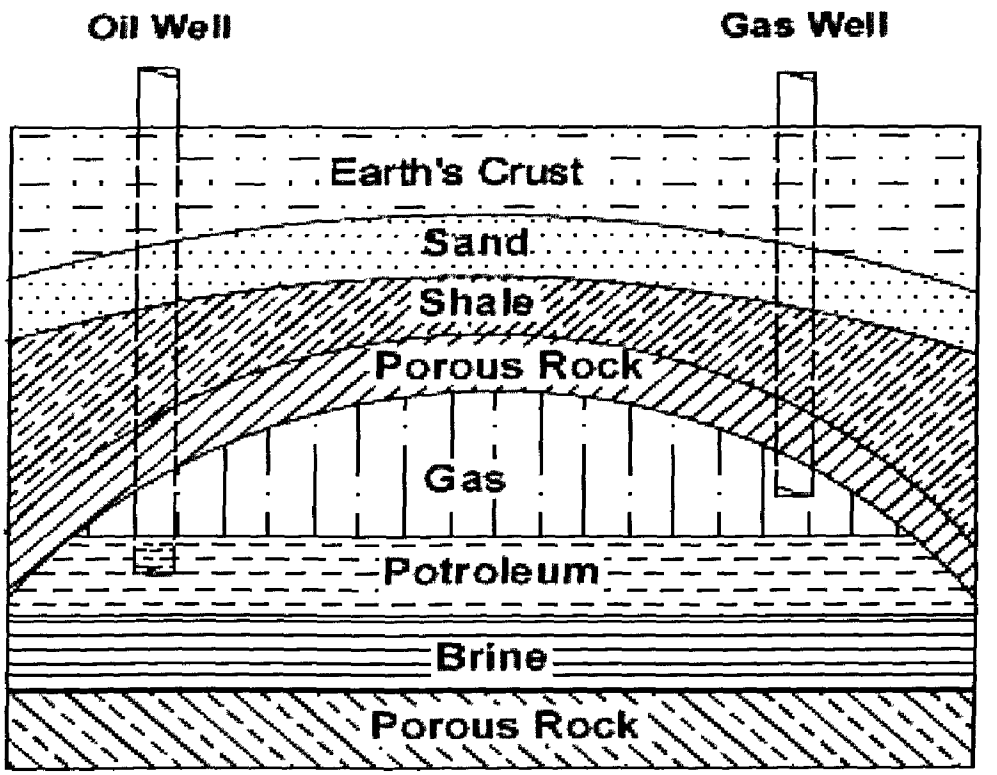
1. الوقود السائل يعطي روائح غير محببة عند الاحتراق خصوصا عندما يحرق احتراقا غير كامل.
2. يكون أكثر كلفة (أغلى) من الوقود الصلب.
3. ممكن أن يحدث فقدان في مقداره من خلال عمليات التبخير والتسريب من الحاويات من خلال الشقوق.
4. تزداد مخاطر الاحتراق وخصوصا من أنواع الوقود السائل الخفيف مقارنه مع الوقود الصلب.

2-3-9 النفط الخام Crude Oil

أن النفط الخام هو المصدر الأساس للوقود السائل، وتوجد 60%من مخزون النفط الخام العالمي في الشرق الأوسط، بينما 15% في نصف الكره الغربي (Western Hemisphere).

أن كلمة (Petroleum) اشتقت من كلمتين Petra وتعني الصخور، Oleum وتعني الزيت، حيث عرف بعد ذلك بالنفط الخام Petroleum أو نفط

الصخور Rock Oil أو النفط المعدني Mineral Oil، وهو عبارة سائل لزج ذات لون غامق يتواجد في أعماق مختلفة من القشرة الأرضية وهو يتكون من مزيج من الهيدروكربونات، كالبرافينات والاولفينات والمركبات الاروماتية مع كميات قليلة من المركبات غير العضوية كالكبريت S و الأوكسجين O_2 والنتروجين N_2 وأما الأنواع غير الجيدة من النفط الخام فهي تحتوي على معادن ثقيلة كالحديد Fe والنيكل Ni والفناديوم V.....الخ.



الشكل رقم (2 -1) مكامن النفط الخام

2-4-9 أصل النفط الخام Origin of Crude Oil

هناك نظريتان تشيران إلى اصل النفط وكل نظرية لها مجموعة من المؤيدين لتلك النظرية بحسب ما لديهم من الأدلة والبراهين.

1 - النظريـــة غـــير العضـــوية أو مـــا تســـمى بنظريـــة الكاربيـــد (Carbide Theory) أو نظرية Mendeef ، انصار هذه النظرية يفترضون أن تكون الكاربيدات المعدنية تحت القشرة الأرضية من خلال تفاعل المعـادن مـع الكـاربون في درجـات حراريـة وضـغط عـاليين، هـذه الكاربيدات تتفاعل مع بخار الماء أو الماء حيث تعطي هايدروكاربونات واطئة الرتبة بعد ذلك تحدث على هذه المركبات عمليات الهدرجة والبلمـرة لكـي تنـتج بعـد ذلـك مزيجـاً مـن البرافينـات والاولفينـات والمركبات الاروماتية. مجموعة المعادلات من (2 -5) الى (2 -11) تشير الى دعم أصحاب النظرية غير العضوية.

$$Ca + 2C \xrightarrow[and Temperanture]{High\,Pressure} CaC_2 \quad \text{.....(5-2)}$$

$$4Al + 3C \xrightarrow[and Temperanture]{High\,Pressure} Al_4C_3 \quad \text{.....(6-2)}$$

$$CaC_2 + 2H_2O \longrightarrow Ca(OH)_2 + C_2H_2 \quad \text{.....(7-2)}$$

$$Al_4C_3 + 12\,H_2O \longrightarrow 4Al(OH)_3 + 3CH_4 \quad \text{.....(8-2)}$$

$$C_2H_2 \xrightarrow{H_2} C_2H_4 \xrightarrow{H_2} C_2H_6 \quad \text{.....(9-2)}$$

$$3C_2H_4 \xrightarrow{Polymerization} C_6H_6 \quad \text{.....(10-2)}$$

$$3C_2H_4 \xrightarrow{Polymerization} C_6H_{12} \quad \text{.....(11-2)}$$

لكن هذه النظرية تشكك في تفسير وجود الكبريت والنتروجين وبعض المركبات الأخرى في تركيب النفط الخام

2 - النظرية العضوية أو ما تسمى بنظرية Engler's هذه النظرية تفترض

أن النفط الخام تكون من حطام الحيوانات والنباتات المتراكمة في أحواض ومصبات البحار والمدفونة في الشقوق أو الرمال. هذا الحطام (النباتي والحيواني) يتحلل بفعل البكتريا اللاهوائية (Anaerobic Bacteria) تحت ظروف قاسية لذلك معظم الأوكسجين سوف يتم ازالته أو أن الزيت ممكن أن يتقطر نتيجة التحلل الجزئي للحطام بفعل الحرارة العالية المتولدة بسبب حركة الأرض، حيث ينتج سائل لزج داكن اللون يسمى بالنفط الخام.

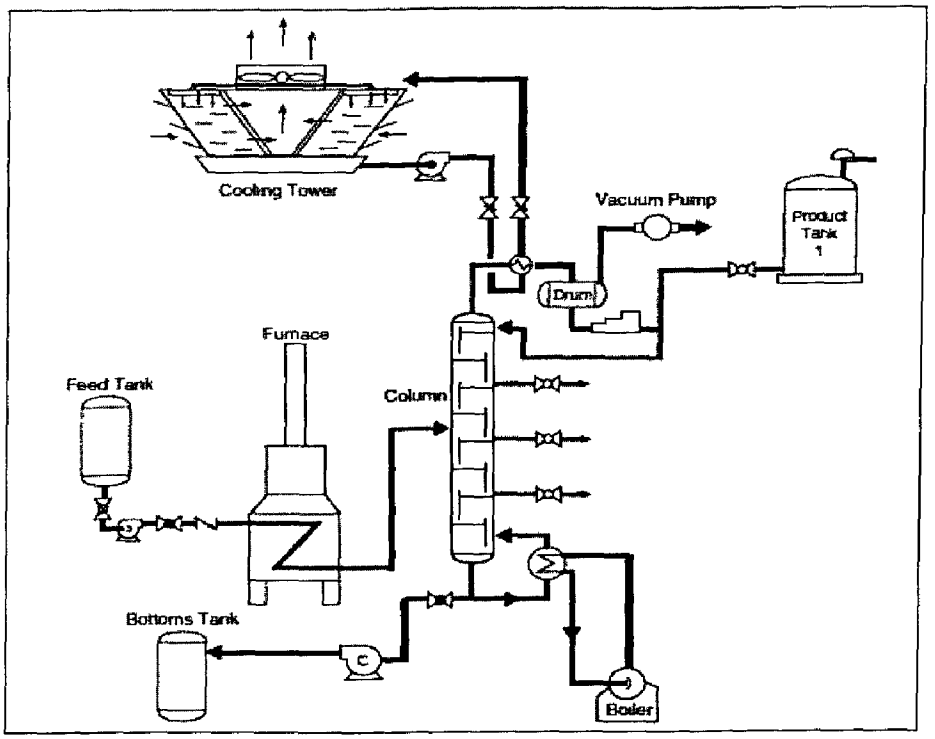
هذه النظرية مدعومة بواسطة العديد من علماء الجيولوجيا وذلك لوجود الكبريت والنتروجين والمركبات العضوية الفعالة في ذلك النفط الخام الناتج من تحلل الحيوانات والنباتات، وان المؤيدين لهذه النظرية يدعمونها بإمكانية الحصول على النفط الخام من عملية تقطير الأسماك. بشكل عام لا توجد ميكانيكية مقبولة لحد الآن تثبت بشكل حقيقي عن اصل النفط الخام.

2-5-9 تصفية النفط الخام Refining of Crude Oil

بشكل عام النفط الخام المأخوذ من الآبار (wells) هو عبارة عن مزيج من الهايدروكاربونات الصلبة والسائلة والغازية يحتوي على الرمال والماء. بعد إزالة الأوساخ، الماء، الرمال ومعظم الشوائب الأخرى، النفط الخام يضخ إلى برج التقطير (Distillation Column).

حيث تعد عملية التقطير التي يتم فيها فصل مكونا ت النفط خلالها هي الخطوة الأولى في مجال الصناعات النفطية. هذه أهم عمليات التكرير إذ إنها

بالإضافة إلى الفصل تلعب دورا مهما في تكرير المنتجات النفطية وفقا للمواصفات التسويقية. أن من أهم خواص المشتقات النفطية هي قابلية التطاير أو التبخر وتعتمد بالدرجة الأساس على الوزن الجزيئي (Molecular Weight). حيث كلما كان الوزن الجزيئي كبيرا تنخفض قابلية التبخر للقطفات النفطية. فالكازولين Gasoline يتبخر في الظروف الجوية الاعتيادية من الضغط ودرجة الحرارة (1atm,25°C) أما المنتجات الأخرى كالكيروسين(النفط الأبيض) Kerosene وزيت الوقود Oil Fuel فإنهما يتبخران بدرجة حرارة أعلى من الكازولين. ترتبط قابلية التبخر بدرجة الغليان، فالسائل الذي درجة غليانه واطئة يكون أكثر تبخرا من السائل الذي تكون درجة حرارته مرتفعة، وعند تسخين سائل ما تزداد طاقة جزيئاته ويصبح في مقدور عدد كبير منها تخطي سطح السائل إلى الفضاء، أي أن عدد كبير من جزيئاته يتحول إلى بخار وعندما يعادل ضغط البخار الضغط الجوي يبدئ السائل بالغليان وتشكل درجة الحرارة التي يغلي عندها السائل النقي درجة غليانه. وتبقى هذه الدرجة ثابتة إلى أن يتبخر جميع السائل. إذا لكل سائل درجة غليان خاصة به عندما يكون ذلك السائل بحالته النقية.



الشكل رقم (2-2) يبين برج التقطير مع جميع الاجهزة الملحقة به

للحصول على أنواع مختلفة من النواتج، يسخن النفط باستخدام الأفران الأنبوبية قبل دخوله إلى برج التقطير إلى درجات حرارية قريبة من درجة حرارة الغليان، إذ يتم الفصل على أساس درجة غليان القطفات النفطية، حيث كلما كانت درجة الغليان واطئة يتم الفصل في أعلى برج التقطير كالنفثا ثم يتم فصل بقية المنتجات من الأعلى إلى الأسفل بالترتيب وبحسب الارتفاع في درجة حرارة القطفة نزولا إلى أسفل البرج لحصول على الوقود الثقيل (Heavy Fuel) أو ما يسمى بمتبقي الوقود.

على هذا الأساس تتم عملية فصل القطفات النفطية من خلال برج التقطير حيث يسخن النفط الخام باستخدام مبادل حراري (Heat Exchanger)، يتم التبادل الحراري بين غازات الاحتراق (Flue Gases) بشكل معاكس داخل

أنابيب المبادل الحراري مع النفط الخام قبل دخوله إلى الفرن الأنبوبي، حيث ترتفع درجة حرارة النفط الخام إلى الدرجة الحرارية اللازمة لتبخير جميع المركبات السريعة التطاير. ويدخل المزيج الساخن إلى عمود التقطير بشكل رذاذ يتصاعد البخار إلى الأعلى وينزل السائل إلى الأسفل. وتأخذ عملية التكثيف وإعادة التبخير مجراها في قسم التصفية بإعادة التقطير (Rectifying) Sectionحيث تنساب القطفات الساخنة إلى الطبقة السفلى من العمود ويدخل إلى قسم النزع (Stripping Section) حيث يتم التخلص من أي منتجات خفيفة بفعل بخار الماء.

هناك عدة خطوات يجب مراعاتها في دخول النفط الخام إلى برج التقطير ممكن إجمالها بالاتي : -

1 - **كسر الاستحلاب** (Demulsification). ذكر سابقا أن وجود النفط الخام في الآبار أو المكائن النفطية تحت الأرض عبارة عن طبقات، العليا تسمى بالغاز المصاحب تليها طبقة النفط الخام ومن ثم طبقة الماء وبطبيعة الحال عند سحب النفط الخام من مكامنه هناك نسبة من الماء تسحب إلى الأعلى مع النفط الخام حيث يكون ممزوجا بشكل مستحلب يسمى محب للماء (Hydrophilic) عندما يكون على شكل (Oil-in-Water) أو كاره للماء (Hydrophobic) (Water-in-Oil) كلا النوعين يكونان أما ذات لون اصفر أو بني داكن. حالة الاستحلاب تكون مستقرة حسب وجود عوامل الاستحلاب في النفط الخام حيث أن في الحالة الأولى (Hydrophilic) تكون عوامل الاستحلاب ذاتية في الماء

وغير ذاتية في النفط والعكس صحيح في حالة(Hydrophilic). آلية كسر الاستحلاب اما ميكانيكية بطريقة الطرد المركزي، الحرارية، الكيماوية، الثرموكيماوية، أو الطريقة الكهربائية.

الطريقة الميكانيكية اكثر شيوعا في العراق، اما الطريقة الكهربائية تكون شائعة الاستعمال في بلدان أخرى في هذه الطريقة يتم تسليط مجال كهربائي ذات فولتية عالية تعمل على تحطم غشاء الاستحلاب.

2 - **إزالة الشوائب الضارة** (Removal of Harmful Impurities) مركبات $MgCl_2$ & NaCl تعملان على تآكل أجهزة تصفية النفط الخام وكذلك يسببان الترسبات في أنابيب التسخين لذلك يتم استخدام تقنية إزالة الملوحة (Desalting) الكهربائية للتخلص من هذين المركبين. أما إزالة مركبات الكبريت، يعامل النفط الخام بوجود اكاسيد النحاس لفصل الكبريت بعملية الفلترة (Filtration).

أما أهم المشتقات النفطية المنتجة من خلال عملية التقطير : -

1 - **الغازات غير المتكثفة (Uncondensed Gases)** وهي تكون ذات تركيب يتراوح بمعدل (CH_4 ، C_2H_{10}) درجات غليانها تتراوح (-0 30C°)، وهي سريعة الاشتعال وهي عادة تستخدم كوقود غازي.

2 - **الكازولين (Gasoline)** تكون مكوناتها ضمن المعدل ($C_{10}H_{22}$ ، C_5H_{10}) ومعدل درجات غليانها (30-200C°)، وبشكل عام تصنف درجات غليان الكازولين على إنها منخفضة، كذلك يمكن أن يجزأ الكازولين إلى عدة أجزاء:

a- بنزين الطائرات Aviation Spirit ، درجة غليانه (30-150 C°).

b- بنزين المحركات Motor Spirit ، درجة غليانه (40-130 C°).

c- البترول Petroleum Ether ، درجة غليانه (40-100 C°).

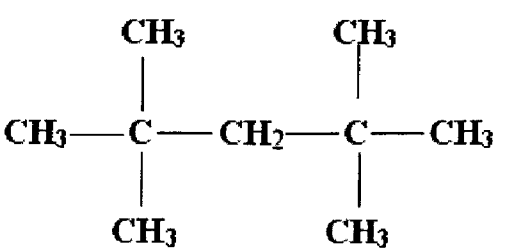
d- الزيت المتبخر Vaporizing Oil ، درجة غليانه (110-200 C°).

e- النفثا المذيبة Solvent Naphtha ، درجة غليانه (150-200 C°).

2-6-9 الرقم الاوكتاني Octane Number

خاصية الطقطقة التي يحدثها وقود الكازولين أثناء الاحتراق يمكن ان تحدد بقياس أعلى نتائج متحققة من الاحتراق مقارنة في محرك الاحتراق القياسي. هذه الطقطقة التي يحدثها الوقود يعبر عنها عادة بالعدد الاوكتاني.

ان الهايدروكاربون من نوع ايزو اوكتان (C_8H_{18}) Iso-Octane والتي لها التركيب ادناه



تمتلك خواص احتراق جيدة وكذلك انحرافها جدا قليل عند مزجها مع الهواء وذات درجة حرارة اتقاد عالية. لهذا تاخذ الرقم (100). من جهة أخرى السلسلة الطويلة من المركب الهايدروكاربوني n- هبتان (C_7H_{16}) n-Heptanes والذي يمتلك التركيب

$$CH_3_CH_2_CH_2_CH_2_CH_2_CH_2_CH_3$$

فانه يحدث طقطقة سريعة لذلك يأخذ الرقم الاوكتاني (صفر). لذلك يمكن تعريف الرقم الاوكتاني مع النسبة الحجمية من الايزو اوكتان في مزيج من الايزو اوكتان و n -هيتان، فعلا سبيل المثال مزيج يتكون من 75% ايزواوكتان و 25% n- هيتان فانة رقم الاوكتاني لهذا المزيج يساوي (75) لاحظ الجدول رقم (1).

الجدول رقم (2 -3) يوضح الرقم الاوكتاني لمجموعة من المركبات الهايدروكاربونية

Hydrocarbon	Octane Number
Benzene	100
Iso Pentane	90
Cyclohexane	77
2-Methyl Pentane	71
n-Pentane	62
n-Hexane	26

3 - **الكروسين (النفط الأبيض) Kerosene** وهو يقع ضمن ($C_{16}H_{34}$ ، $C_{11}H_{22}$) ودرجة غليانه تتراوح بين (C° 140-290)، الكثافة النوعية (0.75-0.85) اما لونه فانه يتباين بين عديم اللون أو اصفر مخضر أو اخضر خفيف، يجب أن يكون الكيروسين خالياً من المركبات العطرية والمركبات الهيدروكاربونية غير المشبعة والمركبات الحاوية على الكبريت، لان وجود مثل هذه المركبات يزيد من شدة الادخنة المتطايرة. ولتحديد نسبة المركبات الهيدروكاربونية غير المشبعة في الكيروسين يفضل انتاجه بطريقة التقطير الاعتيادي للنفط الخام على

طريقة التكسير الحراري للمشتقات النفطية. كما أن النفط الأبيض المنتج من نفط خام ذات اصل برافين يكون ذات نقاوة عالية مقارنة بذلك المنتج من اصل عطري.

أن من أهم الطرق المتبعة لتحلية الكيروسين هي طريقة الهدرجة (Hydrogenation) التي تتضمن معاملة النفط الأبيض بغاز الهيدروجين بوجود عامل مساعد كالكوبلت (Cobalt) اوالموليبدينوم (Molybdenum) بوجود ظروف خاصة من الضغط ودرجة الحرارة، في هذه الظروف تتفاعل المركبات الحاوية على عناصر الكبريت أو النيتروجين مع غاز الهيدروجين مكونة غاز كبريتيد الهيدروجين H_2S او الامونيا NH_3 على التوالي.

كما ان معظم السلاسل غير المشبعة تتفاعل مع الهيدروجين مكونة سلاسل الالكان Alkanes ، وبذلك يصبح الكيروسين ذا نقاوة وجوده عاليتين لأغراض التسخين والاستعمالات الأخرى.

4 - **زيت الغاز Gas Oil**، تكون مكوناته ضمن معدل ($C_{18}H_{38}$، $C_{16}H_{34}$) وذات درجات غليان تتراوح بين(C^o 250-370)، يستخدم كوقود في محركات الديزل Diesel Engines و زيوت التسخين.

تعد سرعة ماكنة الديزل من العوامل الرئيسة في تحديد نوعية الوقود الملائم للاحتراق. ويمكن تصنيف هذه المكائن إلى بطيئة ومعتدلة وعالية السرعة.

فالمكائن البطيئة تتراوح سرعتها (50-100 rpm) وهي تستعمل في المكائن الكبيرة الواقفة أو الوحدات البحرية، أما المعتدلة السرعة قان سرعتها تتراوح

بين(500-1500 rpm) وهي تستعمل في المولدات الكهربائية والمضخات والساحبات الزراعية والمجرفات الأولية، كما تستخدم المكائن السريعة والتي تتراوح سرعتها (1500-2000 rpm) أو أكثر من الحافلات والطائرات وغيرها.

يمكن معرفة القيمة العددية التي توضح جودة وقود الديزل من خلال ما يسمى دليل الديزل (Diesel Index)، وهو يحسب من خلال معرفة الكثافة والعدد الانيليني (AIP Gravity and Aniline Number)، حيث يشير المختصر API. إلى معهد النفط الأمريكي (American Petroleum Institute) حيث تقاس الكثافة بمقياس API. اما العدد الانيليني فانه يشير إلى درجة الحرارة التي عندها تصبح حجوماً متساوية من الانلين والمشتق النفطي.

علما أن الانلين يأخذ الصيغة (C_6H_5-NH_2)

$$\therefore \text{دليل الديزل} = \frac{\text{نقطة الانلين} \times \text{الكثافة API}}{100}$$

2-7-9 الرقم السّتاني Cetane Number

من الخواص المهمة لوقود الديزل التي يعبر عنها بالرقم السيتاني. السيتان ($C_{16}H_{34}$) هو هايدروكاربون مشبع يمتاز بإيقاد سريع جدا مقارنة مع أي وقود ديزل تجاري أخر، لهذا السيتان ياخذ الرقم السيتاني (100). في الجهة المعاكسة ان ألفا مثيل نفثالين ($C_{11}H_{10}$) وهو مركب هايدروكاربوني ارومائي يمتلك درجة اتقاد جدا طويلة مقارنة مع أي وقود ديزل أخر لذلك يأخذ الرقم السيتاني (صفر).

يعرف الرقم السيتاني لوقود الديزل هو النسبة الحجمية من السيتان في موزع من السيتان والنفثالين.

الرقم السيتاني يمكن أن يحسن (يزداد) بإضافة مواد تعرف بالدِمام (Dopes)، بالدِمام هو مواد كيماوية تضاف إلى وقود الديزل لزيادة الرقم السيتاني. وعادة تكون من نترات الاثيل Ethyle Nitrate ، نتريت الاثيل Ethyle Nitrite وبيرو كسيد الأسيتون Acetone Peroxide وهذه الإضافة لا تتجاوز 2% حجما بأي حال من الأحوال.

هناك إضافات كيماوية أخرى تضاف لوقود الديزل وذلك لمنع تكوين التصمغ Gum Formation وكذلك هناك إضافات معينة لتقليل الشد السطحي لوقود الديزل.

5 - الوقود الثقيل Heavy Oil تكون مكوناته (C17-C38)

هذا النوع يعد من القطفات الثقيلة وهو يستعمل كوقود في السفن Shapes، المراجل الأرضية Land Boilers وافران التعدين Metallurgical Furnaces، يستخدم برج التقطير الفراغي Vacuum Distillation للحصول على هذا النوع من الوقود وذلك لخضوعه لعملية التكسير مع تكون زيت خفيف ومتبقي كاربون.

يمكن استخلاص واستعادة المنتجات البترولية التالية في النفوط الثقيلة: -

a- زيوت التزيت Lubrication Oil مكوناته تتراوح بين ($C_{17}H_{36}$ - $C_{20}H_{42}$).

b- شمع البرافين Paraffin Wax مكوناته بحدود بين ($C_{20}H_{42}$ - $C_{28}H_{58}$)

وهـو يسـتخدم في تحضـير الشـموع (قناديـل)، شمـع الـورق، العـوازل الكهربائية وتشميع القوارب.

c - الفـازلين Vaseline أو الجلـي Jelly، ويسـتخدم في مستحضـرات التجميل، الأغراض الطبية، المراهم وكذلك التزيت.

d- زيوت التشحيم Lubrication Greases.

e- الإسفلت Asphalt، هـو يستخدم في اكساء الطرق، تصميت السطوح ضد الماء.

10-2 الوقود الغازي Gaseous Fuel

يأتي الوقود الغازي بالمرتبة الثانية من حيث الأهمية بعد الوقود السائل وكما له فوائد فأن له مضار ونجملها بالاتي

ومن فوائد الوقود الغازي Advantage of Gaseous Fuel

1 - الوقود الغازي ممكن أن يصنع في مواقع مركزية ويوزع الى مساحات واسعة بواسطة خطوط الأنابيب ويستعمل مباشرة عكس بعض أنواع الفحم الحجري Coal التي تحتاج إلى ان تتحول الى وقود غازي قبل أن تستعمل.

2 - الوقود الغازي يكون نظيفاً جداً أثناء عملية الاحتراق، فهو يحترق بدون دخان ورماد، حيث الرماد والدخان يمثل جملة مشاكل عند احتراق الوقود السائل أو الصلب.

3 - الاتقاد آني لهذا النوع من الوقود، وكذلك سهولة الاحتراق عند الاستخدام والاحتراق يبقى تحت السيطرة.

4 - الغازات قابلة للمزج مع الهواء لذلك كمية الهواء الزائد بالنسبة لاحتراق الوقود الغازي يكون اقل من كميته بالنسبة لاحتراق الوقود السائل أو الصلب.

5 - أثناء احتراق الوقود الغازي يمكن استثمار حرارة الغازات الخارجة Flue Gases وذلك من خلال إمرارها في معيدات التسخين Preheating وذلك لتسخين الوقود الداخل قبل الاحتراق وذلك لزيادة كفاءة الاحتراق.

10-1-2 مضار الوقود الغازي Disadvantages

1 -الوقود الغازي يكون سريع اللهب inflammable ، لهذا يحتاج إلى عناية خاصة لتجنب المخاطر.

2 -يحتاج إلى حجم كبير للتخزين.

10-2-2 الغاز الطبيعي Natural Gas

يوجد الغاز الطبيعي بكميات هائلة مصاحبا للنفط الخام أو في آبار مستقلة. ويمكن نقلة من الآبار لمساحات طويلة عبر أنابيب ناقلة أو عبر النقل البحري، يعد الغاز الطبيعي مصدرا مكملا لغاز الفحم وقد جرت محاولات للحصول على غاز الميثان المتجمع بين كتل الفحم الحجري بحفر ثقوب مناسبة غير أن هذه التجارب لم يكتب لها النجاح اقتصاديا.

يحتوي الغاز الطبيعي على ما لا يقل عن 95% من الهايدروكاربونات، اما الباقي فيتكون من النتروجين وثنائي اوكسيد الكاربون يكون مصحوبا في حالات قليله بكبريتيد الهيدروجين. المركب الأساسي المكون للغاز الطبيعي، هو عادة غاز الميثان (CH_4) والذي هو اخف البارافينات الهيدروكاربونية واكثرها تطايرا، أما المركبات التي تتميز بدرجات غليان أعلى، هي الايثان (C_2H_6) والبروبان (C_3H_8) والبيوتان (C_7H_{16})، فإنها توجد بنسب متفاوتة. أن ما يتراوح (70-100%) من مكونات الغاز الطبيعي هو الميثان الجدول (2 -4) يوضح معدل مكونات الغاز الطبيعي من مركبات الهايدروكاربونية كنسب مئوية حجمية.

جدول (2 -4) يوضح مكونات الغاز الطبيعي من مركبات الهايدركاربونية مع درجات الغليان لهذه المركبات(النسب تختلف حسب مصدر الغاز)

Hydrocarbon	Formula	Boiling Point at 1atm and 25 C°	% Volume Percentage (Average)
Methane	CH_4	161.5 -	88.5
Ethane	C_2H_6	88.5 -	5.5
Propane	C_3H_8	42.2 -	3.7
Butane(Iso)	C_4H_{10}	12.1 -	1.8
Bentane(Iso)	C_5H_{12}	27.9 +	(0.5)

ـبعض المركبات الهايدروكربونية للغاز الطبيعي تكون سائلة في الظروف الجوية الاعتيادية كالبنتان والهكسان والهبتان لذلك عندما تكون من مكونات الغاز الطبيعي يسمى عندها الغاز الطبيعي بانه رطبا (Wet or Rich) أما إذا لم

توجد وكانت مكونات الغاز فقط ميثان وايثان وكميات قليلة جدا من المركبات الهيدروكاربونية الأخرى فانه يسمى غازا جافا (Lean or Dry).

الغاز يصحب الغاز الطبيعي تجمعات النفط الخام كلها تقريبا أينما وجدت، اذ يكون ذائباً في النفط تحت ضغط وحرارة المكمن (Reservoir)، كما انه غالبا ما يشكل غطاء من الغاز الطليق يعلو النفط الخام ، غير ان التجمعات الغاز غالبا ما تكون مستقلة عن تجمعات النفط وتسمى عندئذ(بالغاز غير المصاحب).

يعرف احتياطي الغاز الطبيعي دائما بأنه إما غاز مصاحب أو غير مصاحب وهذا التميز مهم للغاية، فإنتاج الغاز المصاحب(Associated Gas) يعتمد على إنتاج النفط الخام الذي يوجد بصحبته، ويقتصر الإنتاج ذلك على الغاز المذاب إذ أن إنتاج الحد الأقصى في النفط الخام يجعل من انتاج غاز غطاء المكمن غير مرغوب فيه وقد يتم إنتاج كميات كبيرة من الغاز المصاحب تفيض عن الحاجات المحلية أو إمكانات التصدير، فيضطر عندها إلى حرق الكميات الفائضة من ذلك الغاز المصاحب.

أن الغاز الطبيعي ممكن أن يحتوي على (H_2، CO ، CO_2 وH_2S) حيث أحيانا يصل محتوى الغاز الطبيعي من H_2S إلى 15% كما هو الحال في فرنسا (Lacq) أن القيمة الحرارية للغاز الطبيعي تتروح ($8000\text{-}14000\ Kcal/m^3$).

تجري على الغاز عمليات مختلفة قبل وصولة إلى المستهلك، واحدة من المعالجات المهمة هو استرجاع الأبخرة الهايدروكاربونية السائلة بطريقة التكثيف (ضغط وتبريد) بعملية الامتصاص بالزيت (Absorption in Oil) أو الاهتزاز

باستخدام السليكا او الالومنيا أو الفحم لبنياتي (Charcoal). أن السائل المسترجع بهذه الطرق يعرف بالبنزين الواقي (Casing head Gasoline). أما عمليات التنقية الأخرى التي تجري للغاز الطبيعي وذلك لتخليصه من الماء، الغبار، H_2S ، CO_2 ، N_2 فانه يمكن استخدام محلول ايثانول امين الأحادي Mono-Ethanal-Amine ($(NH_2C_2H_4OH)$) للتخلص من H_2S, CO_2 وكما في المعادلات التالية:

$$2NH_2C_2H_4OH + H_2S \longrightarrow (HOC_2H_4NH_3)_2\ S \quad \text{.....(12-2)}$$

$$2NH_3 + H_2S \longrightarrow (NH_4)_2\ S \quad \text{.....(13-2)}$$

$$2NH_3 + H_2CO_3 \longrightarrow (NH_4)_2\ CO_3 \quad \text{.....(14-2)}$$

حيث يتحد الايثانول أمين الأحادي مع كبريتيد الهيدروجين وثاني اوكسيد الكبريت ويزيلهما من الغاز الطبيعي ويتحرران هذان الغازان بسهولة بالتسخين.

لذلك من الممكن استرجاع الكبريت (S) من H_2S المصاحب للغاز الطبيعي:

$$2H_2S + 3O_2 \longrightarrow 2SO_2 + 2H_2O \quad \text{.....(15-2)}$$

$$2H_2S + SO_2 \longrightarrow S + 2H_2O \quad \text{.....(16-2)}$$

يستخدم الغاز بشكل أساسي كوقود في مراجل محطات توليد الطاقة الكهربائية والمراجل الصناعية الأخرى.

10-3-2 غاز البترول المسال Liquefied Petroleum Gas(LPG)

يتكون غاز البترول المسال بشكل عام من البروبان (C_2H_8) و البيوتان (C_4H_{10})، بالرغم من طبيعتها الغازية في درجة الحرارة والضغط الجوي الاعتياديين يمكن إسالتهما بضغط مساو لعدة ضغوط جوية ومن ثم خزنها كسوائل في اوعية خفيفة وبدرجات الحرارة الاعتيادية.

يمكن الحصول على مقادير كبيرة من هذين الغازين من الغاز الطبيعي أو من عمليات التكرير، ويعالج هذان الغازان بالضغط لإنتاج أصناف مختلفة من غاز البترول المسال وهي البروبان البخاري والبيوتان البخاري والمزيج البخاري للصنفين بحيث تم موالفتهما في الغالب وفقا للنسب المطلوبة والتي تتغير حسب فصول السنة فتزداد نسبة البيوتان صيفاً وتقل شتاءً.

تضبط جودة غاز البترول المسال بدقة وفقا لمواصفات معينة فيما يختص بضغط البخار والمحتويات الكبريتية ومحتويات الرطوبة وبما أن هذه المنتجات تباع في أوعية ضاغطة مقفلة فليس هناك مجال لفسادها.

10-4-2 غاز الفحم Coal Gas

يتم انتاج هذا النوع من الوقود الغازي وذلك بتكوينه Carbonization الفحم أي بتسخين الفحم بمعزل عن الهواء، حيث يكون الفحم غني بالمواد المتطايرة (30-40%) في معوجة (Retorts)مصنوعة من السليكا أفقية او عمودية في درجات حرارة اكثر من ($350\ C^o$) حيث يكون الغاز هو الناتج الرئيس غاز الفحم في الاقطار الاوربية يستعمل بشكل اساسي في التسخين المنزلي ولأغراض

الإضاءة حيث يسمى عندها بغاز المدينة (Town Gas). ومن مميزات غاز الفحم يظهر بدون لون وذات رائحة ويشتعل بلون دخان طويل وهو أخف من الهواء وذوبانية ضعيفة في الماء.

القيمة الحرارية تتراوح $Kcal/m^3$ 4000-5000 ومعدل مكوناته في جدول(2 -5)

جدول رقم (2 -5)

يوضح النسب الحجمية لمكونات غاز الفحم

Formula	Volume %
CH_4	32
CH_2	47
CO	7
C_2H_2	2
C_2H_4	3
N2	4
CO_2	1
Other	4

2-5-10 غاز المولدات Producer Gas

يكون هذا النوع من الغازات مزيج من الهيدروجين وأول اوكسيد الكاربون مع نسبة ضئيلة من ثاني اوكسيد الكاربون. وهو ينتج من لاحتراق الجزئي لأي ماده كربونية مع الهواء الرطب حيث يمر خلال طبقة سبيكة من الفحم او من فحم الكوك الساخن

$$C + \frac{1}{2} O_2 \longrightarrow CO \quad \text{..... (17-2)}$$

$$C + H_2O \longrightarrow CO + H_2 \quad \text{..... (18-2)}$$

تضبط حرارة التفاعل عند درجة حرارة (1050 °C) لضمان تحويل ثاني اوكسيد الكاربون الذي قد يتكون الى أول اوكسيد الكاربون بالاختزال.

$$CO_2 + C \longrightarrow 2CO \quad \text{..... (19-2)}$$

يستعمل هذا النوع من الوقود بشكل أساسي كوقود للأفران وكذلك يمكن استعماله كوقود لمحركات الاحتراق الذاتي.

مكونات غاز المولدات يعتمد على طبيعة الوقود المستعمل وان القيمة الحرارية تتراوح (14201160- $Kcal/m^3$) .

اما اهم مميزاته الجديدة: -

1 - هو رخيص ونظيف وسهل التحفيز بحيث يمكن تحفيزه من اقل رتب الفحم الحجري.

2 - يستعمل في الافران المفتوحة، أفران الزجاج، الأفران الكاتمة.....الخ.

3 - يستعمل في تسخين المعوجات (Retorts)المستخدمة في تصنيع غاز الفحم وفي صناعات الكربونية.

4 - ممكن ان يستخدم كعامل اختزال في العمليات التعدينية (Metallurgical Operations).

5 - يستعمل كوقود في الصناعات السيراميكية والحراريات. (Refractors)

اما مميزاته الرديئة فأن قيمته الحرارية واطئة.

10-6-2 غاز الماء Water Gas

هو عبارة عن مزيج من أول اوكسيد الكاربون CO (40-42%) والهيدروجين H_2 (48-51%) حيث ينتج بتفاعل فحم الكوك مع البخار بدرجة حرارة (900 C^o).

$$C + H_2O \longrightarrow CO + H_2 \quad \text{.....(20-2)}$$

القيمة الحرارية لهذا النوع من الوقود الغازي تتراوح (2580-2670) $Kcal/m^3$، غاز الماء يحرق بلهب ازرق وهو يستعمل من إنتاج الهيدروجين والامونيا الصناعية وفي الصناعات السيراميكية وصناعة الزجاج.

10-7-2 غاز الماء المكربن Carbureted Water Gas

بما ان غاز الماء Water Gas له قيمه حرارية واطئة نوعا ما لذلك يمزج مع زيت الغاز (Oil Gas) في حيز تفاعل ذات درجة حرارة عالية حيث يتفاعل غاز الماء مع المنتجات المتطايرة والمركبات ذات الوزن الجزيئي القليل، الناتجة من التكسير الحراري لزيت الغاز ويكون الناتج غاز الماء المكربن حيث ترتفع قيمته الحرارية بشكل ملحوظ مقارنة بغاز الماء ..ان القيمية الحرارية لهذا النوع من الوقود تتراوح (3500-4400 $Kcal/m^3$) ويستخدم هذا النوع من الوقود في الهدرجة والصناعات الكحولية.

2-8-10 غاز فرن الصهر Blast Furnace

ان الاحتراق غير التام لفحم الكوك في الأفران العاصفة المستخدمة في التعدين ينتج أول اوكسيد الكاربون. لذلك ان غازات الاحتراق (Flue Gases) الخارجة تحتوي على نسبة عالية من أول اوكسد الكاربون وان المكونات الخارجة يمكن ان تحتوي بشكل تقريبي على المكونات التالية.

جدول (2 -6)

يوضح النسب الحجمية لمكونات غاز فرن الصهر

Formula	Volume %
CO	29
H_2	3
CO_2	11
N_2	57

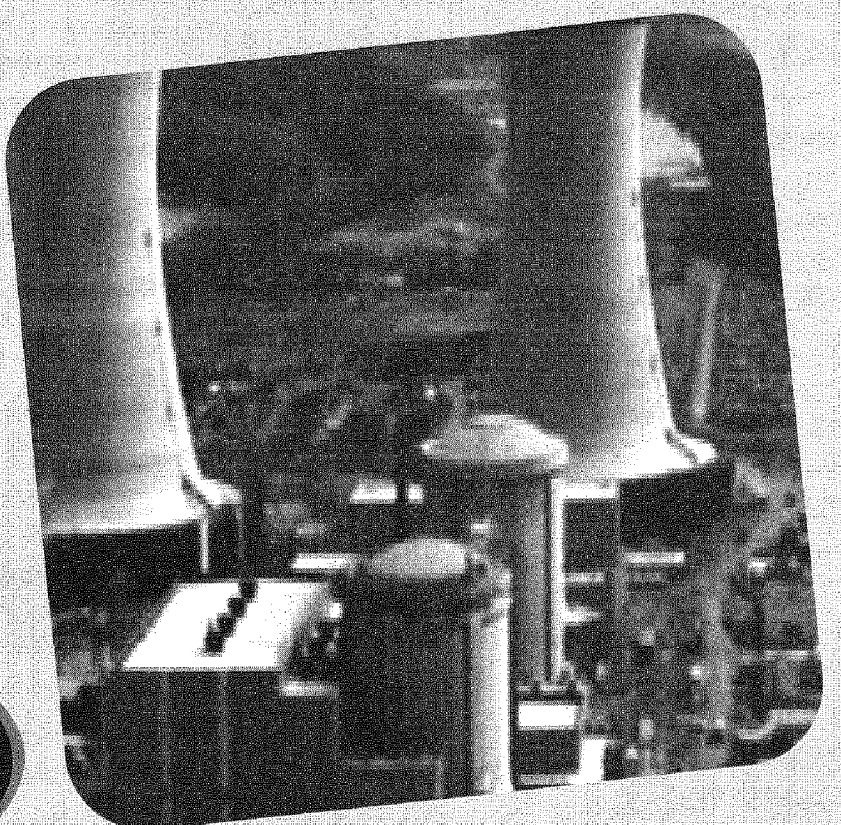
ان القيمة الحرارية لهذا النوع من الوقود تكون منخفضة وتكون بحدود (850) $Kcal/m^3$ وهو يحتوي على كميات غير قليلة من الغبار Dust ويحتاج الى التنظيف قبل الاستعمال.

2-9-10 غاز المجاري Sewerage Gas

يسمى هذا النوع من الوقود الغازي بغاز المجاري وذلك لأنه ناتج في الأنابيب الناقلة للمياه الثقيلة ومحطات معالجة المياه الثقيلة ينتج هذا الغاز بفعل عمليات الهضم اللاهوائية (Anaerobic Digestion)لنفايات المجاري حيث يحتوي على ما يقارب (65%-80) من غاز الميثان لذلك فهو وقود جيد ، حيث يستعمل هذا النوع من الوقود في مدن عديدة في العالم.

الفصل الثالث

الاحتراق



3

الفصل الثالث

الاحتراق

3-1 الاحتراق Combustion

الاحتراق هو عبارة عن تفاعلات كيمياوية باعثة للحرارة متعاقبة ومركبة بين الوقود والأوكسجين لانتاح حرارة أو حرارة وضوء بشكل وهج (Glow)أو لهب (Flames) يحترق الوقود احتراق كامل او احتراق غير كامل في حالة الاحتراق الكامل، مثلا تفاعل الميثان CH4 مع العنصر المؤكسد كالأوكسجينO_2، حيث ان نوع من أنواع الوقود يتفاعل مع اوكسجين الهواء لإعطاء نواتج الاحتراق كما في المعادلة التالية: -

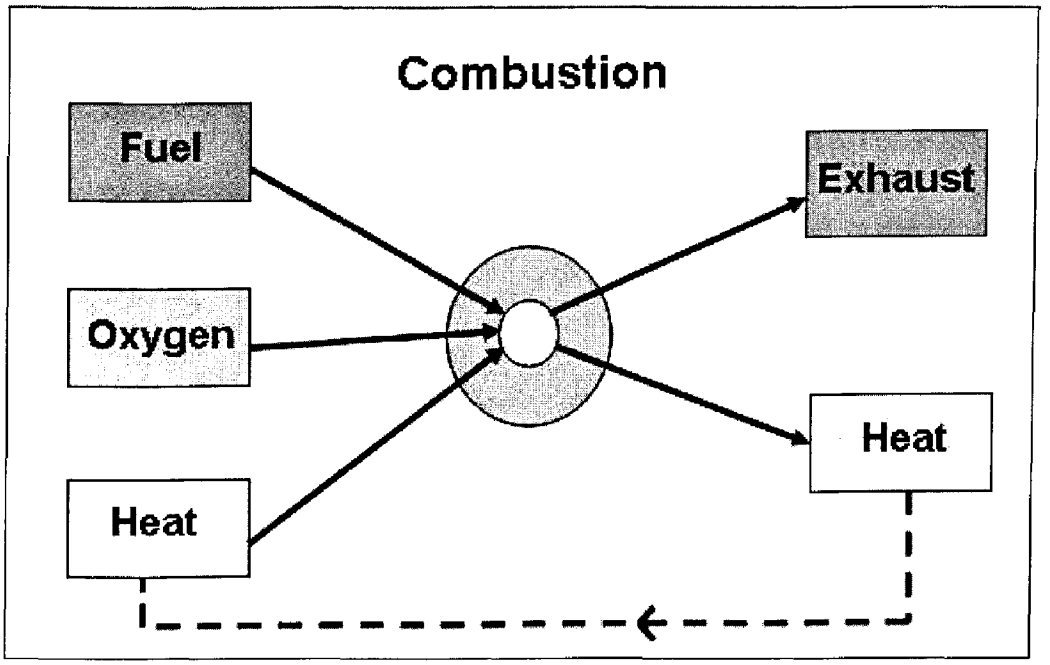
Methane + Oxygen ⟶ Carbon Dioxide + Water Vapor

$$CH_4 + 2O_2 \longrightarrow CO_2 + 2H_2O \quad \text{.....(1-3)}$$

و مثال بسيط لاحتراق الهيدروجين H_2 مع الاوكسجين هو ذلك التفاعل الشائع بينهما في المحركات الصاروخية

Hydrogen + Oxygen ⟶ Water Vapor

$$2H_2 + O_2 \longrightarrow 2H_2O \quad \text{.....(2-3)}$$



شكل رقم (3 -1) مخطط يوضح تفاعلات احتراق الوقود

في الاستعمال العامة للوقود في تفاعلات الاحتراق، يكون الحصول على كمية الاوكسجين اللازمة للاحتراق من الجو المحيط (Ambient Air). حيث يكون الهواء تقريبا من 79% حجما من النيتروجين وهو غاز غير قابل للتفاعل و21% حجما من الاوكسجين، حيث ان نواتج الاحتراق تحتوي على نفس النسبة الحجمية من النتروجين الداخلة مع الاحتراق بالاضافة الى نواتج الاحتراق الاخرى.

Nitrogen +Methane+ Oxygen +Nitrogen ⟶ Carbon Dioxide + Water Vapor

$$CH_4 + 2O_2 + 7.52\ N_2 \longrightarrow CO_2 + 2H_2O + 7.52\ N_2 \quad \ldots.(3\text{-}3)$$

من خلال ذلك يظهر ان الهواء مصدر الاوكسجين اللازم للاحتراق والنتروجين هو الجزء الاكبر الذي يتواجد في نوانج الاحتراق.

في الحقيقة ان عمليات الاحتراق لا تتم بشكل كامل. لذلك ان غازات المدخنة (Flue Gases) الناتجة من احتراق الكاربون (احتراق الفحم الحجري) او

مكونات الكاربون كاهيدروكاربونات، الاخشاب ...الخ تحتوي على غازات اول اوكسيد الكاربون CO او اكاسيد النايتروجين NO_x بالاضافة الى غازات مثل ثاني اوكسيد الكاربون CO_2 وبخار الماء H_2O واكاسيد الكبريت في حالة احتواء الوقود على نسبة الاكاسيد الكبريتية (SO_3, SO_2, SO).

3-1-1 انواع الاحتراق Type of Combustion

1. الاحتراق السريع Rapid Combustion

الاحتراق السريع هو الذي يحرر خلال عملية الاحتراق كميات كبيرة من الطاقة الحرارية والضوء. هذا النوع من الاحتراق يستعمل في مكائن الاحتراق الداخلي (Engines) وعمليات الثرموبارك الخاصة بالاسلحة (Thermobaric Weapons) في بعض الاحيان احجام كبيرة من الغاز تتحرر عند الاحتراق بالاضافة الى الطاقة الحرارية والضوء، الكمية الكبيرة من الغازات المتحررة فجأة تخلق زيادة في الضغط لذلك النواتج تصدر اصوات عالية لهذا يسمى احياناً هذا النوع من الاحتراق بالاحتراق الانفجاري .

2. الاحتراق البطيء Slow Combustion

الاحتراق البطيء هو النوع من الاحتراق الذي يحدث في درجات حرارية واطئة، التنفس الخلوي (Cellwar Respiration) هو احد نواتج الاحتراق البطيء.

3. الاحتراق المضطرب Turbulent Combustion

الاحتراق المضطرب هو خاصية بالاحتراق الذي يتم بواسطة الجريان المضطرب. وهو يستخدم في التطبيقات الصناعية كما في التوربينات الغازية ومكائن الديزل وذلك لان الاضطراب يساعد على مزج الوقود مع المؤكسدات.

4. الاحتراق في حالة انعدام الجاذبية Microgravity Combustion

في هذا النوع من الاحتراق ان اللهب يتصرف بشكل مختلف في ظل الجاذبية القليلة (Microgravity). ان ابحاث الاحتراق في حالة الجاذبية القليلة تسهم بشكل فاعل على فهم الاحتراق الامن في الفضاء والطبيعة الفيزياوية للاحتراق في الفضاء الخارجي.

5. الاحتراق غير الكامل Incomplete Combustion

الاحتراق غير الكامل يحدث في حالة عدم الحصول على الكمية الكافية من الاوكسجين وذلك لاتاحة الفرص للوقود للتفاعل الكامل مع الاوكسجين لانتاج ثاني اوكسيد الكاربون CO_2 وبخار ماء H_2O. نوعية الاحتراق من الممكن ان تحسن بالتصميم الافضل لغرف الاحتراق (Combustion Chamber) كالافران وغرف احتراق المراجل البخارية ومكائن الاحتراق الداخلي. كذلك من الممكن تحسين عملية الاحتراق غير الكامل للوصول الى احتراق جيد وذلك باضافة عوامل مساعدة (Catalytic) على الاحتراق او بواسطة ارجاع جزئي لغازات الاحتراق مع الهواء الداخل الى غرف الاحتراق لزيادة كفاءة الاحتراق.

6. الاحتراق الداخن Smouldering Combustion

الاحتراق الداخن هو نوع من انواع الاحتراق الذي يتم بلا لهب (Flameless) ان اساس الاختلاف بين الاحتراق الداخن والاحتراق ذات اللهب، ان الاحتراق الداخن تتم عملية الاكسدة على سطح الوقود الصلب بالاضافة الى حدوثة في الطور الغازي. ان درجات الحرارة والحرارة المتولدة خلال عملية الاحتراق الداخن تكون قليلة مقارنة بالاحتراق ذات اللهب (600-1500 $^{\circ}C$).

7. الاحتراق مع المؤكسدات الاخرى Combustion with Other Oxidants

يعد الاوكسجين بوجه عام هو المؤكسد الاساسي في عمليات الاحتراق، لكن هناك مؤكسدات اخرى كاوكسيد النيتروجين NO الذي يستخدم في المحركات النفاثة وسيارات السباق، وكذلك الفلوراين (F_2) الذي يعتبر من المؤكسدات المستخدمة في تفاعلات الاحتراق، فعلا سبيل المثال مزيج من غازات الفلوراين والميثان المستخدمة في عمليات الانفجارات.

8. الاحتراق الذاتي Spontaneous Combustion

الاحتراق الذاتي هو صفة ملازمة للفحم الحجري (Coal). حيث عند خزن الوقود الصلب (الفحم الحجري) لفترات طويلة يحدث نوع من انواع الاكسدة البطيئة، عملية اكسدة الفحم الحجري من نوع العمليات الباعثة للحرارة (Exothermic) لذلك ان الاكسدة البطيئة تنتج حرارة تعمل على زيادة درجة الحرارة الى الدرجة الحرارية التي يتم عندها الاشتعال بدون تدخل خارجي أي

بدون توفير لهب خارجي لحدوث عملية الاحتراق، هذه الظاهرة تسمى بالاحتراق الذاتي.

3-2-1 تحليل غازات المدخنة Flue Gas Analysis

مجموعة الغازات مثل (O_2، CO_2، CO) الناتجة من الاحتراق في غرف الاحتراق تسمى غازات المدخنة او غازات الاحتراق. تحليل غازات الاحتراق الخارجة من الافران او من عادم السيارات والطائرات وجميع المركبات ذات الاحتراق الداخلي تعطي فكرة عن كفاءة عملية الاحتراق.

تحليل غازات المدخنة يتم بجهاز يسمى بجهاز الاورسات (Orsat's Apparatus) وهي عبارة عن انبوب افقي احد نهايه الاخرى مرتبطة بسحاحة (Burette).

السحاحة مدرجة لحد ($100\ cm^3$) ومحاطة بجاكيت من الماء وذلك للحفاظ على درجة حرارة السحاحة بشكل منتظم، وهي مرتبطة بانبوب من المطاط وذلك لفصل الماء (H_2O)، من جهة اخرى ان الانبوب الافقي لجهاز الاوسان مرتبطة بثلاث انابيب بصلية (A,B and C) هذه الانابيب تستخدم لامتصاص (CO, O_2,CO_2)، البصيلة A تحتوي على هيدروكسيد البوتاسيوم KOH تستخدم لامتصاص (Absorption) غاز CO_2 والبصيلة B تحتوي على البايروكلول (Pyrgallol) تسخدم لامتصاص الاوكسجين O_2، اما البصيلة C فانها تحتوي على محلول كلوريد الالمنيوم (Aluminum Chloride) يستخدم لامتصاص (CO) تملاء البصيلات (A,B,C) الامتصاص بالمحاليل المذكورة اعلاة في نفصس الوقت يكون الصمام (Stopcocks) مغلق بعدها يتم فتح ذلك الصمام الى المحيط الخارجي وتملا السحاحة بالماء من قمع الفصل (Separating Funnel)

الى ان تملاء بالكامل بحيث يتم طرد جميع الهواء الموجود في السحاحة، بعد ذلك يتم ربط الصمام الثلاثي من خلال مصدر تجهيز غازات الاحتراق بحيث تملاء لحد ($100\ cm^3$) بعد طرد الماء من السحاحة ، عندها يتم فتح صمام بصيلة الامتصاص A التي تحتوي على KOH بحيث يمر الغاز خلال تلك البصيلة نتيجة ضغط الماء القادم من قمع الفصل الى السحاحة عندها يصبح غاز الاحتراق في تماس مع KOH الذي يعمل على امتصاص ثاني اوكسيد الكاربون CO_2 بعدها يتم طرد الغاز مرة ثانية الى السحاحة من خلال خفض ضغط الماء في السحاحة ومن ثم تعاد العملية لاكثر من مرة لضمان امتصاص جميع غاز ثاني اوكسيد الكاربون اثناء مرورة في البصيلة A الحاوي على KOH. ان نقصان حجم غاز الاحتراق عن ($100cm^3$) هذا النقصان يمثل حجم (CO_2) في غاز الاحتراق، تتكرر العملية بالنسبة B والبصيلة C اللذان يمتصان غاز (O_2 و CO) على التوالي وان النقصان في الحجم نتيجة مرور الغاز في البصيلة يمثل الاوكسجين والنقصان في حجم الغاز نتيجة لمرورة في البصيلة C يمثل اول اوكسيد الكاربون CO بعد ذلك يتم معرفة حجم النتروجين في غازات الاحتراق من خلال المعادلة التالية : -

$$[CO_2 + O_2 + CO = 100 - N_2]_{\text{نسبة حجمية}} \quad \text{.....(4-3)}$$

4-3-1 اهمية تحليل غازات الاحتراق Significance of Fule Gas Analysis

1- اذا كانت غازات الاحتراق تحتوي على نسبة من غاز اول اوكسيد الكاربون CO، هذا مؤشر على ان الاحتراق غير كامل وكذلك مؤشر على ان كمية الاوكسجين المجهزة للاحتراق قليلة.

2- اذا كانت غازات الاحتراق تحتوي على كمية من غاز الاوكسجين O_2 هذا مؤشر عى ان كمية الهواء الزائد اللازمة لحدوث عملية الاحتراق اكثر من اللازم. في الافران الاعتيادية يجهز بكمية هواء زائد Axcess Air من (30 – 100%). ان الزيادة الغير مطلوبة من الهواء الزائد المجهزه لغرف الاحتراق تعمل على نقصان كمية الحرارة المتحررة نتيجة لعملية الاحتراق.

2-3 حسابات الاحتراق Combustion Calculation

كمية الاوكسجين او الهواء [وزنا او حجما] المطلوب لحدوث عملية احتراق كامل لكمية معينة من الوقود ممكن ان تحسب من خلال الاعتبارات التالية: -

اولا : - من الضروري معرفة الاوزان الجزيئية (Molecular Weights)، للعناصر او المركبات المكونة للوقود والناتجة اثناء عملية احتراق ذلك الوقود، حيث يتم ذلك من خلال كتابة معادلة تفاعل الوقود مع الاوكسجين ، مثال

$$C + O_2 \longrightarrow CO_2 \quad \text{.....(5-3)}$$

(by Weight)	12	32	44
(by Volume)	1	1	1

12 جزء وزنا من الكاربون C تحتاج 32 جزء وزنا من الاوكسجين O_2 أي ان من CO_2 الناتج من التفاعل يحتاج الى 12 جزء وزنا من الكاربون C و 32 جزء من الاوكسجين او بعبارة أخرى 1 حجماً من الكاربون Cمع 1 حجماً من الاوكسجين O_2 ينتج 1 حجماً من ثاني أوكسيد الكاربون CO_2 .

ندرج بعض تفاعلات الاحتراق الشائعة : -

$$1- 2H_2 + O_2 \longrightarrow 2H_2O \quad \text{.....(6-3)}$$

$$\text{or } H_2 + O \longrightarrow H_2O \quad \text{.....(7-3)}$$

$$2- S + O_2 \longrightarrow SO_2 \quad \text{.....(8-3)}$$

$$3- 2CO + O_2 \longrightarrow 2CO_2 \quad \text{.....(9-3)}$$

$$\text{or } CO + \tfrac{1}{2} O_2 \longrightarrow CO_2 \quad \text{.....(10-3)}$$

$$4- CH_4 + 2O_2 \longrightarrow CO_2 + 2H_2O \quad \text{.....(11-3)}$$

$$5- C_2H_2 + \frac{5}{2} O_2 \longrightarrow 2CO_2 + H_2O \quad \text{.....(12-3)}$$

$$6- C_2H_4 + 3O_2 \longrightarrow 2CO_2 + 2H_2O \quad \text{.....(13-3)}$$

$$7- C_2H_6 + \frac{7}{2} O_2 \longrightarrow 2CO_2 + 3H_2O \quad \text{.....(14-3)}$$

النتروجين N_2 في الهواء الجوي او ان كان موجود في الوقود فانه لا يدخل في معادلة تفاعل الاحتراق لانه لا يتفاعل مع الاوكسجين على اعتبار ان الكمية الداخلة في النيتروجين هي نفسها تخرج مع غازات الاحتراق وكذلك الرماد (Ash) وثاني اوكسيد الكاربون CO_2 في حالة وجودهما مع الوقود فانهما لا يدخلان ايضا في معادلة الاحتراق كونهما لا يتفاعلان مع الاوكسجين من جانب اخر في حالة احتواء الوقود الداخل الى الاحتراق على كمية من الكبريت S، فان الكبريت يتفاعل مع الاوكسجين لتكوين اكاسيد الكبريت والتي جزء منها يتفاعل مع بخار الماء الناتج من عملية الاحتراق لتكوين حامض الكبريتيك H_2SO_4 وكالتالي: -

$$S + \tfrac{1}{2}O_2 \longrightarrow SO \quad \text{.....(15-3)}$$

$$SO + \tfrac{1}{2}O_2 \longrightarrow SO_2 \quad \text{.....(16-3)}$$

جزء يسير من SO_2 يتراوح (1-2%) يتحول الى SO_3

$$SO_2 + ½O_2 \longrightarrow SO_3 \quad \text{.....(17-3)}$$

والذي بدورة يتفاعل مع بخار الماء ليتحول الى حامض الكبريتيك

$$SO_3 + H_2O \longrightarrow H_2SO_4 \quad \text{.....(18-3)}$$

ثانيا : - الكمية الكلية (Theoretical) من الاوكسجين التي يحتاجها تفاعل الاحتراق تاتي من خلال جمع تفاعلات مكونات الوقود كلا على حده مع الاوكسجين .

صافي كمية الاوكسجينO_2 المطلوبة = الاوكسجين النظري المطلوب – الاوكسجين الموجود اصلا في الوقود.

ثالثا : - الهواء يتكون من 21 % من الاوكسجين حجما او 23% من الاوكسجين وزنا في حالة الحساب على أساس النسبة الوزنية، اذ من الممكن ان نحسب مقدار الهواء المطلوب لاحتراق الوقود من خلال معرفة مقدار الاوكسجين اللازم من خلال تفاعلات الاحتراق.

$$\text{وزن الهواء المطلوب} = O_2 \times \frac{100}{23}$$

$$\text{حجم الهواء المطلوب} = O_2 \times \frac{100}{21}$$

رابعا: - الوزن الجزئي للهواء بأخذ بحدود [28.92] ويتم حسابة من خلال

$$32 \times 0.23 + 28 \times 0.77 = 7.36 + 21.56 = 28.92$$

اوكسجين نتروجين

خامسا: - 22.4 Litres او$22400cm^3$ لاي غاز قي الظروف القياسية (OC° and 760 mmHg) هو يمتلك كتلة تساوي غرام جزئي. مثلا (Litres 22.4) من ثاني اوكسيد الكاربون CO_2 في الظروف القياسية هو يمتلك كتلة

مقدارها (449) وذلك بسبب ان الوزن الجزيئي لثاني اوكسيد الكاربون يساوي 44 .

سادسا: - حجم (V_1) الاوكسجين او الهواء Air/O_2 المطلوب في درجة الحرارة (T_1) وضغط (P_1) ممكن ان يحول الى حجم اخر (V_2) في درجة حرارة اخرى (T_2) وضغط (P_2) من خلال استخدام العلاقة التالية:

$$\frac{P_1V_1}{T_1}=\frac{P_2V_2}{T_2} \quad \text{.....(19-3)}$$

هذه العلاقة جاءت من خلال معرفة ان جميع الغازات تتبع قانون الغازات المثالي

$$PV = nRT$$

حيث ان P = الضغط المطلق

V = الحجم

n = عدد مولات الغاز

R = الثابت العام للغازات

T = درجة الحرارة المطلقة

امثلة محلولة Solved Examples

مثال رقم (1)

احسب القيمة الحرارية الكلية والصافية لنموذج من الفحم الحجري يمتلك المكونات التالية : -80% C، H_2%، 3% O_2، 3.5% S، 2.1% N_2، ورماد 4.4%.

الحل

$$[GCV]= \frac{1}{100}\ [8080 + \%\ C + 34500\ (\%\ H - \frac{\%O}{8}) + 2240 \times \%\ S]$$

القيمية الحرارية الكلية

$$= \frac{1}{100}\ [8080 \times 80 + 34500\ (7 - \frac{3}{8}) + 2240 \times 3.5\ ]$$

$= 8080 \times 0.8 + 345(7 - 0.375) + 22.4 \times 3.5$

$= 6464 + 2285 - 6 + 78.4$

$= 8828$ KCal/kg

$= GCV - (0.09H \times 587)$ القيمة الحراية الصافية

$= 8828 - (0.09 \times 7 \times 587)$

$= 8458.2$ KCal/kg

مثال رقم (2)

جد حجم الهواء اللازم لحرق ($1m^3$) من الاستلين احتراقا كاملا وكذلك جد وزن الهواء الضروري لاحتراق (1kg) من الوقود.

الحل

$$\mathbf{2C_2H_2 + 5O_2 \longrightarrow 4CO_2 + 2H_2O} \quad \text{.....(20-3)}$$

2Vol. 5Vol. 4Vol. 2Vol.

∴ O_2 كمية الاوكسجين المطلوبة لكل $1m^3$ من C_2H_2

$C_2H_2 = 2.5\ m^3$

لذلك ان كمية الهواء المطلوبة لكل $1m^3$ من C_2H_2

$$C_2H_2 = 2.5 \times \frac{100}{21} = 119\ m^3$$

بالاضافة الى هذا 2 mols من C_2H_2 تحتاج الى 5 mols من O_2

∴ (2×26) kg من الوقود C_2H_2 تحتاج الى (5×32) kg من O_2

وبما ان الوزن الجزيئي للاستلين = 26

والوزن الجزيئي للاوكسجين = 32

∴ كمية O_2 المجهز لكل kg من الوقود تحسب كالاتي : -

$$C_2H_2 = \frac{160}{52} kg$$

كمية الهواء المجهزة لكل kg من الوقود

$$C2H2 = \frac{160}{52} \times \frac{100}{23}$$

كمية هواء الاحتراق = 13.78 kg

مثال (3)

احسب كمية الهواء المطلوبة لاحتراق 100 Kg من الوقود احراقا كاملا، ان الوقود يتكون من 80% C ، 6% H_2، 5% O_2، 2% S ، والباقي N_2، على ان هذه النسب محسوبة على اساس نسب وزنية.

الحل

اذا اخذ 1 kg كاساس للحسابات من الوقود فانه يحتوي على 0.8 kg C، 0.06 kg H_2، 0.05 kg O_2 و 0.02 kg S .

∴ العناصر التي تتفاعل مع الاوكسجين هي كالاتي

$$\underset{12\ \ 32}{C + O_2} \longrightarrow \underset{44}{CO_2} \quad \text{.....(21-3)}$$

$$\underset{2\ \ 16}{H_2 + O} \longrightarrow \underset{18}{H_2O} \quad \text{.....(22-3)}$$

$$\underset{32\ \ 32}{S + O_2} \longrightarrow \underset{64}{SO_2} \quad \text{.....(23-3)}$$

لذلك 12 kg من C تحتاج الى 32 kg من O_2

$$\therefore 0.8 \text{ kg C} = \frac{32}{12} \times 0.8 = 2.133 \text{ kg}$$ من O_2

2 kg من H_2 تحتاج الى 16 kg من O_2

$$\therefore 0.06 \text{ kg } H_2 = \frac{16}{2} \times 0.06 = 0.48 \text{ kg}$$ من O_2

32 kg من S_2 تحتاج الى 32 kg من O_2

$$\therefore \ 0.02 \text{ kg S} = \frac{32}{32} \times 0.02 = 0.02 \text{ kg}$$ من O_2

بما ان N_2 لا يحترق فانه لا يستهلك أي اوكسجين

∴ كمية O_2 النظري المطلوب لكل 1 kg من الوقود

$$O_2 = 2.133 + 0.48 + 0.02 = 2.633 \text{ kg}$$

اما صافي الاوكسجين النظري المطلوب لاحتراق 1 kg من الوقود فانه كمية الاوكسجين النظري المطلوب تساوي كمية الاوكسجين التي حصلنا عليها من حسابه في معادلات الاحتراق منقوص منه الكمية من الاوكسجين الموجودة اصلاً مع الوقود.

$$\therefore O_2 = 2.633 - 0.05 = 2.583 \text{ kg}$$

اما صافي O_2 الكلي المطلوب لاحتراق 100 kg من الوقود

$$\text{Net } O_2 = 2.583 \times 100 = 258.3 \text{ kg}$$

لكن اذا علمنا 23 kg من O_2 تجهزبواسطة 100 kg من الهواء

∴ كمية الهواء الكلية المجهزة لاحتراق 100 kg من الوقود

$$\therefore \text{Air} = \frac{100}{23} \times 258.3 = 1123 \text{ kg}$$

مثال رقم (4)

تم تحليل حجم معين من غاز المنتج (Producer Gas) ووجد انها تتكون من الاتي من H_2 18.3 %، CH_4 3.4 %، CO 25.4%، CO_2 5.1%، N_2 47.8 %، احسب حجم الهواء المستعمل لكل $1m^3$ من الغاز.

الحل

لناخذ 100 mols كاساس للحسابات من الغاز

$$H_2 + \frac{1}{2}O_2 \longrightarrow H_2O \quad \text{.....(24-3)}$$

18.3 9.15 18.3

$$CH_4 + 2O_2 \longrightarrow CO_2 + 2H_2O \quad \text{.....(25-3)}$$

3.4 6.8 3.4 6.8

$$CO + \frac{1}{2}O_2 \longrightarrow CO_2 \quad \text{.....(26-3)}$$

25.4 12.7 25.4

∴ كمية الاوكسيجين المطلوبة فانها تساوي حاصل جمع عدد مولات الاوكسجين في المعادلات الثلاث

$$\therefore O_2 = 9.15 + 6.8 + 12.7 = 28.65 \text{ mols}$$

∴ عدد مولات الهواء المطلوبة لاحتراق 100 mols من الوقود

$$\text{Air} = 28.65 \times \frac{100}{23}$$

$$= 136.43 \text{ mols}$$

∴ كمية الهواء المطلوبة لكل $1m^3$ من الوقود (الغاز)

$$\text{Air}(m^3) = \frac{136.43}{100} = 3$$

$$= 1.3643 \text{ m}^3$$

مثال رقم (5)

فحم حجري وجد انه يحتوي 81 % C ، 4% H_2 ، 2% O_2 ، 2% S ، 1% N_2 ، اما النسبة الوزنية المتبقية فانها تمثل رماداً (Ash) جد قيمة الهواء اللازم لاحتراق 1 kg من الفحم احتراقا كاملا اذا كانت كمية الهواء الزائد (Excess Air) تمثل 40% .

الحل

لتاخذ 1 kg من الفحم كاساس للحسابات، كذلك فان : -

0.81 kg C ، 0.04 kg H_2 ، 0.02 kg O_2 ، 0.01 kg N_2

$$\mathbf{C + O_2 \longrightarrow CO_2} \quad \text{.....(27-3)}$$
12 32 44

$$\mathbf{H_2 + \tfrac{1}{2}O_2 \longrightarrow H_2O} \quad \text{.....(28-3)}$$
2 16 18

12 kg من C تحتاج 32 kg من O_2

$$0.81 \text{ kg C} = \frac{32}{12} \times 0.81 = 2.155 \quad \text{من } O_2 \quad \therefore$$

2 kg من H_2 تحتاج الى 16 kg من O_2

$$0.04 \text{ kg } H_2 = \frac{16}{2} \times 0.04 = 0.32 \text{ kg من } O_2 \quad \therefore$$

اذا علمنا ان N_2 لاتحترق لذلك لا يستهلك أي قيمة من O_2

∴ كمية الاوكسجين النظري المطلوب لكل 1 kg من الوقود

تساوي كمية الاوكسجين النظري المطلوب – كمية الاوكسجين الموجود اصلا في الوقود

$$O_2 \text{ kg} = 2.472 - 0.02 = 0.435 \text{ kg of } O_2$$

اذا علمنا ان 23 kg من O_2 موجودة في 100 kg من الهواء

$$\therefore 2.455 \text{ kg of } O_2 = \frac{100}{23} \times 2.455 = 10.67 \text{ kg}$$

كذلك من خلال معطيات السؤال ان 40% من الهواء الزائد يضاف الى الهواء النظري للحصول على احتراق كامل لكل 1 kg من الفحم

$$\therefore \text{الهواء الكلي المطلوب} = \frac{10.67}{100} \times 140$$
$$= 14.44 \text{ kg}$$

مثال رقم (6)

مكينة احتراق داخلي تحرق وقودا غازيا يحتوي على المكونات التالية: - 9% CO_2، 42% CO، 33% H_2، 16% N_2 الاحتراق يحدث بوجود كمية الهواء النظري فقط. احسب حجم الهواء المستعمل في الاحتراق لكل $1m^3$ من الوقود الغازي، كذلك جد نسب غازات الاحتراق الجافة الخارجة من العادم.

الحل

لناخذ 100 mols من الوقود الغازي كاساس (Base) للحسابات بما ان

$$\mathbf{CO + \tfrac{1}{2}O_2 \longrightarrow CO_2} \quad \text{.....(29-3)}$$
(mols) 42 21 44

$$\mathbf{H_2 + \tfrac{1}{2}O_2 \longrightarrow H_2O} \quad \text{.....(30-3)}$$
33 16.5 33

واذا علمنا ان CO_2، N_2 لا يحترقان وهما يدخلان ويخرجان بنفس النسبة من المولات لذلك فان كمية الاوكسجين النظري المطلوبة للتفاعل

$$O_2 \text{ mols} = 21 + 16.5$$
$$= 37.5 \text{ mols}$$

عدد مولات الهواء المطلوبة لكل 100 mols من الوقود

$$\therefore \text{عدد مولات الهواء} = 37.5 \times \frac{100}{21}$$
$$= 178.5 \text{ mols}$$

$\therefore$ $1m^3$ من الهواء المطلوب لكل 1 mol

او $1m^3$ من الوقود الغازي

$$\text{Air } (m^3) = \frac{178.5}{100} = 1.785 \text{ } m^3$$

اما حساب مكونات غازات العام الجافة

فيتم من خلال عدد المولات كل من N_2 ، CO_2

بالنسبة للنتروجين فان عدد المولات الداخلة تساوي الخارجة مع الوقود مضافا عدد مولات النتروجين مع هواء الاحتراق الجوي، النتروجين يمتلك 16 mol من اصل مكونات الوقود

يضاف $37.5 \times \frac{79}{21}$ عدد مولات النتروجين في الهواء

$$\therefore N_2 \text{ mols} = 16 + [73.5 \times \frac{79}{21}]$$
$$= 157 \text{ mols}$$

اما بالنسبة لثاني اوكسيد الكاربون CO_2 فان عدد مولاته في الغاز العادم = عدد مولاته في الوقود +عدد مولاته المتكونة نتيجة لتفاعل اول اوكسسيد الكاربون مع O_2

$$CO_2 \text{ mol} = 9 + 42$$
$$= 51 \text{ mols}$$

$\therefore$ المولات الكلية المكونة لغاز العادم

$$\text{Total mols} = 157 + 51 = 208 \text{ mols}$$

= نسب مكونات غاز العادم

$$= 24.52\ \%Co_2 \longrightarrow \frac{51\times100}{208}$$

$$= 75.48\ \%N_2 \longrightarrow \frac{157\times100}{208}$$

المثال رقم (7)

احسب حجم الهواء المطلوب لاحتراق 1 m^3 من وقود غازي احتراقا كاملا، اذا كانت مكونات ذلك الوقود حجما 23% CO، 12% H_2، 3% CH_4، 5% CO_2، 55% N_2، 2% O_2

الحل

لتاخذ $1m^3$ من الوقود الغازي كاساس للحسابات

∴ $1m^3$ يحتوي 0.25 m^3 CO، 0.12 m^3 H_2، 0.03 m^3 CH_4، 0.05 CO_2، 0.55 N_2، 0.02 m^3 O_2

المركبات والعناصر التي تحرق مع الاوكسجين كالاتي : -

$$\mathbf{CO + \tfrac{1}{2}O_2 \longrightarrow CO_2} \quad \text{.....(31-3)}$$

(Vol.) 1 0.5 1

$$\mathbf{H_2 + \tfrac{1}{2}O_2 \longrightarrow H_2O} \quad \text{.....(32-3)}$$

(Vol.) 1 0.5 1

$$\mathbf{CH_4 + 2O_2 \longrightarrow CO_2 + 2H_2O} \quad \text{.....(33-3)}$$

(Vol.) 1 2 1 2

1 حجم من CO يحتاج إلى 0.5 حجم من O_2

$$0.23\ (Vol.)\ CO = \frac{0.5}{1} \times 0.23 = 0.115\ m^3 \text{ من } O_2$$

1 حجم من H_2 يحتاج إلى 0.5 حجم من O_2

0.12 (Vol.) $H_2 = \quad 0.5/1 \quad \times 0.12 = 0.06\ m^3$ من O_2

1 حجم من CH_4 يحتاج الى 2 حجم من O_2

0.03 (Vol.) $CH_4 = \quad 2/1\ \frac{2}{1} \times 0.03 = 0.06\ m^3$ من O_2

لذلك حجم الهواء النظري الكلي المطلوب

O_2 Total $= 0.115 + 0.06 + 0.06$

$= 0.235\ m^3$ of O_2

أما صافي حجم الهواء الكلي المطلوب يمثل حجم الهواء النظري الكلي مطروحا منة ما موجود من أوكسجين في الوقود

O_2 (Vol.) Net $= 0.235 - 0.02$

$= 0.215\ m^3$

وعندما $21\ m^3$ من O_2 موجود في $100\ m^3$ من الهواء الجوي لذلك حجم الهواء الكلي اللازم الاحتراق الوقود الغازي احتراقا كاملا الحسب كالآتي: -

$$O_2 \text{ (Total)} = \frac{100}{21} \times 0.215 = 1.02\ m^3$$

مثال (8)

فرن حرق يعمل على زيت الوقود، وجد عند تحليل الغاز العادم (المدخنة) انة يتكون من CO_2 10.2%، O_2 8.3%، N_2 81.5% تم اتحليل باستخدام الاورسات (Orstat's Analysis) (تحليل جاف).

احسب 1 - مكونات الوقود الاصلي

2 - نسبة الهواء الزائد (٪)

3 - حجم الهواء المجهز لكل 1kg من زيت الوقود

الحل

ليكن اساس الحسابات 100 mols Basis من غاز المدخنة الجاف

المكونات	Mols %	Mols of C	Mols of O_2	Mols of N_2
CO_2	10.2	10.2	10.2	-
O_2	8.3	-	8.3	-
N_2	81.5	-	-	81.5
Total	-	10.2	18.5	81.5

بما ان الاساس 100 mols اذا تم حساب المولات الداخلة في التفاعل والناتج منه وكذلك عدد مولات N_2 الداخلة وهي تساوي المولات الخارجة كما في الجدول اعلاه.

A - 100 mols من غاز العادم الجاف يحتوي على 18.5 mols منO_2 و 81.5 mols من النتروجين لهذا ان كمية الهواء المجهز

$$\text{Air (Supplied)} = 81.5 \times \frac{100}{79} = 103.17 \text{ mols}$$

∴ من الممكن حساب عدد مولات الاوكسجين الداخلة مع الهواء

$$O_2 \text{ (With Air)} = 103.17 \times \frac{21}{100} = 21.69 \text{ mols}$$

بما ان عدد مولات الاوكسجين التي تساوي 18.5 mols وهي حاصل جمع عدد المولات الاوكسجين النظري من معادلة احتراق الكاربون مع الاوكسجين وكمية الاوكسجين الحر الخارج من غازات الاحتراق، لكن الاوكسجين مع الهواء يساوي 21.69 mosls ان حاصل طرح عدد مولات الاوكسجين الداخل مع الهواء من عدد مولات الاوكسجين (من معادلة CO_2 والاوكسجين الخارج مع غاز الاحتراق).

$\therefore$ O_2 (mols) in $H_2O = 21.69 - 18.5$

$= 3.19$ mols

$$H_2 + \tfrac{1}{2}O_2 \longrightarrow H_2O \quad \text{.....(35-3)}$$
$$6.38 \quad 3.19 \quad 6.36$$

$\therefore$ عدد مولات بخار الماء المتكون يساوي (6.38 mols)

وكذلك عدد مولات الهيدروجين في الوقود تساوي (6.38 mols)

كذلك عدد مولات الكاربون تساوي (10.2 mols)

$\therefore$ زيت الوقود يحتوي على

$10.2 \times 12 = 122.4$ kg من الكاربون

$6.38 \times 2 = 12.7$ kg من الهيدروجين

وهذا يعني ان وزن الوقود $122.4 + 12.76 = 135.16$ kg

لذلك ان الوقود يتكون

$$100 = 90.5\% \times C = \frac{122.4}{135.16}$$

$$100 = 9.5\% \times H_2 = \frac{12.76}{135.16}$$

B- كمية الاوكسجين المجهزة تساوي 21.69 mols

$C = 10.2$ mols كمية الاوكسجين المطلوبة مع الكاربون

$H_2 = 3.19$ mols كمية الاوكسجين المطلوبة مع الهيدروجين

O_2 Totel $10.2 + 3.19 = 13.39$ mols

هذه المولات تمثل الاوكسجين النظري في معدلات تفاعل الاحتراق لذلك كمية الهواء الزائد تمثل كمية الاوكسجين الداخلة مع الهواء مطروحاً منها كمية الاوكسجين النظري

O_2 (Excess) $= 21.96 - 13.39 = 8.3$ mols

∴ نسبة الهواء الزائد

$$\% O_2 \text{ (Excess)} = \frac{8.3}{13.39} \times 100 = 62.0\%$$

C- زيت الوقود الكلي المحترق تساوي 135.16 kg

لذلك كمية الهواء الكلي

$$2169 \text{ x } \frac{100}{21} = 103.29 \text{ mols}$$

$$= 10.329 \times 22.4 = 2313.7 \text{ m}^3$$

في الظروف القياسية (22.4 litres at NTP)

وحسب قانون افوكادرو Avogadro's

حجم الهواء المستعمل لكل kg من الوقود

$$\text{Air (m}^3) = \frac{2313.7}{135.16} = 17.12 \text{ m}^3$$

مثال (9)

وقود غازي يتكون من 22% CO، 14% H_2، 2% CH_4، 5% CO_2 N_2 و55% O_2 2% (حجما).

1 - جد الهواء اللازم لاحتراق 1 m^3 من الوقود الغازي احتراقاً كاملا.

2 - اذا 40 % من الهواء الزائد تم استخدامه في عملية الاحتراق، احسب حجم غازات الاحتراق الناتجة.

الحل

1 - ليكن 1m^3 من الوقود اساس الحساب، لذلك 0.22 m^3 O_2، H_2 0.14m^3، 0.02 m^3 CH_4، 0.05 m^3 CO_2 و0.55 m^3 N_2.

$$CO + \tfrac{1}{2}O_2 \longrightarrow CO_2 \quad \text{.....(36-3)}$$

(Vol.) 1 0.5 1

$$H_2 + \tfrac{1}{2}O_2 \longrightarrow H_2O \quad \text{.....(37-3)}$$

(Vol.) 1 0.5 1

$$CH_4 + 2O_2 \longrightarrow CO_2 + 2H_2O \quad \text{.....(38-3)}$$

(Vol.) 1 2 1 2

حجم 1 من CO يحتاج الى 0.5 حجما من O_2

$$0.22 \text{ of } CO = \frac{0.05}{1} \times 0.22 = 0.11 \text{ m}^3 \text{ من } O_2$$

حجم 1 من H_2 يحتاج 0.5 حجما من O_2

$$0.14 \text{ of } H_2 = \frac{0.5}{1} \times 0.14 = 0.07 \text{ m}^3 \text{ من } O_2$$

1 حجم من CH_4 يحتاج الى 2 حجما من O_2

$$0.02 \text{ of } CH_4 = \frac{2}{1} \times 0.02 = 0.04 \text{ m}^3 \text{ من } O_2$$

اذن الحجم الكلي النظري للاوكسجين

$$O_2 \text{ (Theo.)} = 0.11 + 0.07 + 0.04$$
$$= 0.22 \text{ m}^3 \text{ of } O_2$$

اما صافي الحجم O_2 المطلوب لاحتراق $1m^3$ من الوقود احتراقا كاملا فانه يساوي حجم O_2 النظري مطروحا منه الاوكسجين الموجود اصلا في الوقود

$$O_2 \text{ (Net)} = 0.22 - 0.02$$
$$= 0.02 \text{ m}^3 \text{ من } O_2$$

بما ان 21 m^3 في O_2 موجود في 100 m^3 من الهواء اذن كمية الاوكسجين المجهزة : -

$$0.2 \text{ m}^3 \text{ of } O_2 = \frac{100}{21} \times 0.2$$
$$= 0.95 \text{ m}^3$$

لكن 40 % حجما من الهواء الزائد يدخل لحصول احتراق $1\ m^3$ من الوقود احتراق كاما

$$\text{Air (Vol.)} = \frac{100}{21} \times 140 = 1.33\ m^3$$

2 - لحساب حجم غازات الاحتراق الناتجة

حجم CO_2 الناتج = حجم CO_2 في الوقود + حجم CH_4 مضروب × عدد المولات + حجم CO مضروب في عدد المولات

$$CO_2\ (Vol.) = 0.05 + 0.02 + 0.22 \times 1$$
$$= 0.29\ m^3$$

حجم N_2 الناتج = حجم النيتروجين الموجود اصلا في الوقود + النيتروجين الموجود في الهواء الجوي

$$N_2\ (Vol.) = 0.55 + 1.33 \times \frac{79}{100}$$
$$= 1.60\ m^3$$

اذن يمكن حساب حجم O_2 الخارج من غازات الاحتراق

$$O_2\ (Vol.) = (1.33 - 0.95) \times \frac{100}{21} \therefore$$
$$= 0.08\ m^3$$

لذلك مجموعة حجوم غازات الاحتراق الجافة الناتجة يساوي مجموع $O_2 + N_2 + CO_2$

مجموع الغازات الجافه (Total) $= 0.29 + 1.6 + 0.08$
$$= 1.97\ m^3$$

يمكن معرفة نسب كل مكون من مكونات غازات الاحتراق الناتجة

$$\%\ CO_2 = \frac{0.29}{1.97} \times 100 = 14.72\ \%$$

$$\%\ N_2 = \frac{1.6}{1.97} \times 100 = 81.22\ \%$$

$$\%\ O_2 = \frac{0.08}{1.97} \times 100 = 4.06\ \%$$

مثال (10)

وقود غازي يتكون من المكونات التالية (حجما)، 6% CO، 22% H_2، 30% CH_4، 11%C_2H_6، 4.5% C_2H_4، 2.5% C_4H_8، 8% CO_2، 12% N_2 و2% O_2. احسب حجم الهواء النظري المطلوب عند درجة حرارة 25 C° والضغط 760 mm Hg لاحتراق 1 m^3 من الوقود احتراقاً كاملا.

الحل

ناخذ 1 m^3 من الوقود الغازي كاساس للحسابات لهذا فانه يحتوي على 0.06 m^3 CO، 0.22 m^3 H_2، 0.3 m^3 CH_4، 0.11 m^3 C6H_6، 0.045 m^3 C_2H_4، 0.025 m^3 C_4H_8، 0.08 m^3 CO_2، 0.12 m^3 N_2 و 0.02 m^3 O_2.

$$\mathbf{CO + \tfrac{1}{2}O_2 \longrightarrow CO_2 \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (39\text{-}3)}$$
(Vol.) 1 0.5 1

$$\mathbf{H_2 + \tfrac{1}{2}O_2 \longrightarrow H_2O \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (40\text{-}3)}$$
(Vol.) 1 0.5 1

$$\mathbf{CH_4 + 2O_2 \longrightarrow CO_2 + 2H_2O \ldots\ldots\ldots\ldots (41\text{-}3)}$$
(Vol.)1 2 1 2

$$\mathbf{CH_4 + 2O_2 \longrightarrow CO_2 + 2H_2O \ldots\ldots\ldots\ldots (42\text{-}3)}$$
(Vol.)1 2 1 2

$$\mathbf{C_2H_6 + O_2 \longrightarrow 2CO_2 + 3H_2O \ldots\ldots\ldots\ldots (43\text{-}3)}$$
(Vol.)1 3.5 2 3

$$\mathbf{C_2H_4 + 3O_2 \longrightarrow 2CO_2 + 2H_2O \ldots\ldots\ldots\ldots (44\text{-}3)}$$
(Vol.)1 3 2

$$\mathbf{C_2H_8 + 6O_2 \longrightarrow 4CO_2 + 4H_2O \ldots\ldots\ldots\ldots (45\text{-}3)}$$
(Vol.) 1 6 4

حجم 1 من CO يحتاج الى 0.5 حجما من O_2

$$CO = \frac{0.05}{1} \times 0.06 = 0.03 \text{ } m^3 \text{ من } O_2$$

حجم 1 من H_2 يحتاج 0.5 حجما من O_2

$$H_2 = \frac{0.5}{1} \times 0.22 = 0.11 \text{ m}^3 \text{ من } O_2$$

1 حجم من CH_4 يحتاج الى 2 حجما من O_2

$$CH_4 = \frac{2}{1} \times 0.03 = 0.06 \text{ m}^3 \text{ من } O_2$$

1 حجم من C_2H_6 يحتاج الى 3.5 حجما من O_2

$$C_2H_6 = \frac{3.5}{1} \times 0.11 = 0.385 \text{ m}^3 \text{ من } O_2$$

1 حجم من C_2H_4 يحتاج الى 3 حجما من O_2

$$C_2H_4 = \frac{3}{1} \times 0.045 = 0.135 \text{ m}^3 \text{ من } O_2$$

1 حجم من C_4H_8 يحتاج الى 6 حجما من O_2

$$C_4H_8 = \frac{3}{1} \times 0.025 = 0.15 \text{ m}^3 \text{ من } O_2$$

مجموع الهواء الكلي $O_2 = 0.03 + 0.11 + 0.6 + 0.385 + 0.135 + 0.15$ النظري

$= 1.41 \text{ m}^3$ من O_2

صافي الحجم من O_2 المطلوب لاحراق 1 m_3 من الوقود احتراقا كاملا يساوي الاوكسجين النظري مطروحا منه كمية الاوكسجين الموجودة اصلا في الوقود

O_2 (Net) = $1.41 - 0.02 = 1.39 \text{ m}^3$

ان حجم O_2 القياسي (NTP) (760 mm Hg U 273K) تطابق حجم O_2 في درجة حرارة $25\ C^\circ$ وضغط جوي 750 mm Hg لهذا يمكن استخدام العلاقة ادناه لحساب حجم الاوكسجين

$$\frac{P_1V_1}{T_1}=\frac{P_2V_2}{T_2}$$

$P_1 = 760$ mm $\qquad P_2 = 750$ mm Hg

$V_1 = 1.39\ m^3 \qquad V_2 = ?$

$T_1 = 273 \qquad T_2 = 273+25 = 298$ K

$$\therefore \quad \frac{760\times1.39}{273}=\frac{750\times V_2}{298} \qquad V_2=\frac{760\times1.39\times298}{750\times273}$$

$$= 1.54\ m^3$$

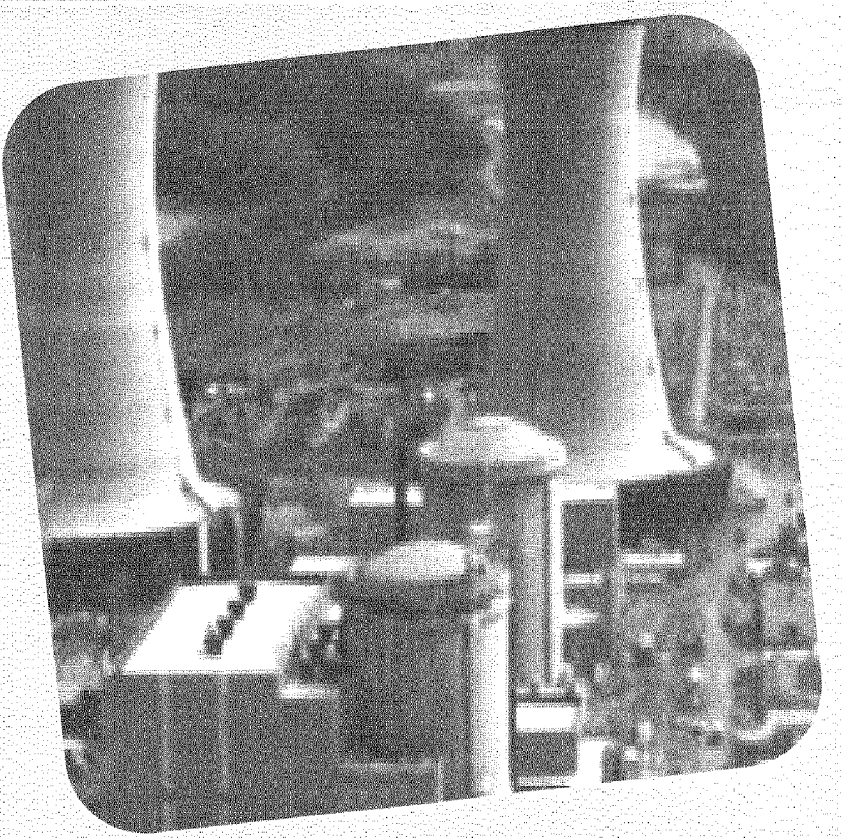
$21\ m^3$ من O_2 موجودة في $100\ m^3$ من الهواء الجوي

$$\therefore \quad \text{Air (Requird)} = \frac{100}{21}\times 1.54 = 7.33\ m^3 \text{ of Air}$$

وهذا يمثل حجم الهواء النظري المطلوب لاحتراق $1\ m^3$ من الوقود احتراقا كاملا عند درجة حرارة $25\ ^\circ C$ وضغط 750 mm Hg.

الفصل الرابع

المراجل البخارية (الوصف، الأنواع، الملحقات)



4

الفصل الرابع

المراجل البخارية (الوصف، الأنواع، الملحقات)

1.5 المرجل Boiler

تعريف المرجل: هو عبارة عن وعاء يعمل على تحويل الماء إلى بخار بشكل مستمر باستخدام الحرارة، البخار الناتج ممكن أن يستخدم في محطات تحويل الطاقة الكهربائية، تسخين الماء، في العمليات الصناعية المختلفة.... الخ

متطلبات المرجل الكفوء Requirements of an Efficient Boiler

أهم متطلبات فعالية المرجل الكفوء ممكن أن نجملها بالآتي:

a-توليد أقصى كمية من البخار في الضغط ودرجة الحرارة المطلوبين مع اقل كمية من الوقود المستهلك.

b- خفة في وزن المرجل مع اقل مساحة ممكن ان يشغلها ذلك المرجل.

c- توثيق نظام امن مناسب.

d- كلف تنصيب ابتدائي وصيانة أقل.

e- سهولة استبدال وتصليح الأجزاء التالفة.

2.5 تصنيف المراجل Boilers Classification

المراجل تصنف حسب الاستعمال، الضغط، المحتوى الأنبوب، طريقة الحرق (Firing Mode)، ومصدر التسخين.

a- **التصنيف حسب قاعدة الضغط** Based Pressure Classification

تصنيف المرجل حسب الضغوط المستخدمة وحسب التالي: -

- المرجل ذات الضغط الواطئ (Low Pressure Boiler): -هذا يصنف هذا النوع من المراجل بأنها ذات ضغوط لا تتجاوز ضغوطها (150-160 Psi).

- مراجل القدرة (Power Boiler): -هي جميع المراجل العاملة بضغوط اعلى ومن المراجل ذات الضغوط الواطئة.

- المراجل المصغرة ((Mini Boiler جميع المراجل التي لا تتجاوز حجمها ($5ft^3$) كإجمالي وذات ضغط لا يتجاوز (100 Psi).

b-**التصنيف حسب قاعدة الاستعمال** Based Use Classification

من الممكن أن تكون هذه المراجل أما ثابتة أو متحركة؛ وتستخدم في الاتي: -

- تسخين المنازل.
- البخار المستخدم في الفعاليات الصناعية.
- محطات توليد الطاقة الكهربائية.
- استعمالات الحرارة المهدورة.

c- **التصنيف حسب الحجم** Based Size Classification

- المراجل المستخدمة في الوحدات الصناعية (Industrial Units) تجاوز مساحتها السطحية $294\ Ft^2$.

- المراجل المستخدمة في الوحدات السكنية ((Residential Units ، كذلك ممكن أن تصنف المراجل على اساس مصدر الحرارة فاستخدام الطاقة الكهربائية ، الطاقة النووية ، الوقود الاحفوري.....الخ .

3.5 تصميم المراجل Boilers Design

بشكل المراجل البخارية تصمم بنوعين: -

1 - مراجل ذات انابيب النار .Fire Tube Boilers

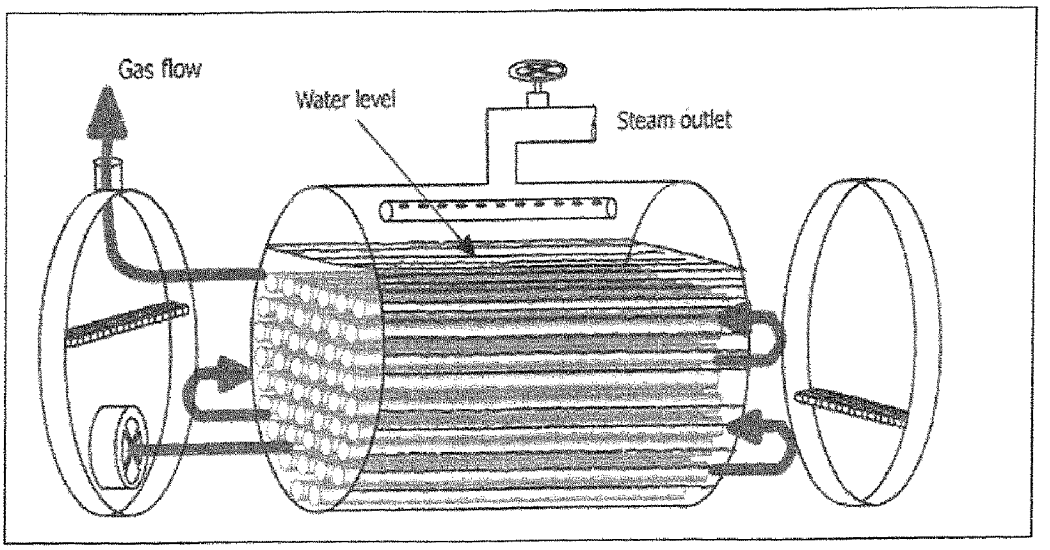
2 - المراجل ذات انابيب الماء .Water Tube Boilers

3.1.5 مراجل ذات أنابيب النار Fire Tube Boilers

هي المراجل التي تمر بها نواتج الاحتراق (الغازات الساخنة) من خلال انابيب والماء يحيط بالأنابيب من الخارج وهذه الأنابيب يحيط بها غلاف خارجي (Shell) ويشمل ضغط الماء الساخن والبخار المتولد وقد يتضمن الغلاف معدات الاحتراق.

في الغالب تكون وحدات ذات انابيب النار محدودة بضغط لا يتجاوز ضغطها (1.7 MPa) وهو ضغط البخار الذي ينتجه و لا يمكن تجاوز هذا الضغط لان اي زيادة محتملة في الضغط يتطلب زيادة في سمك الغلاف الخارجي، وعند بناء المراجل ذات انابيب النار الأنابيب مع الغلاف الخارجي وتكون مستقيمة ومتوازية فيما بينها لمحور الغلاف كما مبين في الشكل رقم (4 -1) ، وهذه المراجل قد تكون عمودية أو افقية مع المحور، معدات الاحتراق اما أن تكون ضمن الغلاف أو خارجه والغلاف قد يكون اسطوانيا كليا أو جزئيا ،

وهذا النوع من المراجل تكون فيها نسبة الماء اعلى من البخار الناتج وبشكل ملحوظ.



الشكل رقم (4 -1) يمثل مرجل ذات أنابيب النار بأربع ممرات

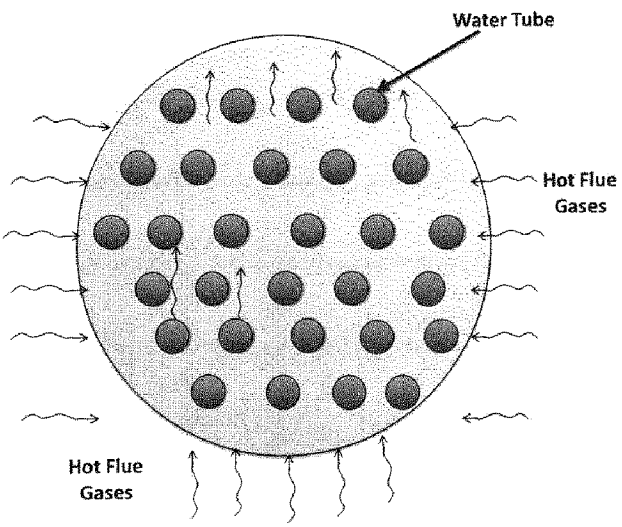
تظهر فوائد هذا النوع من المراجل عندما تكون سعة البخار المطلوب ليست كبيرة، فمن الفوائد انها تشغل حيزا محددا وتعطي مرونة عند التشغيل وان كلفة إنشاءها ليست كبيرة بالمقارنة مع الأنواع الأخرى، على الرغم من أن هذه المراجل لها محددات من حيث الضغط ونوع البخار الناتج وتظهر استخدامات هذه في الوحدات الصناعية الصغيرة وفي أغراض التدفئة.

3.2.5 المراجل ذات انابيب الماء Water Tube Boilers.

في هذا النوع من المراجل يجري الماء خلال الأنابيب وتحيط الغازات الساخنة الناتجة من احتراق الوقود بالأنابيب من الخارج وذلك ضمن غلاف المرجل، أي أن المراجل ذات أنابيب الماء هي من حيث المبدأ عكس المراجل ذات انابيب النار،

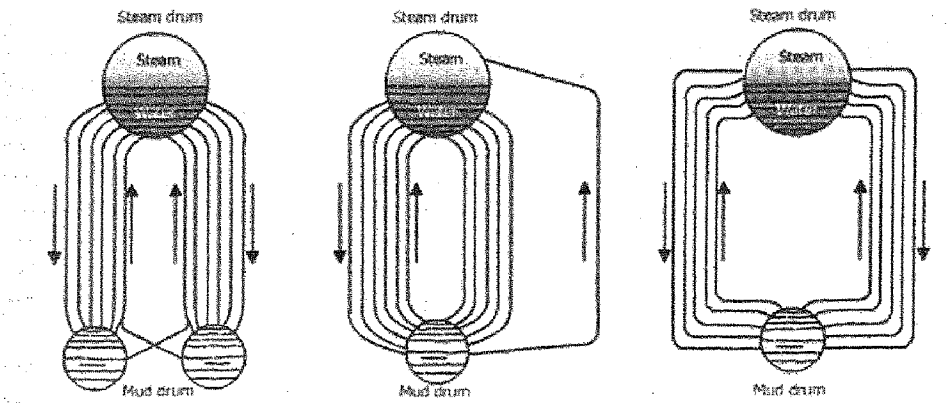
وفيها تتلامس الغازات الساخنة مع السطح الخارجي للأنابيب كما يتلامس الماء والبخار مع السطح الداخلي للأنابيب الشكل رقم (4 -2).

أن زيادة الطلب وبكميات كبيرة وعند ضغوط عالية يتطلب زيادة قطر انابيب الماء وسمكها ولكن هذه الزيادة غير مرغوب فيها وذلك لتوليد اجهادات حرارية بفعل الضغط وهذه الاجهادات مع تكون ترسبات ناشئة من عسرة الماء التي تؤدي بمجملها إلى انفجار المرجل لذلك فان الحاجة الماسة لمراجل ذات انابيب الماء اصبحت ضرورية في التصاميم ذات الضغوط العالية.



الشكل رقم (4 -2) يظهر مرجل ذات أنابيب الماء

يمكن تصنيف المرجل ذات انابيب الماء بعدة طرائق وذلك تبعا الي شكل الأنابيب كأن تكون مستقيمة أو معوجة (Straight or Bent) أو حسب مواقع الخزن (Drum) طولي أو متقاطع أو على اساس طريقة تدوير الماء، طبيعي أو قسري أو على اساس عدد الخزانات والشكل (4 -3) يوضح هذا النوع من المراجل.



(a) A-type, with large upper drum for effective water-steam separation and lower drums (headers) for circulation

(b) D-type, with steaming tubes discharging near water line, providing more effective feed water and blowdown piping locations

(c) O-type, similar to A-type in circulation pattern with risers entering center of steam drum

الشكل رقم (3) شكل تخطيطي يوضح ارتباط الأنابيب بالمخازن من نوع (O,D,A)

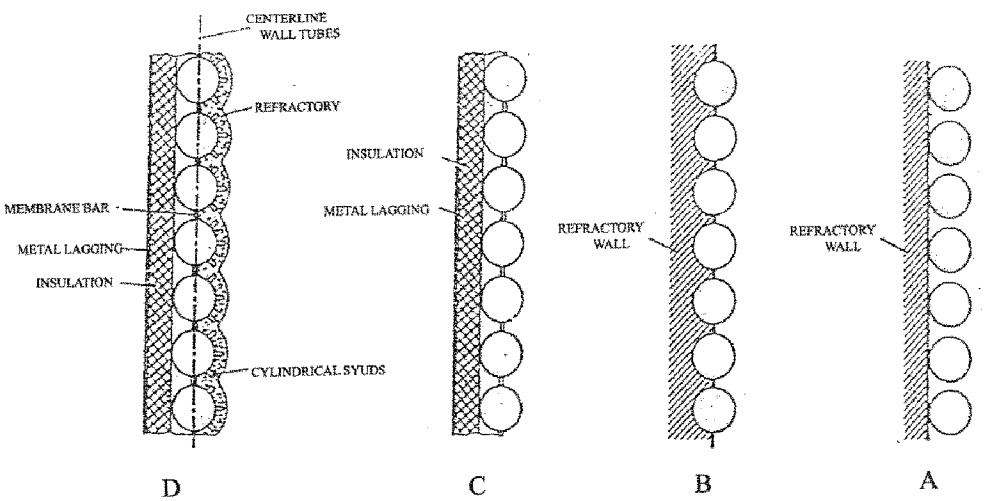
وعموما فان المرجل يحتوي على خزان للبخار والماء علوي وخزان سفلي للترسبات وطريقة وضع الخزانات قد تكون طولية أو عرضية، حيث في حالة استخدام الخزانات الطولية يكون عدد الأنابيب محدوداً لذلك تتجه الشركات المصنعة إلى استخدام الخزانات العرضية في المراجل بحيث تكون درجة حرارة الخزان في حالة المرجل ذي الخزان العرضي أكثر انتظاما مما في المرجل ذي الخزان الطولي.

وبسبب التطور الذي شهدته الصناعات الكيميائية وظهور المحاليل الكيميائية التي تستخدم لتنظيف الأنابيب من الداخل ومهما كان تعقيد الأنابيب أصبح بالإمكان استخدام الأنابيب المعوجة (Bent Tube) في المراجل ذات أنابيب الماء بإعداد أكثر من الأنابيب المستقيمة في المراجل، حيث أن المراجل التي تستخدم الأنابيب المعوجة تكون المساحة المعرضة للحرارة كبيرة وتوجد اختلافات في درجات الحرارة ضمن المساحة من الأنابيب، مكنت هذه

الاختلافات في درجات الحرارة المصممين من تركيب المرجل حيث تم تقسيم المرجل الي جدران الماء والمسخنات وسطوح التبخير بالإضافة إلى المحمصات، وإمكانية وضع الكابحات داخل المرجل بمرونة وذلك لتوجيه غازات الاحتراق داخل المرجل .

3.1.2.5 جدران الماء في المرجل Boiler Water walks

أن انابيب الماء التي تحتوي على الماء البارد تقوم بامتصاص اكبر حرارة ممكنة في البداية وذلك في جدران الماء للمرجل. وقد اختلف تصميم انابيب جدران الماء عبر السنين ويبين الشكل (4 -4) عدد من انواع جدران الماء.



الشكل (4-4) يبين انواع جدران الماء

A. الأنابيب المكشوفة، B. الأنابيب المماسة، C. الأنابيب المغمورة في مادة مقاومة للصهر، D. انابيب مدعومة وتم تطويرها إلى انابيب ذات تصميم الغشاء الجامع.

أن جدران الماء ذات تصميم الغشاء الجامع هو الشائع في الوقت الحاضر ويتضمن هذا النوع انابيب مرتبة بحيث أن المسافة بين مركز انبوب واخر بجانبه

وهو اكبر قليلا من اقطارها ومن ثم يتم ربطها سوية بواسطة قطع رابطة أو غشاء يلحم الأنابيب وذلك على خط يمر بمركزها.

أن تصميم الغشاء الجامع تعمل بصورة جيدة على زيادة الانتقال الحرارية بالإضافة إلى انها توفر الدعم الكافي للأنابيب للبقاء بصورة صلده وجيده التحمل للضغوط العالية التي تتولد في الفرن.

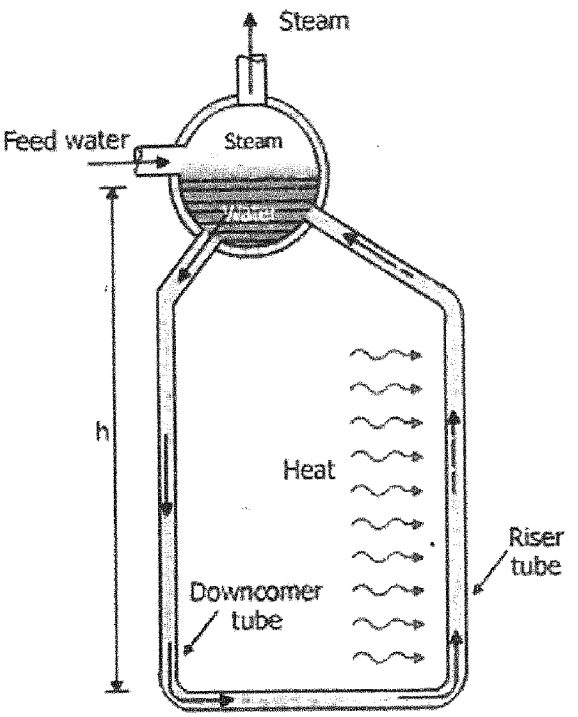
وتنتقل الحرارة من غازات الاحتراق إلى الماء الموجود في أنابيب جدران الماء بواسطة كل من الإشعاع والحمل (Radiation and Convection) ويطلق مصطلح المرجل الإشعاعي (Radiant Boiler) على المرجل الذي يستلم معظم حرارته بواسطة الإشعاع.

تمتلك غازات الاحتراق صفات تعتمد على نوع الوقود المستخدمة وعلى مراحل الاحتراق وعلى نسبة الهواء – الوقود.

3.2.2.5 تدوير الماء Water Circulation

يدور الماء من خزان البخار (Steam Drum) بحيث يمر بالأنابيب النازلة (Down Comers) إلى الأنابيب الرئيسية السفلية (Bottom Header) ومن ثم يمر بالخزان السفلي بعد ذلك بالأنابيب الصاعدة (Risers) حيث يبدا الماء بالغليان جزئيا ومن ثم يعود إلى خزان البخار. يتم تجنب الغليان الكلي (100%) في الأنابيب لان ذلك يؤدي إلى حرق أو فشل الأنابيب نتيجة حدوث (DNB) (اختفاء نويات الغليان) (Departure from Nucleate Boiling) ويكون الماء المشبع في الأنابيب النازلة اكبر من معدل الكثافة للطورين (خليط الماء والبخار) في

الأنابيب الصاعدة، الشكل (4-5) يمثل شكلاً توضيحياً للأنابيب الصاعدة والنازلة في المرجل في حالة التدوير الطبيعي للماء في المرجل.



الشكل (4-5) يوضح الأنابيب الصاعدة في المرجل والنازلة في حالة التدوير الطبيعي للمرجل

أن تدوير الماء على نوعين: -

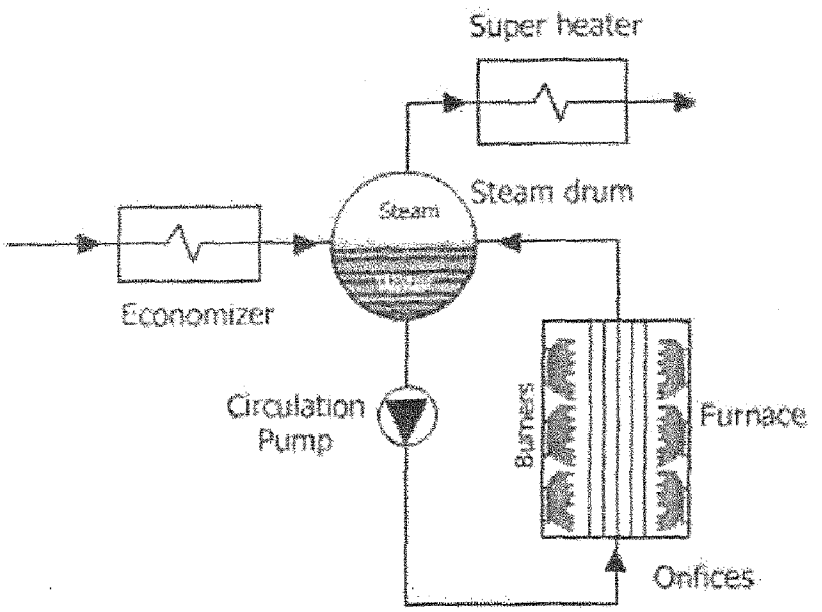
a- تدوير طبيعي (Natural Circulation).

b- تدوير قسري ((Forced Circulation.

يعتمد التدوير الطبيعي على قوة التدوير الطبيعي كقوة دافعة لتدوير الماء لذلك فإنها تدعى بالمراجل ذات التدوير الطبيعي. واذا ما تم زيادة قوة التدوير بواسطة ضخ (Pumping) عندئذ تسمى المراجل ذات التدوير القسري (Forced

(Boiler Circulation، الشكل (4 -6) يمثل مخططاً توضيحها لدوران الماء في المرجل.

ويتم تصميم المراجل في المحطات الكبيرة الحديثة على اساس نظام التدوير الطبيعي.



الشكل (4 -6) يوضح مخطط دوران الماء في المراجل

القوة الدافعة للتدوير الطبيعي وقوانينها موضحة من خلال المعادلة ادناه ، ومن الممكن التعبير عن فرق الضغط الذي يسبب التدوير بالمعادلة.

$$\Delta P_d = \mathrm{H\ g}\left(\rho_{dc} - \overline{\rho}_r\right) \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (1\text{-}4)$$

حيث أن:

$\Delta\rho_d$ الضغط المدور (Pa) ($\frac{N}{m^2}$).

H ارتفاع مستوى الماء في الخزان العلوي عن الأنابيب الرئيسية السفلية (m).

g_c هو معامل التحويل ويساوي 1.

ρ_{dc} الكثافة للماء في الأنابيب النازلة ($\frac{Kg}{m^3}$).

$\bar{\rho}_r$ معدل الكثافة لخليط (الماء والبخار) في الأنابيب الصاعدة ($\frac{Kg}{m^3}$).

تكمن الصعوبة في ايجاد ($\bar{\rho}_r$) حيث تكون الدالة لتناسب الفراغ (Void Fraction) (a) حيث أن : -

$$a = \frac{\text{Volume of Steam}}{\text{Volume of Liquid + Volume of Steam}} \quad \text{.....(2-4)}$$

وتكون (a) معاكس لـ (x) النوعية (quality) للكتلة يمكن توضيح العلاقة بين (a) و (x) من خلال المعادلة: -

$$a = \frac{1}{\left\{ 1 + \left[\frac{(1-x)}{x} \right] \times \frac{1}{\psi} \right\}} \quad \text{.....(3-4)}$$

$$x = \frac{1}{\left\{ 1 + \left[\frac{(1-x)}{x} \right] \times \frac{1}{\psi} \right\}} \quad \text{.....(4-4)}$$

$$\psi = \frac{U_f}{U_g} \quad \text{.....(5-4)}$$

حيث أن : -

U_f : الحجم النوعي للسائل المشبع $\frac{m^3}{Kg}$

U_g : الحجم النوعي للبخار المشبع $\frac{m^3}{Kg}$

أما نسبة الانزلاق (Slip Ratio) بين الطورين المكونين للخليط اللذان لهما نفس السرعة فيمكن تمثيله بالعامل (S)

$$S = \frac{\overline{V}_{s,g}}{\overline{V}_{s,f}} \quad \text{.....(6-4)}$$

حيث ان

$V_{s,g}$ معدل السرعة للبخار خلال أي مقطع من الأنبوب الصاعد.

$V_{s,f}$ معدل السرعة للسائل (الماء) خلال أي مقطع من الأنبوب الصاعد.

وعلية يمكن ايجاد معدل الكثافة ($\overline{\rho_r}$) في الأنبوب الصاعد من المعادلة التالية: -

$$\left\{ 1-\left[\frac{1}{a_e(1-\psi)}-1\right]\times \ln\frac{1}{1-a_e(1-\psi)} \right\} \overline{\rho_r} = \rho_r \frac{(\rho_f-\rho_g)}{(1-\psi)}$$

حيث أن: نسبة الفراغ في الانابيب الصاعدة

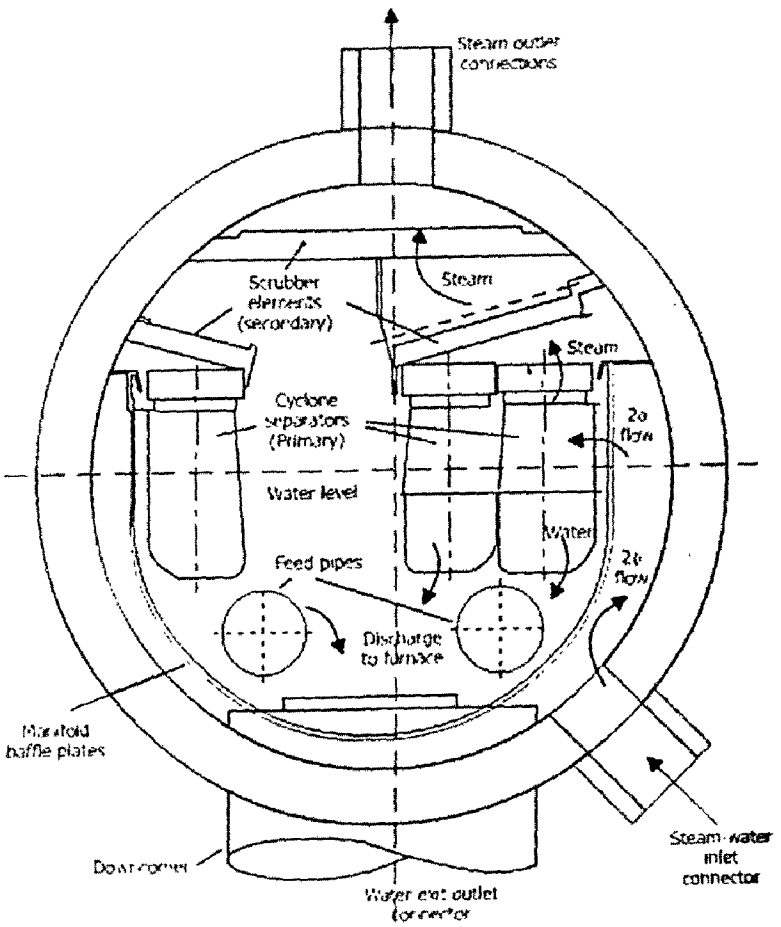
ان دورة بخار الماء في الضغوط العالية تمر بالأجزاء التالية: - خزان البخار (Steam Drum)، المحمصة (Superheater) ، المقتصدات (Economizer)، التسخين البيني (Reheater) ، المسيطرات على درجات حرارة البخار (Steam Temperature Control).

3.3.2.5 خزان الب خارSteam Drum

ان الغرض الاساس لخزان البخار هو لفصل البخار عن الماء، اما وظائف خزان البخار يمكن إجمالها بالآتي

- مزج ماء المغذي الداخل الى الخزان مع السائل المشبع بعد فصل البخار.
- مزج المضافات الكيميائية أو ما يسمى بمعيقات التآكل (Corrosion Inhibitors) للسيطرة على التأكل.
- تنقية البخار في حالة وجود اي شوائب معينة وازالة الرطوبة المتبقية قبل الانتقال الى المحمصة.
- ازالة جزء من الماء في حالة الغليان للسيطرة على الخواص الكيميائية لماء المرجل.

للحصول على كفاءة عالية لفصل البخار عن الماء من خزان البخار في المراجل ذات الضغوط العالية ، يتم اضافة تراكيب ميكانيكية (Mechanical Devices) في مقدمة خزان البخار، احد هذه التراكيب هي عبارة عن اشكال مخروطية Cyclone كما موضح في الشكل رقم (4 -7)، هذه الاشكال المخروطية تكون صفوف احادية او ثنائية تنصب طوليا على جوانب خزان البخار هذا التصميم يساعد على انتقال مزيج بخار الماء القادم من الانابيب الصاعدة Risers الى التراكيب المخروطية بقوة الطرد المركزي والتي تعمل على فصل الماء عن البخار بسرعة كبيرة حيث ان الماء الذي تم فصلة من البخار يرجع الى خزان البخار اسفل مستوى ماء الخزان اما البخار فانه يمر فانه يمر في انابيب البخار العلوية بعد مرورها خلال التراكيب المخروطية التي عملت على فصل البخار عن الماء.



الشكل (4 -7) : يوضح التراكيب المخروطية التي يتم تركيبها على جوانب خزان البخار.

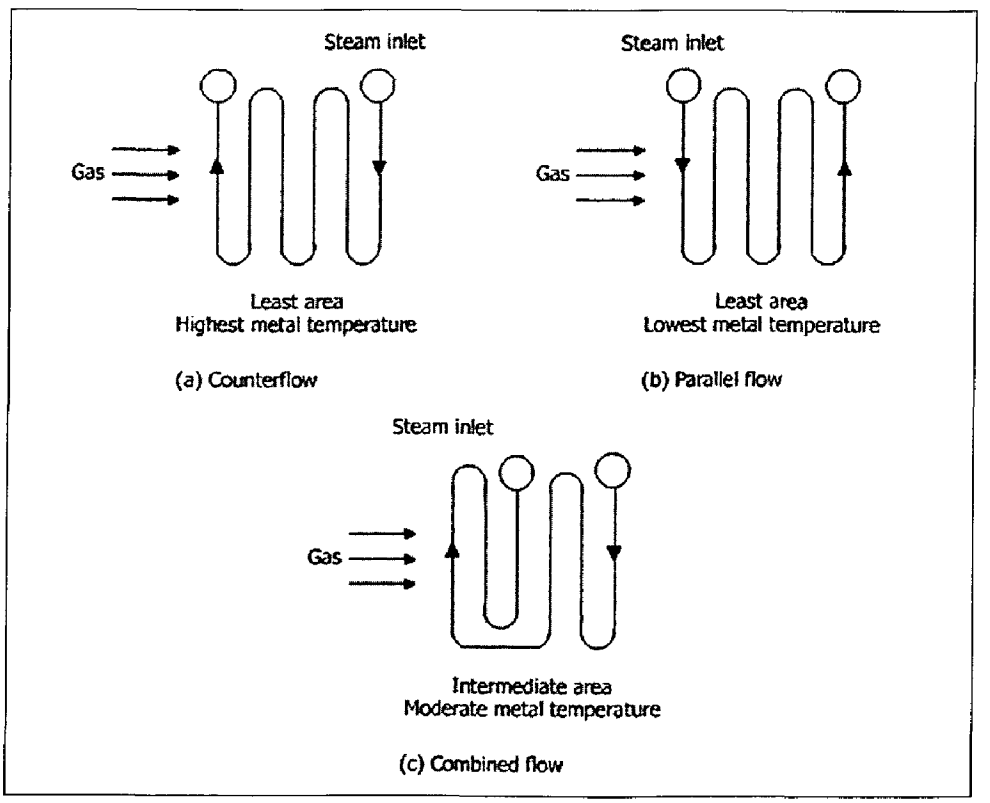
3.4.2.5 المحمصات Superheaters

المحمصات في مولدات البخار العاملة ضمن محطات القدرة الحديثة يكون القطر الخارجي للأنابيب حوالي (5.076 cm) حيث أن لهذا القطر الصغير اجهاد ضغط وتحمل افضل مما لو كانت ذات قطر كبير.

ويكون الشكل الخارجي لهذه الأنابيب عادة خالياً من أية زعانف (Fins) أو تراكيب اخرى، لان وجودها قد يسبب زيادة في الاجهادات الحرارية ويجعل من

الصعوبة إجراء أي اعمال صيانة وتنظيف المحمصات وكما موضح في الشكل (4-8).

في المحمصات ليس هنالك ضرورة لتحزيز الأنابيب من الداخل كما هو الحال في انابيب جدران الماء (جدران الفرن) لعدم وجود خطورة حدوث حالة اختفاء نويات الغليان (DNB) في المحمصات.



شكل (4 -8) يوضح انواع مختلفة من المحمصات

ويعتمد تصميم مولدات البخار [محمصات] على كيفية ايجاد الطريقة المثلى لانتقال الحرارة وعلى جريان بخار الماء داخل الأنابيب، وبخار الماء يكون ذا موصلية اقل بالمقارنة مع نويات الغليان في انابيب الماء لجدران المراجل.

ويتم اختيار السبائك الحديدية ذات بنية قابلة على تحمل الدرجات الحرارية العالية والاجهادات الحرارية المسلطة على الأنابيب اثناء تشغيل وتكون درجة حرارة التشغيل لها حوالي $540^{\circ}C$ ويجب أن تكون السبيكة الحديدية المستخدمة في المحمصات مقاومة للتآكل ايضا.

تعتمد مقاومة سبيكة المحمصة على بخار الماء من حيث الضغط ودرجة الحرارة وعلى نوع الوقود المستخدم وخاصة اذا ما كان الوقود يحتوي على الشوائب.

تصنف المحمصات من حيث طريقة انتقال الحرارة اليها إلى.

a- محمصات الحمل (Convection Superheaters).

b- محمصات الاشعاع (Radiation Superheaters).

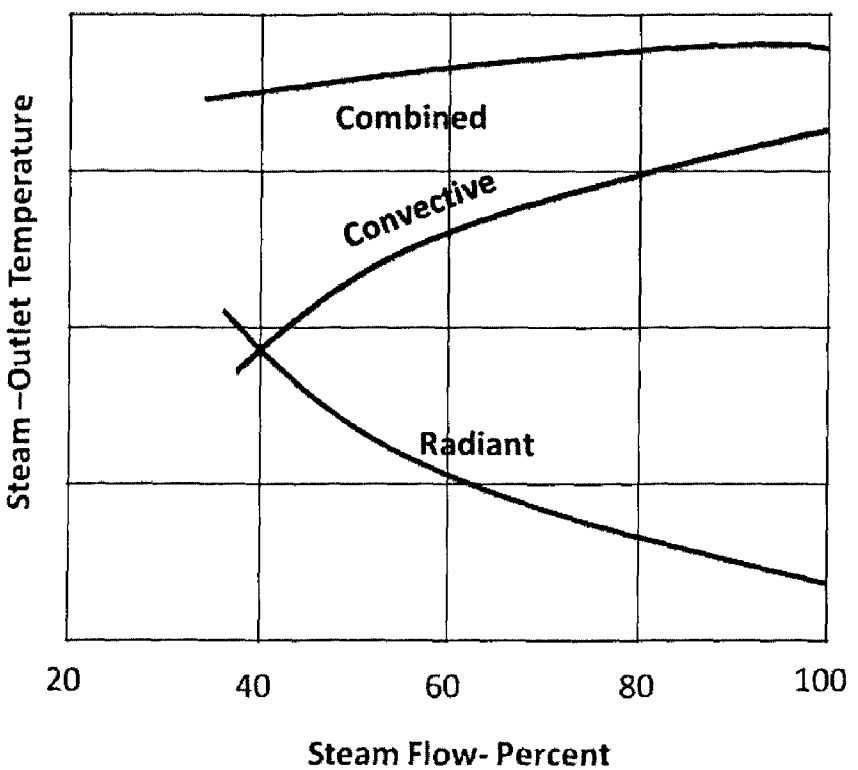
c- المحمصات الجامعة بين الحمل والإشعاع. (Combined Radiation and Convection Superheaters)

a- محمصات الحمل (Convection Superheaters).

كانت التصاميم الاولية للمحمصات قد وضعتها فوق أو بعيدة عن لهب الاحتراق والدرجات الحرارية العالية وذلك لحمايتها من فرط التسخين(Overheating). وان النمط الاساس لانتقال الحرارة بين غازات الاحتراق وانابيب المحمصة وهو الحمل (Convection) لذلك عرف هذا النوع بمحمصات الحمل، عند تغير الحمل (Load Changes) فان الميزة الرئيسة لهذا النوع هو خاصية الاستجابة عند زيادة الطلب على البخار مما يؤدي إلى زيادة حقن الهواء

والوقود ومن ثم زيادة جريان غازات الاحتراق ومعاملات انتقال الحرارة الكلي بين غازات الاحتراق والبخار اسرع من الزيادة في معدل انتقال الكتلة للبخار وحده.

أن درجة حرارة الاحتراق لا تتأثر بشكل كبير مع تغير الحمل، وعلية فان البخار يسلم مقدارا اكبر من الحرارة لوحدة المعدل جريان الكتلة ويزداد درجة حرارته بزيادة الحمل وكما يوضحه الشكل (4 -9).



الشكل (4 -9) يبين العلاقة بين الحمل ودرجة حرارة خروج البخار

b- محمصات الإشعاع Radiation Superheaters.

بسبب الحاجة إلى امتصاص كمية اكبر من الحرارة، تم وضع المحمصات في الأماكن ذات الدرجات الحرارية العالية، وغالبا ما توضع في مسقط لهب الاحتراق (Combustion Flame) ويتم زيادة سرعة الجريان للبخار وذلك ولزيادة

المعاملات الكلية لانتقال الحرارة، والتصاميم والاجمالية للمحمصات قد تم تحسينها وتطويرها المحمصات للتغلب على الدرجات الحرارية العالية التي يصلها المعدن.

أن وضع المحمصات في هذا الموقع يؤدي إلى انتقال الحرارة بالإشعاع بشكل اساس بين الغازات الساخنة واللهب والسطوح الخارجية لأنابيب المحمصات، لذلك عرف هذا النوع بمحمصات الاشعاع، أن انتقال الحرارة بالإشعاع بتناسب مع $(T_f^4 - T_w^4)$

حيث أن T_{w_3} T_f هما درجة حرارة اللهب ودرجة حرارة جدار الأنبوبة على التوالي بالدرجات المطلقة.

ولان T_f هي اكبر بكثير من T_w ، لذلك فان انتقال الحرارة يتناسب مع ، والمعروف أن درجة حرارة اللهبة (T_f) لا تعتمد على تغير الحمل (Load). وعلية فان انتقال الحرارة لوحدة جريان الكتلة للبخار سوف تقل بزيادة جريان البخار، اذا زيادة جريان البخار عند زيادة الحمل سوف يؤدي إلى نقصان في درجة حرارة الخروج للبخار.

c- المحمصات الجامعة بين الحمل والإشعاع

Combined Radiation and Convection Superheaters

بالإمكان الحصول على درجة حرارة ثابتة تقريبا للبخار الناتج من المحمصة وذلك باستخدام كلا النوعين من المحمصات المربوطة على التوالي.

توضع محمصة الحمل قرب فرن في الاعلى وتكون المحمصة تستلم الطاقة بالإشعاع ونلاحظ في هذا النوعية أن تأثير البخار بتغير الحمل (Load) ويكون اقل بالمقارنة مع المحمصة ذات التسخين بالحمل التي تكون مغطاة بحجاب واق.

3.5.2.5 المقتصدات Economizers

هي عبارة عن مبادل حرارة (Heat Exchanger) تستعمل لاسترجاع الحرارة المهدورة من نواتج الاحتراق بعد مرور غازات الاحتراق على المحمصات والمسخنات البينية حيث تستعمل لرفع درجات حرارة الماء المغذي للمرجل، حيث يتم إمرار الماء المغذي خلال حزمة أنابيب بشكل عكس جريان غازات الاحتراق حيث تمر من خلال سطوح تلك الأنابيب.

3.6.2.5 مسخن الهواء Air Heaters

يقع مسخن الهواء بعد المقتصد مباشرة يعمل على تسخين هواء الاحتراق وذلك باستخدام غازات الاحتراق بعد مرورها بالمقتصد حيث ان هذه الطريقة تعمل على نقصان درجة حرارة غازات الاحتراق قبل اطلاقها الى الجو من خلال المدخنة (Chimney) وزيادة درجة حرارة هواء الاحتراق مما يزيد من كفاءة المرجل وبذلك ان استخلاص (20 °C) من غازات الحرارة قبل اطلاقها الى الجو تعمل على زيادة كفاءة المرجل بنسبة 1%.

3.7.2.5 التوربين Turbines

هو جزء من منظومة توليد البخار، حيث يعد دالة لحركة المولدات (Generators) لتوليد الطاقة الكهربائية. أن اقصى طاقة للبخار تستهلك لتوليد

الطاقة، اما البخار الخارج من التوربين فانه يكون ذات درجة حرارة وضغط منخفضين، يكثف ذلك البخار ويعاد للمراجل مع ماء المغذي.

تنشأ مشاكل عديدة للتوربين بسبب الترسبات على ريش التوربين التي تسبب عوج تلك الريش التي بدورها تعمل على عدم التوازن للتوربين.

3.8.2.5 المكثفات Condensers

أن الواجب الاساسي للمكثف هو تكثيف البخار قبل دخوله إلى وحدة اعادة الغليان (Reboiler)، سطح المكثف يحتوي على حزمة أنابيب ينساب خلالها ماء التبريد وينساب البخار على السطح الخارجي لتلك الأنابيب الماء المتكثف لكي يخرج من قاعدة المكثف يصبح جاهزا لدخول مره ثانية ضمن دائرة (غاز – ماء).

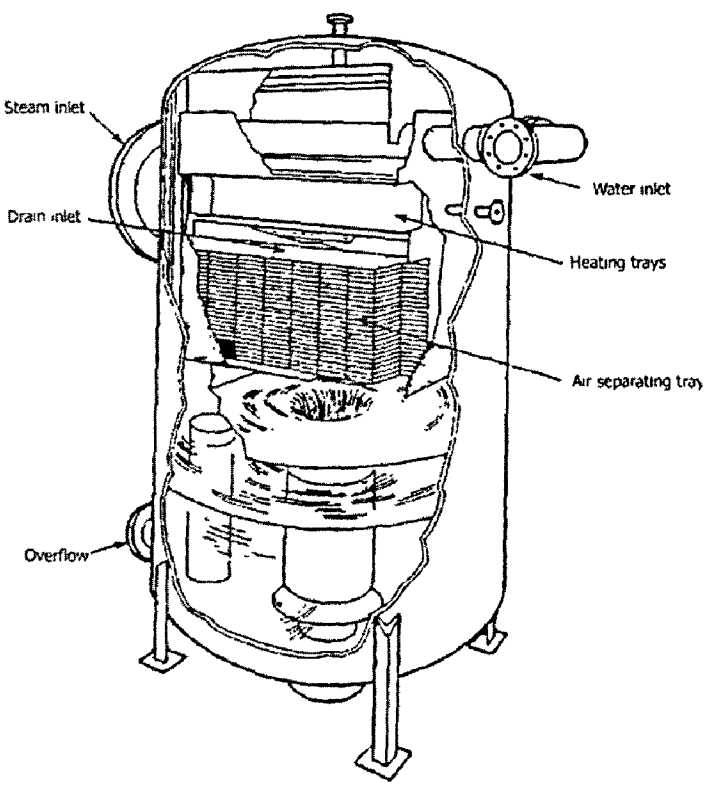
3.9.2.5 مسخنات ماء التغذية Feed Water Heaters

مسخنات الماء تتكون من مجموعة يمر خلالها ماء التغذية الذي يسخن من البخار الخارج من التوربين (بخار مشبع) الحرارة الكامنة التي يمتلكها البخار يأخذها ماء لتغذية الماء خلال الأنابيب اثناء ارتطام ذلك البخار على السطح الخارجي للأنابيب الحاوية على ماء التغذية لذلك تزداد درجة حرارته.

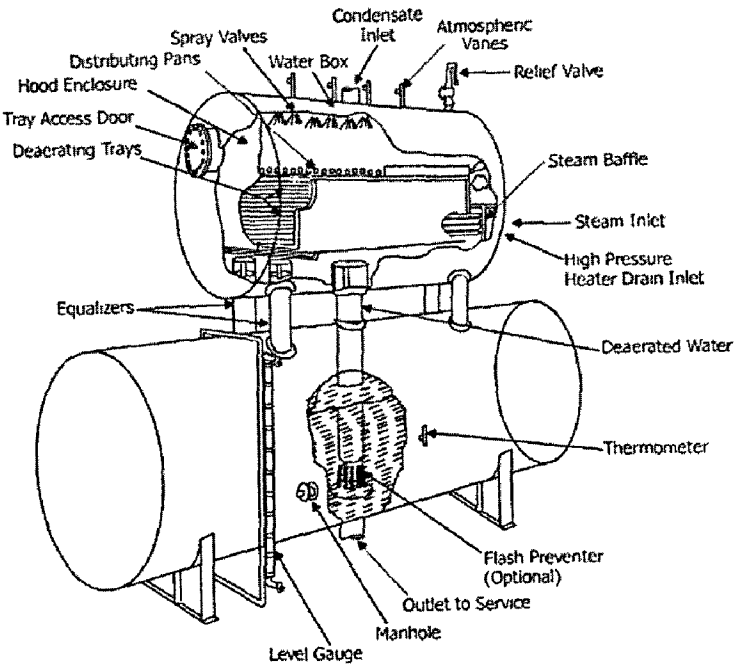
مسخنات نزع الهواء (Deaerated) من ماء التغذية تستخدم لإزالة الغازات غير المرغوب فيها من الماء وكذلك تعمل ايضا على زيادة درجة حرارته. هناك نوعان من المسخنات، مسخنات ذات الصواني ومسخنات رذاذيه في النوع الاول كميات كبيرة من البخار تكون داخل المسخن تعمل على زيادة درجة حرارة الماء

إلى مستوى الماء المشبع (Water Saturation)الجريان المعاكس للبخار يعمل على إزالة الغازات الذائبة من ماء التغذية المسخن.

اما النوع الثاني (المسخن الرذاذي) فيعمل مبادئ النوع ذات الصواني نفسه من حيث طرد الغازات من ماء التغذية لكن يختلف بالتصميم، حيث أن الماء ينتشر خلال البخار بشكل رذاذ بضغط (20 Psi)من خلال نافث (Nozzle) كلا النوعين يبينهما الشكلان (4 -10) و(4 -11).



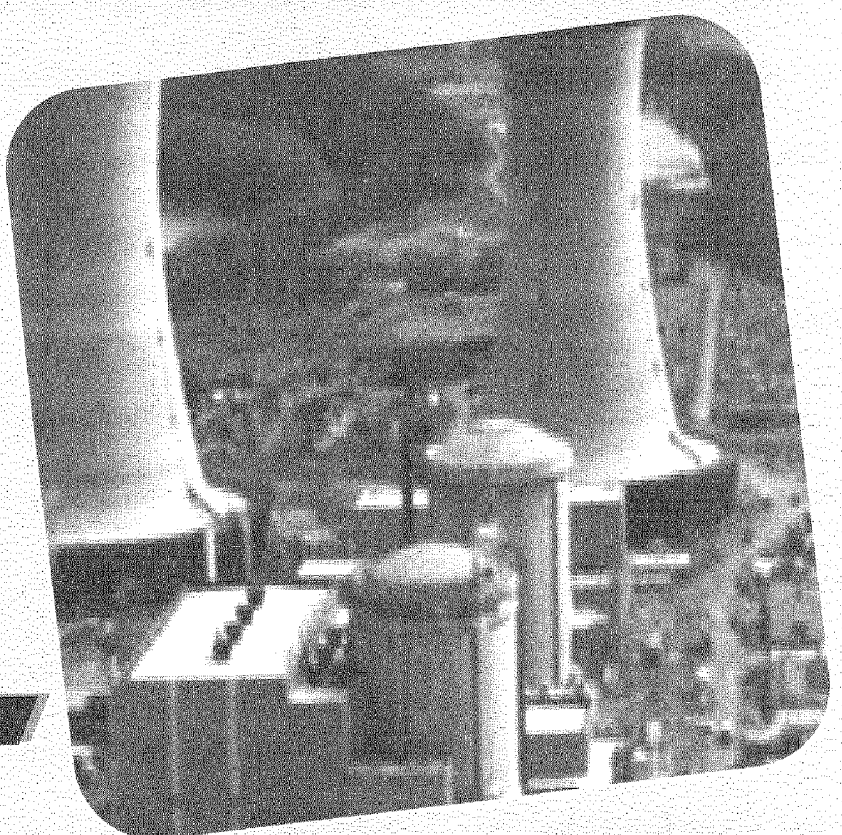
الشكل رقم(10) يظهر المسخن البيني ذات الصواني



الشكل رقم (4 -11) يظهر المسخن البيني الرذاذي

الفصل الخامس

تأكل انابيب المراجل البخارية



5

الفصل الخامس

تآكل انابيب المراجل البخارية

تآكل في جانب الماء

Water Side Corrosion

5.1 المقدمة Introduction

يعد الماء من أهم المواد الموجودة في الطبيعة على الإطلاق فهو يشكل ما يقارب ثلاث أرباع القشرة الأرضية، حيث لا تستقيم الحياة إلا بوجود الماء وهو مهم لكافة الكائنات الحية (وجعلنا من الماء كل شيء حي)، حيث لا تخلو صناعة لاستخدام الماء كوسيلة للإنتاج أو كمادة أولية أو كبخار لشتى الاستخدامات الصناعية وتوليد الطاقة الكهربائية.

إن كميات الماء المستخدمة في الأغراض الصناعية تبلغ أضعاف ما هو مستخدم لاستعمال الإنسان اليومية، حيث إن اغلب التفاعلات الكيماوية تتم بوجود وسط مائي، لهذا تبرز مشاكل عديدة نتيجة لذلك الاستخدام منها ترسب الأملاح التي يحتويها الماء الصناعي سواء كانت ذائبة أو عالقة على سطوح المعادن التي تكون على تماس مباشر مع الماء حيث يؤدي إلى تآكل بسبب الماء أو لسبب ما يحتويه من ملوثات. تترسب الشوائب على شكل كربونات او كبريتات المعادن بصورة رئيسية داخل أنابيب المراجل أو المبادلات الحرارية على شكل طبقات سميكة وعازلة حراريا مما يتطلب صرف كميات اكبر من الطاقة للحصول على

نفس الدرجة الحرارية داخل الأنابيب مما يعني تعريض سطح الأنبوب الخارجي لدرجات حرارية عالية تؤدي إلى تكوين ما يسمى (Hot Spot) وهذا بدورة ينتج في ضعف المقاومة الميكانيكية للمعدن وبالتالي يحدث كسر المعدن أو انفجاره كما إن ترسب الأملاح على الجدار الداخلي للأنبوب يسبب في انخفاض مساحة المقطع الذي به وبالتالي إلى انخفاض كمية المياه المارة في وحدة الزمن وهذا يتطلب رفع ضغط السائل داخل الأنبوب وبالتالي يعجل بالكسر. كما ان هناك احتمال لنمو مستعمرات لبكتريا هوائية تحت هذه الترسبات قد تسبب تآكل موضعيا شديد.

يعد الماء من المواد المستقطبة وذات ثابت عزل كهربائي (Dialectical Constant) عالي وذلك إن اغلب المواد تذوب بنسب متفاوتة وبهذا فان جميع الأملاح تذوب في الماء وبنسب معينة والتي يحددها حاصل الذوبان (Solubility Product) والذي يعرف بأنه حاصل ضرب فعاليات الايونات السالبة والموجبة في المحلول .

ترتفع قيم حاصل الذوبان الذي يرمز له K_{se} مع زيادة درجة الحرارة بشكل عام وتنخفض تلك القيم مع انخفاض درجة الحرارة، ان جميع مراحل عملية الذوبان هي عمليات عكسية وباعثة للحرارة، ان نظام المحلول الملحي هو أكثر استقرارا ثرموداينميكيا من الماء بدون أملاح لأنه حيث تكون جزيئات الماء مقيدة الحركة وهذا يعني أنها فاقدة لدرجة حرارة الانتقال. (Degree of Freedom Translation)أما في المحاليل فجزيئات الماء مقيدة نسبيا عن الحركة هذا يفسر لماذا يكون المحتوى الحراري للمحاليل اقل من المحتوى الحراري للماء. الجدول رقم (5 -1) يوضح قابلية الماء على إذابة معظم الايونات بنسب مقارنة وعند درجة حرارة الغرفة (25°C).

جدول (5 -1) بوضع الايونات الذائبة وغير ذائبة في الماء

الايون	صفة الذوبان
الكربونات $CO_3^{=}$	جميع الكربونات لا تذوب ماعدا كربونات الامونيا والقلويات N، Na، Li
البيكاربونات HCO_3^-	تذوب جميعها في الماء
الكبريتيت $SO_3^{=}$	لا تذوب جميعها ما عدا كبريتات NH_4^- ، Li^+، Na^+، K^+
الثايوكبريتات $S_2O_3^{=}$	تذوب معظمها
الكبريتيدات $S^{=}$	جميعها لا تذوب ماعدا كبريتيد NH_4^-، Li^+، Na^+، K^+
الكبريتات $SO_4^{=}$	تذوب كلها ماعدا Pb^{+2}، Ba^{+2}، Ca^{+2} ، Sr^{+2} ، Hg_2^{+2}
النترات NO_3^-	تذوب جميعها ماعدا $HgNO_3$ فهو قليل الذوبان
النتريتات NO_2^-	تذوب جميعها ماعدا $AgNO_2$
السينات CNO^-	تذوب جميعها ماعدا السينات Ag، Cu، Pb.
السيانيدات CN^-	تذوب السيانيدات القلوية ولا تذوب البقية
الكلورات ClO_3^-	تذوب معظمها في الماء
الكلوريدت Cl^-	تذوب معظمها في الماء
البروميدات Br^-	تذوب معظمها في الماء
اليوديدات I^-	تذوب معظمها في الماء
الثايوسينات SCN^-	تذوب معظمها ماعدا ثايوسينات Ag^+، Pb^{+2}، Cu^{+2}، Hg_2^{+2}
الفوسفات PO_3^{-3}	تذوب خواصها NH_4^+ ، Li^+، Na^+ ، K^+ والبقية شحيحة الذوبان
البورات $B_4O_7^{=}$، $B\ O_3^{-3}$، BO_2^-	لا تذوب ماعدا البورات الفلزية القلوية والامونيا
الزرنيخات	شحيحة الذوبان ما عدا الزرنيخات القلوية

5.2 ميكانيكية التآكل في المحيط المائي

Mechanical of Corrosion in Aqueous Solution

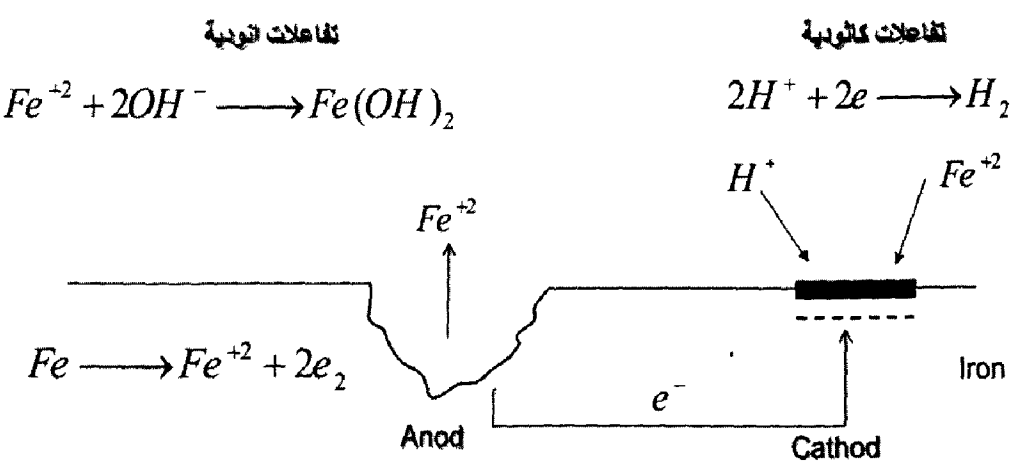
1.2.5 ميكانيكية التآكل بغياب الأوكسجين

Mechanical Corrosion in Oxygen Absence

الشكل (5 -1) يوضح طبيعة ونوعية التآكل الذي يحصل بسبب الماء في محيط لا هوائي لا يحتوي على الأوكسجين بكمية كبيرة، الماء الصناعي يحتوي على كمية من الايونات الملوثة مثل الحديدوز وهي السبب في تحلله بشكل: -

$$H_2O \longrightarrow OH^- + H^+ \quad \text{.....(1-5)}$$

ايونات الحديدوز في الماء تتكون لأسباب عدة منها ميله الطبيعي لتكوين هذا الايون، وجود معدن أخر ذو جهد قطب أعلى منه، وجود شوائب على السطح (جزء محمي من السطح والجزء الأخر غير محمي)، وجود سطح غير منتظم الجهد أو وجود عيوب بلورية.



الشكل رقم (5 -1) تآكل في محيط لأهوائي بتأثير ايون الهيدروجين

الماء يتأثر بتأثير الايونات إن تأين الماء بسبب ايونات الحديدوز سيولد هيدروكسيد الحديدوز الذي يجتمع عند الانود، بينما يحدث اختزال الايون الهيدروجين عند الكاثود عندها ينتج غاز الهيدروجين وحسب المعادلات التالية: -

$$Fe \longrightarrow Fe^{+2} + 2e \quad \ldots\ldots \quad E^{\circ} = -0.44V \ldots\ldots \quad (2-5)$$

$$Fe^{+2} + 2OH^{-} \longrightarrow Fe(OH)_2 \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad (3-5)$$

$$2H^{+} + 2e^{-} \longrightarrow H_2 \uparrow \quad \ldots\ldots \quad E = 0.00 \ldots\ldots \quad (4-5)$$

لذلك فالتفاعل الكلي : -

$$Fe + 2OH^{+} \longrightarrow Fe^{+2} + H_2 \uparrow \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (5\text{-}5)$$

إن جهد الخلية يعادل مجموع المعادلات أعلاه

$$E^{\circ} = -0.44 + 0.00 = -0.44V$$

حسب جهد الخلية أعلاه حسب الظروف القياسية أما إذا الظروف غير قياسية فان جهد الخلية يحسب من معادلة يترسب [Nernst Eq.]

$$E_{Fe/H_2} + E^{o}_{Fe/H_2} - \frac{0.059}{2} \log \frac{Fe^{+2}}{[H^{+}]} \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (6\text{-}5)$$

$$E_{cell} = -0.44 - 0.029(\log[Fe^{+2}] - 2\log[H^{+}]) \ldots\ldots\ldots (7\text{-}5)$$

$$E_{cell} = -0.44 - 0.029(\log Fe^{+2} - 2pH) \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (8\text{-}5)$$

ونشير هنا إلى إن التآكل لا يحصل إلا إذا كانت قيم E موجبة أي يبدأ التآكل عندها

$$0 \leq E_{cell}$$

$$= -0.44 - 0.029(\log Fe^{+2} - 2pH) \quad \text{.....(9- 5)}$$

$$2pH = 15.17 + \log F^{+2} \quad \text{.....(10- 5)}$$

وبالتعويض عن قيمة تركيز الحديد في المعادلة نحصل على إن قيمة pH=10.5وهذا يعني إن التآكل يبدأ ويزداد فقط عندما تكون قيمة pH للماء اقل من 10.5 أما في محيط اكبر من H=10.5p فان سرعة التآكل قليلة ومهملة ا وان الإمكانية الثرموداينميكية للتآكل قليلة جدا.

2-2-5 ميكانيكية التآكل في الماء بوجود الأوكسجين

Mechanical Corrosion in Water with Present Oxygen

إن وجود وفرة من الأوكسجين في الماء تغير من طبيعة التفاعلات الحاصلة على سطح المعدن عند الكاثود والانود ، إن وجود الحديدوز في الماء لأي سبب كان يعمل على في تأين الماء وحسب المعادلات التالية : -

$$Fe \longrightarrow Fe^{+2} + 2e^{-} \quad \text{.....(11- 5)}$$

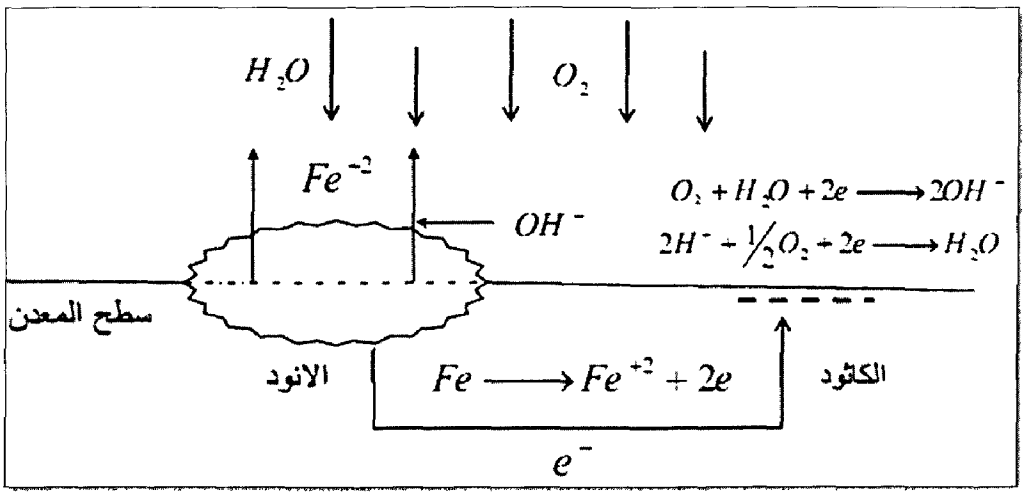
$$H_oO + \frac{1}{2}O_2 + 2e^{-} \longrightarrow 2OH^{-} + 2e^{-} \ldots E = 1025V \quad \text{.....(12-5)}$$

$$Fe^{+2} + 2OH \longrightarrow Fe(OH)_2 \quad \text{.....(13-5)}$$

$$Fe(OH)_2 + \frac{1}{2}O_2 + \frac{1}{2}H_2O \longrightarrow Fe(OH)_3 \quad \text{.....(14-5)}$$

$$O_2 + 2H^+ + 2e^- \longrightarrow 2OH^-$$ (المحيط يحتوي على الاوكسجين) ... (15-5).

والشكل رقم (2) يمثل تآكل الحديد في محيط مائي يحتوي على وفرة من الأوكسجين



الشكل رقم (5 -2) يوضح تآكل معدن الحديد الحاوي على وفره من الأوكسجين

يلاحظ من المعادلات أعلاه إن وجود الأوكسجين يجعل ناتج التآكل هيدروكسيد الحديديك بشكل رئيسي كما يوفر كميات كبيرة من ايونات الهيدروكسيد عند الكاثود أو استهلاك كميات إضافية من ايون الهيدروجين في محيط مائي حامضي. إن سرعة التفاعلات في المعادلات أعلاه محكومة بسرعة انتشار الأوكسجين في الماء لأنه الخطوة الأقل سرعة من مجموع الخطوات الأخرى ، لكن التفاعل في المعادلة رقم (5 -3) هو سيتحكم في جميع التفاعلات السابقة.

$$2H_2O + O_2 + 4e^- \longrightarrow 4OH^- \ldots\ldots E = 1.25V \quad \ldots\ldots\ldots (16\text{-}5)$$

حيث إن جهد التفاعل E يساوي 1.25 فولت في الظروف القياسية اما في الظروف غير القياسية فيحسب حسب معادلة نيرنست : -

$$E = E^{o} - \frac{RT}{nf} \ln k \quad \text{.....(17-5)}$$

حيث إن K ثابت التوازن، T درجة الحرارة، R الثابت العام للغازات، F ثابت فراداي، n عدد الالكترونات

$$K = \frac{[OH^{-}]^{4}}{Po_2} \quad \text{.....(18-5)}$$

حيث Po_2 الضغط الجزيئي للأوكسجين

$$E = E^{o} - \frac{2.303RT}{nF} \log \frac{[OH^{-}]^{4}}{po_2} \quad \text{.....(19-5)}$$

عندما نأخذ $n = 4$ ، $T = 298\ K$ ، $R = 8.314 \frac{J}{mole\,k}$

$$E = E^{o} + 0.059\, p[OH^{-}] + 0.0147 \log Po_2 \quad \text{.....(20-5)}$$

حيث إن : -

$$P[OH^{-}] = -\log[OH^{-}] = 14 - pH$$

من المعادلة أعلاه يتضح إن حدوث التآكل وسرعته تعتمد على قيمة pH للماء وعلى الضغط الجزيئي للأوكسجين وان سرعة التآكل ستكون اكبر بانخفاض pH وزيادة الضغط الجزيئي للأوكسجين Po_2.

3-5 المشاكل التي يسببها الماء المستعمل في المراجل

The Problems Caused by Water in Boiler

إن معالجة الماء الداخل إلى المراجل من الضرورات الحتمية التي يجب العمل عليها وذلك إزالة أو التقليل من الشوائب التي يحتويها ذلك الماء وإلا فان عدم إزالة تلك الشوائب تؤدي إلى مشاكل جمة أثناء عملية التشغيل منها:

1 - الشوائب المحمولة مع البخار (Carry Over).

2 - تكوين القشرة (Scale Formation).

3 - التآكل (Corrosion).

4 - التقصف القاعدي (Caustic Embrittlement).

جميع هذه المشاكل تزداد مع زيادة الضغط التشغيلي للمرجل، لذلك اقترحت إحدى الجمعيات العالمية New England Water Works Association الحدود المسموح بها لاحتواء ماء المرجل من الشوائب كما موضح في الجدول رقم (5 -2).

الجدول رقم (5 -2) الحدود المقترحة المسموحة في الماء المغذي للمرجل

الخصائص (الشوائب)	الضغط (MN/m^2)			
	1.0 - 0	1.7 - 1.0	2.8 - 1.7	أكثر من 2.8
1 - الكدورة (Silica Scale Units)	20	10	5	1
2 - اللون (Hazen – Units)	80	40	5	1
3 - الأوكسجين المستهلك (mg/l)	15	10	4	3
4 - الأوكسجين المذاب (mg/l)	2	0.2	0	0
5 - كبريتيد الهيدروجين (mg/l)	5	3	0	0
6 - العسرة الكلية $CaCo_3$ (mg/l)	80	40	10	2
7 - نسبة الكبريتات إلى الكاربون	1:1	2:1	3:1	3:1
8 - اوكسيد الألمنيوم (mg/l)	5	0.5	0.05	0.01
9 - السيليكات (mg/l)	40	20	5	1
10 - البيكاربونات (mg/l)	200	100	40	20
11 - الهيدروكسيد (mg/l)	50	40	30	15
12 - الأجسام الصلبة (mg/l)	3000 - 1500	2000- 1500	1500 - 100	50
13 - قيمة pH	8.0	8.4	9	9.6

3.1.5 الشوائب المحمولة مع البخار Carry Over

البخار المتكون في المرجل ابتداء قبل دخوله إلى المحمصة يكون مصحوبا بقطيرات مائية (Droplets) وهذا النوع من البخار يسمى البخار الرطب (Wet Steam)، هذه القطيرات قد تحمل معها الشوائب العالقة و الذائبة الداخلة مع الماء المغذي للمرجل، إن ظاهرة البخار المشبع الحامل للشوائب تسمى "Carry Over"

الماء المحمول مع البخار وكذلك الصلب يطلق علية بمحددات نوعية البخار وتقاس الشوائب الصلبة المتواجدة مع البخار بوحدة جزء لكل مليون جزء (ppm) أما كمية الماء المصاحبة للبخار فإنها تقاس كنسبة مئوية وتكون مؤشرا لمقدار الرطوبة مع البخار.

البخار قبل استخدامه لتدوير التوربينات فانه يدخل إلى المحمصة لزيادة درجة الحرارة والضغط لذلك البخار وفي حالة كون البخار يكون حاملا لكمية من القطيرات المائية فانه يسبب تآكل للمحمصة من مواقع دخول ذلك البخار الرطب كذلك إن الرطوبة الزائدة للبخار الداخل الى المحمصة يؤدي إلى انخفاض في كفاءة التوربين وذلك لعدم وصول البخار المحمص لدرجة الحرارة والضغط المطلوبين، أما الشوائب الصلبة التي يحملها البخار الداخل إلى المحمصة (Superheater) فإنها من الممكن إن تترسب على السطوح الداخلية لأنابيب المحمصة تؤدي إلى تكوين ما يسمى (Hot Spot) التي مع مرور العمل تؤدي إلى ما يسمى فرط التسخين (Overheating) وبالتالي انصهار تلك الأجزاء من الأنابيب مؤدية إلى الفشل وكذلك من الطبيعي جزء من تلك الشوائب الصلبة تبقى محمولة مع البخار المحمص الذي يستخدم فيما بعد لتشغيل التوربين حيث أنها ترتطم مع ريش التوربين وتعمل على تكوين الترسبات وبذلك تقود إلى تآكل تلك الريش.

من الممكن إن يكون هناك كمية صغيرة من الزيوت مع البخار وهي لا تأتي بطبيعة الحال من مصدر الماء المغذي للمرجل ولكنها قد تأتي من الزيوت المستخدمة للتزييت في المضخات أو يأتي مع البخار المكشف الخارج من التوربين

عن طريق اسطوانة البخار، إن هذا الزيت يؤدي إلى تكوين عازل حراري على شكل غشاء زيتي وكذلك يؤدي إلى تكوين (Carry Over). إن الزيوت مع البخار تزال عن طريق عملية التخثر (Coagulation) مع الومينات الصوديوم حيث ينتج كل $Al(OH)_2$ ، $Mg(OH)_2$ على شكل رواسب والتي تعمل على شكل شباك لصيد الزيت. أما الشوائب التي يحملها البخار وخصوصا السيليكات فان جزء منها يذهب مع البخار المحمص وترتطم في الزعانف وتكون ترسبات من سيلكات المغنسيوم أو الكالسيوم وثم تؤدي الى قشرة تعمل على العزل الحراري. من الممكن ان تزال السيلكا من الماء المغذي للمرجل بعدة طرق.

1 - إضافة المغنيسيا (MgO) الى الماء بعد إزالة العسرة المؤقتة.

2 - إضافة المغنيسيا إلى الماء في المرجل حيث ان حيث إن السيلكا تترسب على شكل سيلكات المغنيسيوم.

3 - استخدام كبريتات الحديد أو الومينات الصوديوم كمادة مخثرة، حيث تعمل كل من $Fe(OH)_2$ او $Mg(OH)_2$ ، $Al(OH)_3$ كشباك لصيد الشوائب ومنها السيلكا.

4 - تحويل السيلكا إلى فلوسيلكات بإضافة حامض الهيدروفلوريك ثم بعد ذلك إزالته بالتبادل ألايوني باستخدام الراتنجات.

$$H_3SiF_6 + 2R_3N \longrightarrow (R_3N)_2.H_2SiF_6 \ldots\ldots\ldots (21-5)$$

3.2.5 تكوين القشرة Scale Formation

عند دخول الماء إلى المرجل فانه يتحول الى بخار وخلال تحول الماء إلى بخار فان تركيز الشوائب الذائبة يزداد إلى إن يتحول إلى الماء المشبع عندها الأملاح تبدأ بالانفصال من المحلول، بعض الشوائب الصلبة فإنها تترسب على شكل أطيان او على شكل عوالق، من جهة أخرى بعض الرواسب الصلبة تلتصق على السطوح الداخلية لأنابيب المرجل و إن هذه المترسبات الصلبة الملتصقة على سطح المعدن ذات تأثير خطير على كفاءة المرجل.

إن المواد الصلبة المنفصلة من الماء اثناء عملية التبخير هي عبارة عن أملاح الكالسيوم مثل $CaSO_4$، $Ca(OH)_2$، $CaCO_3$، $Ca_3(PO_4)_2Ca(OH)_2$ ومكونات المغنيسيوم كهيدروكسيد المغنيسيوم $Mg(OH)_2$ وسيلكات المغنيسيوم والكالسيوم.

إن من أهم مساوئ تكوين القشرة هي: -

1 - إن القشور موصل درئ للحرارة حيث تكون على شكل غطاء عازل على سطح المعدن وهذا يؤدي إلى التقليل من معدل انتقال الحرارة وكذلك ان سعة التبخير في المرجل سوف تقل.

2 - ان تكون القشرة والتصاقها على السطح الداخلي لأنابيب المرجل تؤدي إلى تكوين عازل حراري وبالتالي حصول حالة فرط التسخين (Overheated)بحيث يصبح المعدن لين وضعيف مما يؤدي إلى الفشل.

3 - بالإضافة إلى فقدان المقاومة الميكانيكية نتيجة فرط التسخين يحدث تفاعل سريع بين الماء وحديد المعدن في درجات الحرارة العالية مما يؤدي الى ترقرق جدار الأنبوب.

$$Fe+4H_2O \longrightarrow Fe_3O_4(s)+4H_2(g)_3 \quad \text{.....(22-5)}$$

4 - بما إن القشرة تعمل كعازل حراري وبالتالي تقود الى فرط التسخين والتي تقود بعدها الى الترقرق المعدني عندها يحدث تكسير في الأنابيب في المنطقة التي حدث فيها فرط التسخين مما يؤدي خروج البخار من تلك الكسور ونتيجة لضغط البخار الكبير فانه من الممكن ان يؤدي الى انفجار.

5 - الكميات الكبيرة من الترسبات ممكن ان تؤدي الى انسداد بعض الأنابيب وبالتالي تؤدي إلى التقليل من عملية تدوير الماء داخل المرجل وبالتالي إلى التقليل من كفاءة المرجل.

3.1.2.5 الطرق التي تمنع تكوين القشرة Prevention of Scale Formation

منع تكوين القشرة تتم بطريقتين: -

أولا: -المعالجات الخارجية External Treatment

هذه الطريقة تتم عن طريق إزالة العسرة المسببة للشوائب (أملاح الكالسيوم والمغنيسيوم) والسليكا من الماء قبل دخوله المرجل.

ثانيا: -المعالجات الداخلية Internal Treatment

المعالجات الداخلة تتضمن إضافة مركبات كيماوية وبشكل مباشر الى الماء داخل المرجل وذلك لإزالة القشرة المتكونة نتيجة الأملاح والتي لم تزال بشكل كامل بالمعالجات الخارجية لإزالة عسرة الماء قبل دخولها إلى المرجل، في المراجل المستخدمة في محطات توليد الطاقة الكهربائية يجب إن تكون عسرة الماء مقاربة إلى الصفر.

أما أهم المعالجات لإزالة الترسبات

1 - تكيف الكربونات Carbonate Conditioning

إن ملح الكربونات يتكون من تفاعل ايون وايون حسب المعادلة ادناه : -

$$Ca^{+2} + CO_3^{-2} \longrightarrow CaCO_3 \quad \text{.....(23-5)}$$

يستمر التفاعل أعلاه لحين الوصول إلى حالة التوازن

$$[Ca^{+2}][Co_3^{+2}] = KCaCO_3 \quad \text{.....(24-5)}$$

حيث إن K تمثل ثابت التوازن أما [ ] فانه يمثل التركيز الأيوني تحت الظروف أعلاه عند إضافة كميات من Na_2CO_3 فان ايون CO_3^{-2} سوف يزداد وعندما يكون $KCaCO_3$ ثابت فان جزء من ايون Ca^{+2} يترسب وبنفس الطريقة إن كبريتات الكالسيوم تتكون من ايون SO_4^{-2} وايون Ca^{-2}.

$$[Ca^{+2}][So_4^{+2}] = KCaSO_4 \quad \text{.....(25-5)}$$

$$[Ca^{+2}][So_4^{+2}] = KCaSO_4 \quad \text{.....(26-5)}$$

لذا فان المحلول الذي يحتوي على ايونات Ca^{+2} ، SO_4^{+2}، CO_3^{+2} يصبح ذلك المحلول مشبع بمركبات $CaSO_4$ و $CaCO_3$

بقسمة المعادلة (1) بواسطة المعادلة (2) نحصل : -

$$\frac{[Ca^{+2}]}{[So_4^{+2}]}=\frac{KCaCO_3}{KCaSO_4}=K^- \quad \text{.....(27-5)}$$

إذا كان تركيز ايون الكربونات اكبر من $K^-[SO_4^{-2}]$ ، عندما فقط $CaCO_3$ تترسب وذلك لان ذوبانية $CaSO_4$ لا تحصل عند تلك الظروف لهذا فان $CaCO_3$ تترسب أما $CaSO_4$ فإنها تبقى في المحلول وهو مركب غير مكون للقشرة، لهذا إن إضافة كربونات الصوديوم إلى الماء تؤدي إلى زيادة في تكوين ايونات $[CO_3^{-2}]$

$$Na_2Co_3+CaSO_4 \longrightarrow CaCO_3\downarrow+Na_2SO_4 \text{.....(28-5)}$$

2 - تكيف الفوسفات Phosphate Conditioning

في حالة إن المحلول يحتوي على كل من مركبين $Ca_3(PO_4)_2$ و $CaSO_4$ فان التفاعلات أدناه سوف تحدث: -

$$Ca_3(PO_4)_2 \longrightarrow Ca^{+2}+2PO_4^{-2} \text{.....(29-5)}$$

$$\therefore [Ca^{+2}]_3[PO_4^{-3}]_2=KCa(PO_4)_2 \text{.....(30- 5)}$$

$$\therefore [Ca^{+2}]_3[PO_4^{-3}]^{\frac{2}{3}}=[KCa_3(PO_4)_2]^{\frac{2}{3}} \text{.....(31- 5)}$$

بنفس الأسلوب

$$Ca^{+2}+SO_3^{-2} \longrightarrow CaSO_4 \text{.....(32-5)}$$

$$[Ca+2]\,[SO4-2]=KCaCO4 \text{.....(33-5)}$$

بتقسيم معادلة (5 -31) بمعادلة (5 -32)

$$\frac{[PO_4^{-3}]^{\frac{2}{3}}}{[SO_4^{-2}]}=\frac{[KCa\,(PO_4)^{\frac{1}{3}}}{[KCaSO_4]}=K^{-}\ \text{Or}\ [PO_4^{-3}]^{\frac{2}{3}}=K^{-}[SO_4^{-2}]$$

ذلك عندما يكون $[PO_4^{-3}]$ اكبر من $K^{-}[SO_4^{-2}]$ ، عندها فقط $Ca(PO_4)_2$ فانه يترسب، وان تحت هذه الظروف $CaSO_4$ لا يذوب.

لهذا عند أضافه الفوسفات إلى ماء المرجل فإنها تعمل على ترسب ايونات الكالسيوم وذلك يتكون فوسفات الكالسيوم وهي عبارة عن مركب غير متماسك ولذلك لا تتكون قشرة.

3 - التكيف بالغروانيات Colloidal Conditioning

الغروانيات هي عبارة عن عوامل (Agents)مثل الغذاء البكتيري (Agaragar)، مواد الدباغ (Tannins) وهي قشور الرمان اليابسة وعشب البحر (Sea–Weed)، هذه المواد تعمل على حماية سطوح المعادن عندما تضاف الى ماء المرجل حيث تحيط بمركبات $CaSO_4$ و $CaCO_3$ وتمنعهن من الاندماج والتخثر بعدها تصبح الرواسب بالحالة الغروانية State of Colloidal عندها تصبح سهلة الإزالة بعملية Blow- Down وبذلك يمنع تكوين القشرة.

4 - التكييف مع EDTA (EDTA) Conditioning with

أحيانا مركبات الفوسفات تفشل في منع تكوين اكاسيد الحديد وتصبح تلك الفوسفات مصادر لتكوين ترسبات[مثال فوسفات الحديد] ، ولمعالجة هذه المشكلة هنالك مركبات معقدة ممكن أن تضاف إلى ماء المرجل ومنها حامض اثلين داي أمين تتراستيك (EDTA)(Ethylenediamine Tetra Acetic Acid) هذه

المركبات معقدة تعمل على تكوين ما يسمى بالقشرة الحرة (Scale – Free) أو أطيان حرة (Sludge – Free) تخرج الى الخارج عن طريق .(Blow – Down)

نذكر هنا نكتة علمية حدثت في الزمن الماضي إلى أدت إلى اكتشاف علمي مهم، حيث تشير هذه النكتة إلى إن احد العمال (Workman) بعد تنظيفه المرجل ومن إعادة أملاءه في الماء قد علق حقيبة تحتوي بطاطا (Potatoes) وذلك لغرض طبخها عن طريق حرارة ماء المرجل لكنة نسي إخراجها من المرجل وعند إطفاء المرجل مرة ثانية لغرض الصيانة وإزالة التقشرات وجد ذلك العامل وعلى غير العادة إن كمية القشرة قليلة جدا مقارنة بسابقاتها هذا شجع المهندسين إلى إضافة كمية من البطاطا بعد كل عملية تنظيف للمرجل، لذلك يعتبر من المعالجات الداخلية لماء المرجل لتقليل تكوين القشرة حيث تجعل الشوائب المكونة للقشرة إلى أوحال يمكن إزالتها بسهولة باستخدام (Blow – Off) بمرور الوقت تم استبدال البطاطا بالنشا تم بعدها استبدال النشا بقشور الرمان اليابسة (الدباغة) وبعض المركبات العضوية الأخرى التي تحتوي نفس المركبات المانعة لتكوين التقشر وكذلك بعض المركبات غير العضوية مثل الصودا العضوية والفوسفات وكبريتات الصوديوم.

3.3.5 تآكل أنابيب المرجل Corrosion of Boiler Tubes

التآكل الذي يحدق في أنابيب المراجل البخارية تساهم فيه عدة عوامل منها: -

1 - وجود أحماض بشكل حر في الماء.

2 - الأحماض تتكون كنتيجة لتحلل بعض الأملاح في الماء.

3 - الأحماض المتكونة نتيجة لبعض الدهون المزيتة.

4 - وجود غازات ذائبة كالأوكسجين وثاني اوكسيد الكربون وكبريتيد الهيدروجين ...الخ في الماء.

5 - وجود أملاح مثل $MgCl_2$ حيث تهاجم هذه الأملاح بشكل مباشر المعدن المتكون لأنابيب المعدن.

6 - وجود أملاح مثل MgS_2 حيث تكون H_2SO_4 المسبب للتآكل.

7 - تكوين خلايا كلفائية (Galvanic Cells).

التآكل بسبب الأوكسجين المذاب Corrosion by Dissolved Oxygen

الأوكسجين المذاب (O_2) هو المصدر الرئيسي للتآكل الحاصل في أنابيب المرجل، لذلك من الضروري إزالة الأوكسجين المذاب من ماء المرجل بواسطة الطرق الفيزياوية أو بإضافة المركبات الكيماوية. إن تركيز الأوكسجين في ماء المرجل يجب أن لا يزيد عن (0.05 ppm) للضغوط الواطئة و (0.01 ppm) للضغوط العالية.

الأوكسجين يدخل إلى المرجل أثناء التوقفات (Shutdown) ومن خلال الشقوق في أنابيب المرجل او من خلال علمية تصفية ماء المرجل أو عن طريق تسريب الهواء إلى أنظمة التكثيف. عندما يتم تسخين ماء المرجل فان الغازات تتحرر تعمل على تآكل الأجزاء المعدنية تحت الظروف التشغيلية التي يعمل بها المرجل وبما أن قانون دالتون وهنري (Dalton's law and Henry's) يشير إلى إن الغازات المذاب يتناسب طرديا مع الضغط وعكسيا ودرجة الحرارة وهذا الأساس

الذي يتم من خلاله تصميم المعدات الميكانيكية المستخدمة لإزالة الهواء من هذه الأجهزة يتم بإزالة الأوكسجين المذاب بواسطة حقن المرجل المغذي على شكل رذاذ من خلال غرفة مفرغة تسخن خارجيا بواسطة البخار، ولإزالة كامل كمية الأوكسجين الكذاب عندها يجب استخدام المركبات الكيماوية لهذا الغرض.

كبريت الصوديوم Na_2SO_3 من المواد الكيماوية الفعالة في إزالة الأوكسجين لكنها لا تعمل في الضغوط العالية حيث تتفاعل مع الأوكسجين المذاب وتتحول إلى كبريتات حسب المعادلة التالية:

$$NaSO_3 + \frac{1}{2}O_2 \longrightarrow Na_2SO_4 \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (34\text{-}5)$$

إن مركب كبريتيت الصوديوم لا يعمل في الضغوط العالية وان كبريتات الصوديوم تتحلل وتحرر SO_2 او H_2S.

أحيانا تستخدم كبريتات الحديد $FeSO_4$حيث تتفاعل مع الأوكسجين المذاب لكي يعطي $Fe(HO)_2$ على شكل راسب ثم بعدها يتأكسد لكي يتحول إلى $Fe(OH)_3$ وحسب المعادلتين أدناه: -

$$FeSo_4 + 2NaOH \longrightarrow Fe(OH)_2 + Na_2SO_4 \quad \ldots\ldots\ldots\ldots (35\text{-}5)$$

$$2Fe(OH)_2 + H_2O + \frac{1}{2}O_2 \longrightarrow 2Fe(OH)_3 \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (36\text{-}5)$$

أما أهم المركبات الكيماوية المستخدمة في الوقت الحاضر فهو مركب الهيدرايزين N_2H_4 (Hydrazine)، حيث اثبت هذا المركب على قدرته العالية على إزالة الأوكسجين المذاب في الضغوط العالية.

إن أهم الفوائد لاستخدام الهيدرايزين هو اتحاده مع الأوكسجين من دون توليد أي ملح. حيث فقط هو النيتروجين والماء يتحرران وحسب المعادلة التالية (37- 5)

$$N_2H_4 + O_2 \longrightarrow N_2 \uparrow + 2H_2O \quad \text{.....(37-5)}$$

حيث إن الوزن الجزئي للهيدرايزين والأوكسجين متساوي[Viz 32]، ذلك إن التخلص من 1ppm من الأوكسجين يحتاج فقط إلى (1ppm) من الهيدرايزين، أما الكمية المتبقية من الهيدرايزين فيمكن أن تقاس بواسطة الكالوميتر Colorimeter.

إن الكمية الإضافية من الهيدرايزين يجب أن يتم السيطرة عليها لأنها من الممكن أن تتحلل تلك الكمية وتتحول إلى أمونيا كالأتي: -

$$3N_2H_4 \longrightarrow 4NH_3 + N_2 \quad \text{.....(38-5)}$$

إن الامونيا المتحررة من تحلل الهيدرايزين تعمل على زيادة تآكل بعض السبائك وخصوصا سبائك النحاس.

من المهم ان نذكر هنا إن الهيدرايزين يحتاج عناية خاصة للتفاعل معه وكذلك طريقة تخزينه، حيث إن أهمية الهيدرايزين المضاف إلى ماء المرجل لا تكمن فقط كونه يعمل ككاسح للأوكسجين (Oxygen Scavenger) فقط ولكن له القدرة على اختزال نواتج التآكل المعدني وحسب التفاعلين أدناه: -

$$6Fe_2o_3 + N_2H_4 \longrightarrow 4Fe_3o_4 + 2H_2o \text{(اختزال اوكسيد الحديد)} \quad \text{.....(39-5)}$$

$$3CuO = + N_2H_4 \longrightarrow 2Cu + N_2 + 4H_2O \text{(اختزال النحاس)} \quad \text{.....(40-5)}$$

كذلك بإمكان الهيدرايزين اختزال هيدروكسيد الحديديك $Fe(OH)_3$ إلى هيدروكسيد الحديدوز $Fe(OH)_2$: -

$$4Fe(OH)_3 + N_2H_4 \longrightarrow 4Fe(OH)_2 + 4H_2o \quad .....(41\text{-}5)$$

3.1.3.5 التآكل بسبب زيادة الحامضية Corrosion by Acid Attack

بعض الأملاح غير العضوية مثل كلوريد المغنيسيوم وكلوريد الكالسيوم هي عوامل أكاله حيث ان $MgCl_2$ يتحلل بشكل كامل في الماء عند درجة حرارة 200 °C حيث ينتج حامض الهيدروكلوريك وكالاتي: -

$$MgCl_2 + H_2O \longrightarrow Mg(OH)_2 + 2HCl \quad .....(42\text{-}5)$$

حيث عند تكوين حامض الهيدروكلوريك سوف تقل قيمة pH حيث تتعرض أنابيب المرجل عندها إلى المهاجمة بالحامض، هناك اعتبارين تؤثران على شدة هذا النوع من التآكل.

1 - تركيز الملح ألحامضي

2 - الانحراف الذي من الممكن أن يحصل بالمعالجات الكيماوية لماء المرجل ومن الجدير بالذكر إن $CaCl_2$ يحدث به تحلل ولكن بشكل اقل مما هو حاصل عند تحلل $MgCl_2$ بنفس الظروف، حيث انه لا يتحلل من ملح $CaCl_2$ سوى 25% عند درجة حرارة 600 °C.

إن HCl الناتج من تحلل الأملاح في ماء المرجل يتفاعل مع الحديد وحسب الاتي: -

$$Fe + 2HCl \longrightarrow FeCl_2 + H_2 \quad .....(43\text{-}5)$$

$$FeCl_2 + 2H_2O \longrightarrow Fe(OH)_2 + 2HCl \quad \text{.....(44-5)}$$

لهذا حتى الكمية القليلة من ملح $MgCl_2$ فإنها تسبب تآكل شديد للمعدن. إن المعالجة المهمة لهذه الحالة هو زيادة الرقم الهيدروجيني pH والوصول إلى حالة التعادل (Neutralized) عن طريق زيادة قاعدية المحلول بإضافة كمية معينة من مادة قاعدية.

3.2.3.5 التآكل بسبب تكوين خلايا كلفانية Formation of Galvanic Cells

يحدث تآكل بسبب تكوين الخلايا الكلفانية بين الحديد العنصر الأساس في السبيكة المكونة لأنبوب المرجل و أي عنصر آخر في السبيكة وتحدث هذه الحالة خصوصا عند التوصيلات ومواقع الربط لأنابيب المرجل فيما بينها هذه الحالة تقود إلى التآكل التنقري (Pitting Corrosion)، ومن الممكن معالجة هذا النوع من التآكل باستخدام صفائح من الزنك كأنود مضحي (Sacrificial Anodes) عند مواقع الربط.

3.3.3.5 التآكل الهيدروجيني Hydrogen Damage

ينتج الهيدروجين الذري في ماء المرجل بعدة طرق منها عند تحطم الطبقة الحرارية الاوكسيدية حيث يحدث تفاعلات استبدالية عديدة وفي كل مرة يتحرر ايون الحديد والذي يأخذ إلكترون يتحول إلى الحالة الذرية ويتفاعل مع الماء لإنتاج الهيدروجين الذري وكالاتي: -

$$Fe + 4H_2O \longrightarrow Fe_3O_4 + 8H \uparrow \quad \text{.....(45-5)}$$

كذلك ينتج الهيدروجين الذري من تفاعل الحديد مع هيدروكسيد الصوديوم

$$Fe+2NaOH \longrightarrow Na_2FeO_2 + 2H \uparrow \quad .....(46\text{-}5)$$

وينتج الهيدروجين الذري كذلك عندما يكون تركيز الأوكسجين المذاب عالي فان هذه الظروف مشجعة لتحويل ايون الهيدروجين الموجودة في المحلول الى ذرة هيدروجين

$$H^+ + e \longrightarrow H \quad .....(47\text{-}5)$$

تسمى ذره الهيدروجين (بالهيدروجين الطري) حيث في حالة وجود عيوب في صفيح المعدن الفولاذي المستخدم في تصنيع المرجل، تنفذ ذرات الهيدروجين من تلك العيوب إلى داخل التركيب الفولاذي ويرتد لتكوين جزيئات الهيدروجين داخل هذه العيوب مولدا فقاعات تعرف بفقاعات الهيدروجين (Hydrogen Blisters) وكما يمكن ان تتحد جزيئات الهيدروجين المتكونة مع كاربون المعدن مكونة غاز الميثان (CH_4) حيث تعمل تلك الفقاعات الغازية على فقدان قوة الحديد عند هذه الظروف التي يفقد الفولاذ خاصية المرونة التي تسمى بالتقصف الهيدروجيني (Hydrogen Embrittlement) كذلك تحدث تشققات خصوصا عند الحدود البلورية و يحدث الانفجار في ذلك الموقع من انبوب المرجل نتيجة لعدم تحمله للضغوط بسبب هشاشة المعدن.

قد وجد إن السبيكة المكونة لأنبوب المرجل التي تحتوي على شوائب مثل كبريتيد المغنسيوم تكون أكثر عرضة للتآكل الهيدروجيني من السبائك الأخرى، التآكل الهيدروجيني يعتمد على تركيز الهيدروجين في الماء أو البخار

وكذلك تركيز الهيدروجين بالقرب من سطح المعدن ويزداد بازدياد كمية الأوكسجين المذاب في الماء.

3.4.3.5 تأثير ثاني اوكسيد الكاربون المذاب

Effect the Dissolved Carbon Dioxide

ان احتواء ماء المرجل على بيكربونات الكالسيوم فان أثناء التسخين سوف يتحرر غاز ثاني اوكسيد الكاربون المذاب في الماء، حيث ان الغاز سوف يحمل مع البخار وحين يتكثف ذلك البخار فأنه يذوب في الماء المتكثف مكونا حامض الكربونيك (Carbonic Acid) وهذا الحامض يؤدي إلى تآكل موضعي يعرف بالتآكل التنقري.

ممكن أن يزال CO_2 مع الأوكسجين المذابين بالماء بعملية طرد الهواء (Mechanical Deaeration)، وكذلك يمكن إزالة غاز ثاني اوكسيد الكاربون باستخدام حجر الكلس (Lime) حيث يتحول إلى كاربون الكالسيوم وحسب التفاعل التالي

$$CO_2 + CaO \rightarrow CaCo_3 \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (48\text{-}5)$$

كذلك يمكن إزالة CO_2 بمعاملته باستخدام كربونات الكالسيوم وفقا للمعالجات التالية

$$CO_2 + CaCO_3 + H_2O \longrightarrow Ca(HCO_3)_2 \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (49\text{-}5)$$

لكن هذا التفاعل ينتج مركب يؤدي إلى زيادة العسرة في ماء المرجل عند إضافة الامونيا إلى ماء المرجل فان غاز CO_2 المذاب من ذلك المرجل فانة يتفاعل مع الامونيا ويتحول إلى كربونات الامونيوم وحسب المعادلة التالية:

$$CO_2 + 2NH_3 + H_2O \longrightarrow (NH_4)CO_3 \quad \text{.....(50-5)}$$

كل الزيادة في كمية الامونيا المضافة الى الماء المغذي للمرجل فان البخار يحمله الى المكثف حيث يتحول الى الماء واذا صادف وجود الأوكسجين مذاباً فان ذلك الماء المتكثف فان الامونيا تهاجم (Attack) أنابيب المكثفة. لذلك ان الحدود المقبولة لإضافة الامونيا هو (10 mg of NH_3/liter).

3.4.5 التقصف القاعدي Caustic Embrittlement

التقصف القاعدي هو نوع من أنواع التآكل الذي يحدث نتيجة لزيادة هيدروكسيد الصوديوم NaOH في ماء المرجل، إن السمة الأساسية لهذا النوع من التآكل هو تكوينه تشققات غير منتظمة عند الحدود البلورية للحبيبات لمعدن المرجل خصوصا في المواقع التي تحتوي على إجهاد عالي كالبراشيم الرابطة، مواقع الانحناء، ومواقع الربط.

ينتج هيدروكسيد الصوديوم في المرجل العامل بضغوط عالية وذلك بتحلل كربونات الصوديوم وحسب التفاعل الآتي : -

$$Na_2CO_3 + H_2O \longrightarrow 2NaOH + CO_2 \quad \text{.....(51-5)}$$

ان التحلل Na_2CO_3 يزداد بازدياد درجة الحرارة حيث يصل التحلل إلى نسبة 90% ، ان التآكل الحاصل نتيجة التقصف القاعدي يزداد بزيادة تركيز NaOH وزيادة كلا من درجة الحرارة والضغط بتحلل NaOH لتكوين ايون وايون Na^+، يتفاعل ايون الهيدروكسيد مع الحديد وفق المعادلة التالية : -

$$2Fe + 4HO^- \longrightarrow Fe_3O_4 + 4H \quad \text{.....(52-5)}$$

المواقع التي تحتوي على إجهاد في أنابيب المرجل وان الإجهاد قد تجاوز نقطة الخضوع(Yield Point) عندها طبقة الحماية الاوكسيدية تبدأ بالتضخم لذلك تحدث تفاعلات عديدة بين الحديد وكل من الأوكسجين المذاب في الماء والكبريت لتكوين اكاسيد وكبريتات الحديد ، حيث ان Fe_3O_4 المتكونة من هذه التفاعلات بوجود الهيدروجين يحدثان ثقوب على طول الحدود البلورية (Grain Boundaries). لمعالجة هذا النوع من التآكل تضاف الى مواقع للتآكل (Inhibitors) مثل كبريتات الصوديوم أو فوسفات الصوديوم حيث إن هذه المركبات تعيق التقصف القاعدي أما بواسطة عدم تكوين التبلور وسد الثقوب من خلال الملح الصلب المضاف بحيث يمنع تغلغل NaOH إلى تلك الثقوب او ان الملح المضاف يؤدي تكوين المحاليل المنظمة (Buffer Solutions) الذي يمنع حدوث التآكل.

بشكل عام إن تركيز Na_2SO_4 المضاف إلى NaOH يكون حسب الضغط الذي يعمل عنده المرجل وحسب الجدول التالي : -

الجدول رقم (5 -3) يوضح نسبة SO_4:NaOH وحسب الضغط الذي يعمل فيه المرجل

Na_2SO_4 : NaOH	Pressure (atm)
1:1	10
2:1	20
3:1	> 20

لابد من الإشارة إلى الزيادة في الكمية المضافة من Na_2SO_4 تؤدي إلى تكوين $CaSO_4$ والتي تؤدي بدورها إلى تكوين قشرة، تحت هذه الظروف يجب إضافة Na_3PO_4 حيث إن هذا المركب فعال لمنع التقصف القاعدي بنسبة تزيد على (300 مرة) من كفاءة Na_2SO_4.

إن إضافة كمية من اللجنين أو قشور الرمان (الدباغة) إلى ماء المرجل فان المركبات تعمل على غلق الفتحات أو إي تشققات على السطح الداخلي لأنبوب المرجل وبذلك تمنع من اختراقها من قبل NaOH.

3.1.4.6 الشقوق الناتجة من التآكل الإجهادي

Stress Corrosion Cracking (SCC)

تآكل الشق الاجهادي هو تآكل موضعي يظهر بشك شق بسيط على سطح المعدن ثم يتحول إلى شق عميق يؤدي إلى كسر للتركيب المعدني ويكون باقي السطح خالي من التآكل، يحدث هذا النوع من التآكل في جميع المعادن تقريبا بسبب الإجهادات الميكانيكية والحرارية المسلطة على سطح المعدن أو بأسباب هشاشة المعدن و فقدانه صفة الليونة بسبب تأثيرات الهيدروجين أو سبب تأثيرات المحيط على المعدن.

التآكل الإجهادي يصيب الفولاذ المكون للأنابيب عند درجة الحرارة العالية أي عند الدرجات الحرارية التي سيعمل بها المرجل ويسمى أيضا بالهشاشة القلوية (Caustic Embrittlement) حيث يؤثر محلول هيدروكسيد الصوديوم في جعل المعدن أكثر هشاشة وبالتالي تكسره، كذلك وجد إن أي محيط يسبب أو

يحفز التآكل ما بين الحبيبات قد يكون سببا إضافيا في إحداث التشققات الناتجة من التآكل الإجهادي.

إن أهم العوامل المؤثرة على التآكل لإجهادي هي درجة الحرارة وعلى خواص المحيط الآكل وتركيب المعدن المعرض للتآكل وكذلك على مقدار الإجهاد المسلط والفترة الزمنية للتسليط وكما يؤثر الشكل البلوري للمعدن على هذا النوع من التآكل، الإجهادات التي تسبب الكسر قد تكون اجهادات ميكانيكية مسلطة، أو متبقية على سطح المعدن نتيجة أعمال ميكانيكية سابقة أو حرارية فقد لوحظ وجود إمكانيات كبيرة لحصول هذا التآكل في مناطق اللحام مع عدم وجود تسلط للجهد.

إن أهم الطرق المتبعة للتقليل من هذا النوع من التآكل: -

1 - إزالة جميع الإجهادات المتبقية (Residual Stress) أثناء عمليات التصنيع لأنابيب المرجل البخاري.

2 - اختيار السبائك المناسبة التي تمتلك القابلية على مقاومة هذا النوع من التآكل.

3 - إجراء عمليات الغسيل الكيماوي بالشكل الصحيح.

4 - القيام بعمليات الفحوصات الدورية في الأوقات المناسبة.

5 - السيطرة على المضافات الكيماوية لماء المرجل أثناء علمية التشغيل.

6 - تقليل فعالية المحيط المسبب لهذا النوع من التآكل بإزالة المواد المحفزة من المحيط مثل إزالة الغازات (Degasification) أو إزالة الأبخرة من المناطق الميتة.

3.2.4.6 تآكل الكلال Corrosion Fatigue

عندما تتعرض المعادن لجهود متكررة ومتقطعة تصاب هذه المعادن بكلال، والكلال هو ميل المعدن للانكسار بسبب دورة الإجهادات هذه حيث يفقد مرونته، وان دورة الإجهادات المتكررة يقصد بها تسليط جهد على المعدن اقل من نقطة الخضوع (Yield Point) ثمر رفعة ثم يسلط مره أخرى وهكذا وان فقدان المرونة يحصل بسبب التركيب غير المتجانس للسبائك أو عندما تكون هشة أو صفاتها تشبه صفات السبائك الهشة.

إن دورة الاجهادات تسبب انزلاق طبيعي داخل تركيب السبيكة مما يؤدي إلى تجمع الفجوات وتزيد من هشاشة السبيكة، تبدأ عملية الانكسار المصاحب للكلال بتشققات في تركيب المعدن ومعظم التشققات تنشأ نتيجة لوجود عيوب في السبيكة التي تعتبر مركز تجمع الجهود وقد تنشأ التشققات في مناطق ضعيفة مثل الثقوب والحواف الحادة أو أخطاء في اللحام والتركيب وبعد ذلك تنمو هذه التشققات إلى أن تصبح مرئية بحيث يضعف المعدن وتقل مرونته ويحصل الانكسار.

وان من الطرق المهمة للوقاية من هذا النوع من التآكل هو زيادة قوة الشد (Tensile Strength) للسبيكة حيث إن السبائك ذات قوة الشد العالية مقاومة لحدوث الانكسارات الدقيقة ولكن حال حصولها فيها فان نموها يكون سريعاً مقارنة بالمعادن ذات الشد الضعيف، كذلك يمكن التقليل من تآكل الكلال بتقليل الجهود المسلطة أو المتبقية في السبيكة إما برفع الإجهادات (Stress Relief) أو بتغير التصاميم التنفيذية للسبيكة أو بتعريض السطح للطرق بمطرقة

كروية وبذلك ندخل جهود الضغط (Compressive Stresses) المفيدة، أن استعمال المثبطات (Inhibitors) يعتبر جيداً للتقليل من هذا التآكل.

5.4 معادن المراجل البخارية Metals of Steam Boilers

الفولاذ الكربوني (carbon Steel)والفولاذ السبائكي(Stainless Steel) هما يشكلان العمود الفقري للمعادن الداخلة في صناعة المرجل البخاري، حيث يحتوي الفولاذ السبائكي على عناصر السبك المعروفة كالنيكل (Nickel)، الكروم(Chromium)، المولبيديوم(Molybdenum)، الفناديوم (Vanadium)، المغنسيوم(Magnesium)، التنكستن (Tungsten)....الخ، لكن من حيث الكلفة الاقتصادية فأن اغلب عناصر السبك غالية الثمن ولكن اضافتها للسبيكة حتى وان كانت تلك الاضافة بنسب قليلة تساهم في اعطاء مواصفات ميكانيكية وفيزيائية ومقاومة للتآكل حيث لايمكن الحصول عليها في الفولاذ الكربوني.

الفولاذ الكربوني(Carbon Steel) يستعمل في اجزاء المرجل البخاري التي تتعرض لدرجات حرارة قليلة نوعا ما اي اقل من $450\ C^0$ ، ان عمليات التشكيل والدرفلة واللحام للفولاذ الكربوني الداخل في صناعة المراجل البخارية تتطلب ان يكون ذلك الفولاذ ذات مواصفات جيدة من حيث المقاومة الميكانيكية. ان البنية المجهرية Microstructure لفولاذ المراجل البخارية هي الفرايت (Ferrite) بينما تمركز عامل التصليد البرلايت (Perlite) تكون منخفضة.

ان صفائح الفولاذ ذات المحتوى الكربوني العالي (0.25% – 0.15) تكون ذات خواص ميكانيكية وخواص لحام جيدة. اما الفولاذ ذات المحتوى القليل من عناصر السبك كالمنغنيز والتيتانيوم فأن خواص الفولاذ بشكل عام تتحسن بشكل كبير.

الفولاذ السبائكي (Stainless Steel)(واطئ السبائكية – البرلايتي) الذي يحتوي على عناصر سبك تتراوح ما بين (5% – 4)، ان هذا النوع من الفولاذ يستعمل في عمل اجزاء المرجل التي تعمل في ظروف من الضغط ودرجة الحرارة العاليتين مثل انابيب المحمصات (Superheated Tube) والموصلات وخطوط البخار.

ان الفولاذ واطئ السبائكية يقاوم الزحف لغاية درجات حرارية اقصاها 580^0C ان لم تكن هناك ضرورة لمقاومة التقشر (Scale) ويدعى هذا النوع كذلك فولاذ مقاوم للحرارة او فولاذ الحرارة العالية، اما الفولاذ المقاوم للزحف (Creep) في درجات حرارة اعلى من $580\ ^0C$ وله مقاومة عالية للتقشر فانه يدعى فولاذ الحراريات (Refractory Steel).

ان عناصر السبك الاساسية هي الكروم Cr، السيليكون Si، المولبيديوم Mo والالمنيوم Al، ان المولبيديوم يذوب في الفرايت ويزيد من الخواص الميكانيكية وكذلك مقاومة الزحف، الكروم والسيليكون والالمنيوم تزيد من مقاومة التقشر لانها تمتلك الفه عالية للاتحاد مع الاوكسجين O_2 لتكوين اكاسيد حرارية Cr_2O_2، SiO_2، Al_2O_3 حيث تكون ذات معاملات تمدد قريبة

جدا من الفولاذ وكذلك تكون تلك الاكاسيد طبقة حماية واقية تعمل على حماية الفولاذ.

ان الفولاذ واطئ السبك ذات المحتوى 0.1% كروم و 0.5%من المولبيديوم وكذلك النوع الذي يحتوي على 0.5%كروم و 0.5% من المولبيديوم فان النوعين المذكورين انفا لهما قابلية لحام جيدة وكذلك مقاومة جيدة للزحف والكرفتة. ان اضافة نسبة من الفناديوم بحدود (0.3% – 0.2) الذي يعتبر من العناصر القوية المكونة للكاربيدات، فان اضافته بتلك النسب للفولاذ السبائكي يجعل الفولاذ يكتسب مقاومة عالية للزحف ويستطيع هذا النوع من الفولاذ الاشتغال في درجات حرارية تتراوح ($570^{0}C$ – 565) اما اذا اريد الحصول على مقاومة تقشر عالية فانه يتم اضافة الكروم بنسبة (2%) والسيليكون بنسبة (0.7% – 0.4).

الفولاذ السبائكي (Stainless Steel) عالي السبائكية، او مايسمى بالفولاذ الاوستنايتي (Austenite) عالي السبائكية، يستخدم هذا النوع من الفولاذ في المحمصات لغاية درجات حرارة ($650^{0}C$ – 600). ان بنية هذا الفولاذ يكون اساسا بواسطة الاوستنايت عالي السبائكية الذي يحتوي على النيكل – الكروم او نيكل – كروم – منغنيز، ان نسبة محتوى الفولاذ عالي السبائكية من عناصر السبك قد تصل الى اكثر من 30%، لكن كلفة هذا النوع عالية مقارنة ببقية انواع الفولاذ، يضاف التيتانيوم والنابيوم بنسبة قد تصل الى 2% حيث تعمل هذه الاضافة على استقرار الفولاذ الاوستنايتي وذلك لمنع حدوث استنزاف عنصر الكروم من الحدود البلورية حيث ان الالفة الالكترونية للتيتانيوم او النابيوم للتفاعل مع الكاربون اعلى من تفاعل الكروم مع الكاربون

لهذا يتم تكون كاربيدات التيتانيوم او النابيوم بدلا من كاربيدات الكروم. لكن من عيوب الفولاذ الاوستنايتي عالي السبائكية انه يتاثر بالإجهادات نتيجة الضغط ودرجة الحرارة العاليتين حيث تحدث تشققات في المعدن وخصوصا في مناطق اللحام وان من الممكن تطوير هذا النوع من الفولاذ بعدم اضافة النيكل الذي هو سبب اساس في الكلفة العالية وازالة عيوب الفولاذ الاوستنايتي بتطوير الفولاذ الذي لايحتوي على نيكل بإضافة عناصر سبك كالكروم (1.3% – 1) و المولبيديوم والتنكستن والفناديوم وهذه السبيكة لها مقا ومة حرارية عالية وان البنية المجهرية للفولاذ الذي يحتوي هذه العناصر هي مارتنسايت (Martensite) واطئ الكاربون او مارتنسايت – فرايت والذي يحدد اسم وصنف الفولاذ. الجدول رقم (5 – 1) يوضح خواص المعادن المستخدمة في المراجل البخارية.

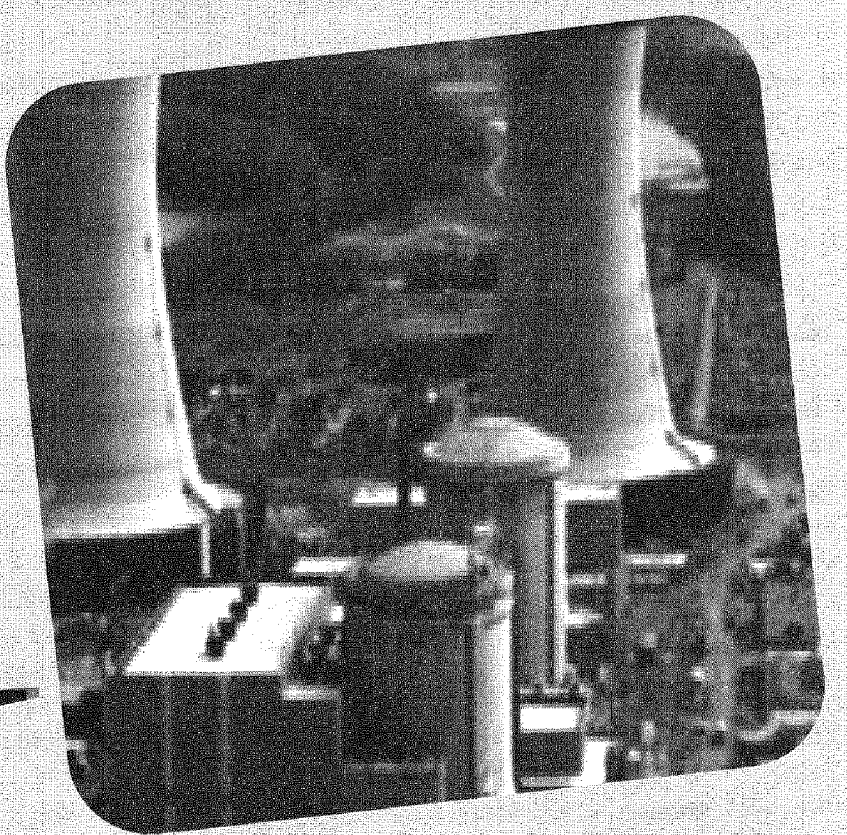
جدول رقم (5 -1) يوضح خواص وتطبيقات المعادن المستخدمة في المراجل البخارية

الصنف	الخواص الميكانيكية في درجة حرارة الغرفة				عناصر السبل	التطبيقات
	متانة الصدم KN/m	الاستطالة ٪	مقاوم الخضوع MPa	المقاومة القصوى MPa		
15k	685	25	215	352	-	في الاسطوانات اقل من 6MPa
20k	590	23	245	402	-	450 ^{0}c
22k	835	22	245	500	-	في الاسطوانات 6-12.5 MPa
10k	-	31	205	335	-	في الانابيب درجة حرارة السائل 450^{0}C
20k	490	24	205	402	-	درجة حرارة سطح الانبوب 420- 500
16GNMA	685	16	335	500	Mn=0.8-1.1 Mo=0.4-0.5	الجزء العلوي من المرجل لغاية ضغط 14-18.5MPa
15GS	490	16	343	470	Mn=0.9-1.3 Si= 0.7-1.0	انابيب المرجل لغاية ضغط 38MPa وحرارة 450^{0}C

الصنف	الخواص الميكانيكية في درجة حرارة الغرفة				عناصر السبل	التطبيقات
	متانة الصدم KN/m	الاستطالة ٪	مقاوم الخضوع MPa	المقاومة القصوى MPa		
12MKh	685	22	205	412	Cr=0.4-0.6 Mo=0.4-0.6	الموزعات العلوية وانابيب المرجل
15KhM	590	21	215	430	Cr=0.8-1.1 Mo=0.4-0.6	
12Kh1mf	590	21	215	440	Cr=0.9-1.2 Mo=0.15-0.35 V=0.15-0.3	انابيب المرجل درجة حرارة المائع 580^0C
15kh1M1F	490	16	343	577	Cr=1.1-1.4 Mo=0.9-1.2 V=0.2-0.3	المحمصات درجة حرارة اعلى من 580^0C
12kh2MFE	-	30	-	392	Cr=2.1-2.6 Mo=0.5-0.7 V=0.2-0.35 Nb=0.5-0.8	المحمصات درجة حرارة اعلى من 560^0C

الفصل السادس

تأكل انابيب المراجل البخارية



6

الفصل السادس

تآكل انابيب المراجل البخارية

تآكل في جانب النار Fire Side Corrosion

6.1 مقدمة Introduction

عندما يحترق الوقود الهيدروكربوني النقي مع الكمية الستوكيومترية (Stoichiometric) من الأوكسجين فان غرف الاحتراق المصنوعة من السبائك المقاومة لدرجات الحرارة العالية تكون لها مقاومة ضد التآكل وخصوصا عندما تكون درجات الحرارة اقل من 1000 °C ، كذلك التوربينات الغازية التي تعمل على الوقود الغازي تكون مشاكل التآكل جداً قليلة.

على كل حال، ان الوقود كالفحم الحجري(Coal) او متبقي الوقود (Residual Fuel) عندما يستعملان في الاحتراق فان هنالك مشاكل جمة للتآكل سوف تظهر ومن الخطوات المهمة الواجب إتباعها للتقليل من التآكل هو التعرف على ماهية الملوثات الموجودة في الوقود التي تسبب هذا النوع من التآكل.

عند احتراق الوقود الهيدروكربوني، ينتج منها مزيج من غازات الاحتراق التي تطلق الى الجو المحيط وهي تشمل (H_2، H_2O، C، CO، CO_2، O_2، N_2) وفي حالة وجود كمية من الكبريت في الوقود فان غازات الاحتراق الممكن ان تشمل (SO_2، SO_3).

ان الوقود الثقيل Heavy Fuelاو النفط الخام (Crude Oil) يحتويان على نسب معينة من الشوائب المعدنية كالكبريت S والفناديوم V والصوديوم Na تسمى هذه

العناصر بالأساسية (Major Element) وكذلك يوجد عناصر اخرى كالبوتاسيوم والنيكل والحديد .... الخ تسمى بالعناصر الثانوية (Minor Element) . انا الشوائب المعدنية كالكبريت والفناديوم والصوديوم ، تتحول الى اكاسيدها اثناء عملية الانزلاق وبمراجل لاحقة تتكون كبريتات الصوديوم (Na_2SO_4) وهذه المركبات تتسرب على سطح السبائك المعدنية مكونة نوع من انواع التعرية يعرف بالتأكل الحار Hot Corrosion او ما يسمى بالتأكل بدرجات الحرارة العالية (High Temperature Corrosion) ، حيث ظهر هذا من التأكل قبل 70 عام.

التأكل الحار يحصل على المدى الحراري (760 -1000 °C) ويمكن ملاحظة حدوثه في المراجل البخارية (Boilers) ، مدائن الديزل (Diesel Engine)، مكائن الاحتراق الداخلي (Internal Combustion) (Engine) التوربينات الغازية Gas (Turbine) . ان شده التأكل الحار في عميات الاحتراق تتأثر بنوع الوقود ونقاوته وكذلك بدرجه حراره الهواء الضرورية لعملية الاحتراق، ان العمر التشغيلي لغرف الاحتراق يتحدد بمقاومه اجزاء تلك المعدة للتأكل الحار اكثر من اعتماده على العوامل الاخرى ، ان اكثر السبائك الخاصة (Super Alloy) القابلة للتعرض الى هذا النوع من التأكل اذ ان طبقة الحماية الأوكسيد ستصبح مسامية (Porous)، التصاقها غير جيد (Non Adherent) وبذلك تكون غير واقية (Non Protective) .

2.6 الأكسدة Oxidation

ان ميكانيكية الاكسدة لمختلف المعادن والسبائك درست من اعداد كبيرة من الباحثين، ان السبائك التي لها مقاومة لدرجات الحرارة العالية والتي تكون اساس

من النيوبيوم (Niobium)، تانتاليوم (Tantaum)، التكستن (Tungsten) والمولبيديوم (Molybdenum) لكنها في الوقت ذاته تظهر مقاومة واطئة للاكسدة في الدرجات الحرارية حيث تشكل طبقة او كسيدية واقية اساسها أحد عناصر السبائك ذات الألفة الالكترونية العالية مع الأوكسجين. من جهة أخرى السبائك ذات الاساس نيكل وحديد في ظروف الاكسدة تحصل فيها اجهادات عديدة لكنها بشكل عام عندما يضاف اليها الكروم وأحيانا الألمنيوم لكي يقلل من اوكسيد (Cr_2O_3) حيث ان السبائك ذات الاساس حديد، نيكل والمضاف اليها الكروم بنسبة 20٪ تكون مقاومة للأكسدة في درجات الحرارة الأكثر من ^{o}C 1000.

السبائك ذات الاساس مولبيديوم Molybdenum التي تحتوي على الفولاذ المقاوم للصداء يحدث فيها أكسدة شديدة وذلك بسبب تكون اوكسيد المولبيديوم المتطاير اليها الفناديوم (Vanadium) كسبائك المقساة Hardened ذات الاساس نيكل، كروم، كوبلت، يحدث على سطحها هجوم كبيرة على طبقة الحماية الاوكسيدية وذلك بتأثير الفناديوم.

حيث كلما ازدادت نسبة الفناديوم المضافة ازداد الهجوم على السطح والجدول رقم (6 -3) يوضح ذلك.

جدول (6 -3) يوضح مقاومة الأكسدة للسبائك ذات الاساس نيكل -كوبلت

Vanadium Addition %	Weight gain after 100 hour Oxidation at 900 °C mg/cm^2
0	0.35
0.53	1.8
1. 06	3.3
2.03	5.75
2.97	3.1
3.82	6.3

من خلال ملاحظة الناتج في الجدول أعلاه نلاحظ إن إضافة الفناديوم. بشكل هجوم (Attack)شديد وهذا يعني فقدان في الوزن جزء من المساحة التي حصل فيها الهجوم من قبل الفناديوم.

تأثير الإجهاد (Stress) على القشرة الاوكسيدية خلال النمو من المهم جدا تحديدها وذلك لتقيم العمر التشغيلي للسبائك وذلك لان الاجهاد يؤثر على مدى تماسك (تلاصق) القشرة على السطح وكذلك مقاومة التشققات.

3.6 التآكل الحار Hot Corrosion

التأكل الحار او ما يسمى التآكل بدرجات الحرارة العالية High (Temperatures Corrosion) يحدث بدرجات حرارية تتراوح ما بين 1000 °C - 600 واليه حدوث هذا النوع من التأكل بسبب وجود شوائب فلزيه اساسيه في وقود الاحتراق كالكبريت S والفناديوم V والصوديوم Na وشوائب ثانويه كالبوتاسيوم K والنيكل Ni والحديد Fe .....الخ

3.1.6 التآكل بواسطة المركبات الكبريتية Corrosion by Sulphates

يكون عنصر الكبريت من أكثر العناصر المكونة للنفط الخام غير المرغوب فيها حيث تختلف نسبة تواجده في النفط حسب طبيعة المكمن النفطي وان المقياس العالمي الذي يحدد فية نسبة الكبريت في الوقود تشير الى عدم تجاوز نسبة الكبريت في الوقود الخام 5%، لكن هذه النسبة ممكن ان يتم تجاوزها كما في حقول الكيارة في العراق فان محتوى الكبريت في النفط الخام المنتج من تلك الحقول قد يصل الى 7% وهو بهذا يعتبر من أسوء النفط

العالمية من احتوائه على هذه النسبة من الكبريت. ومن الجدي بالذكر فان محتوى متبقي الوقود (Residual Fuel)من الكبريت يعتمد بالدرجة الاساس على محتوى متبقي النفط الخام الناتج حيث تشير تقنية تقطير الوقود ان نسبة محتوى الكبريت من متبقي الوقود تصل الى الضعف مقارنة بنسبة الكبريت الموجود اصلا في النفط الخام الناتج من خلال عملية التقطير متبقي الوقود.

ان وجود عنصر الكبريت في الوقود المحترق في غرف احتراق المراجل او ريش التوربينات الغازية يؤدي الى حدوث أكثر من مشكلة في أكثر من موقع من مكونات المرجل، حيث ان وجود الكبريت في غازات الاحتراق (Exhaust Gas) يمكن ان يمر بثلاث مراحل تفاعلية.

1 - اثناء احتراق الوقود.

$$S + O_2 \longrightarrow SO_4 \ldots\ldots\ldots\ldots (1-6)$$

2 - اثناء تبريد غازات الاحتراق الخارجة من خلال المدخنة (Chimney) بمعدل درجات حرارة (^{o}200-560 C)

$$SO_2 + O_2 \longrightarrow 2SO_3 \ldots\ldots\ldots\ldots (2-6)$$

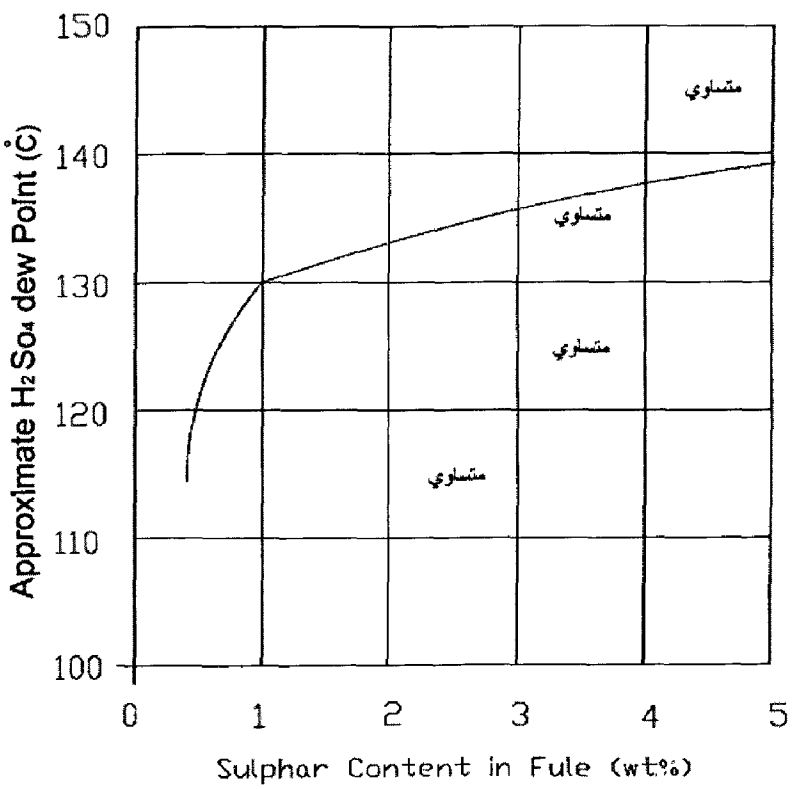
هنا لابد ان نشير الى انه من أخطر المشاكل هو تحول ثاني اوكسيد الكبريت الى ثالث اوكسيد الكبريت علما ان اقصى نسبة ممكن ان يتحول من خلالها SO2 الى SO3 (٪ 2 -1) وكلما كانت نسبة تحويل SO2الى SO3 تقترب من ٪ 1 كان ذلك جيدا من حيث السيطرة على معدلات التآكل لان طبيعة الحال ان SO3 يتحول الى H2SO4 من خلال تفاعله مع بخار الماء ويمكن تقليل تحويل SO2 الى SO3 وذلك من خلال السيطرة على كمية الهواء الزائد (Excess Air) وهذا يكون تحصيل حاصل من خلال خبرة التقني القائم بعملية التشغيل.

3 - التفاعل مع الماء

$$SO_3 + H_2O \longrightarrow H_2SO_4 \ldots\ldots\ldots\ldots (3-6)$$

ان حامض الكبريتيك المتكون يكون على شكل بخار حيث يتكثف على سطح التسخين الموجود ضمن مجرى غازات الاحتراق، عند انخفاض درجة حرارة الغازات الى درجة معينة، مما يؤدي الى تعرضاها للتآكل بشكل كبير.

تسمى درجة حرارة الغازات التي تحدث عندها عملية تكثيف ابخرة حامض الكبريتيك بنقطة الندى (Dew Point) ترتبط قيمة درجة حرارة نقطة الندى بعوامل عدة من اهمها نسبة الكبريت في الوقود، حيث كلما ازدادت نسبة الكبريت في الوقود كلما ارتفعت درجة حرارة نقطة الندى كما في الشكل (6 -1).



الشكل رقم (6 -1) يوضح درجة حرارة نقطة الندى للكبريت

من اجل ضمان عدم حدوث عملية تكاثر ابخرة حامض الكبريتيك اثناء مرورها في مدخنة المرجل، يجب ان تخرج غازات الاحتراق بدرجة حرارية اعلى من نقطة الندى لحامض الكبريتيك، وهنا تحدث خسارة في الطاقة لكن يتم من خلالها المحافظة على اجزاء المرجل من التآكل.

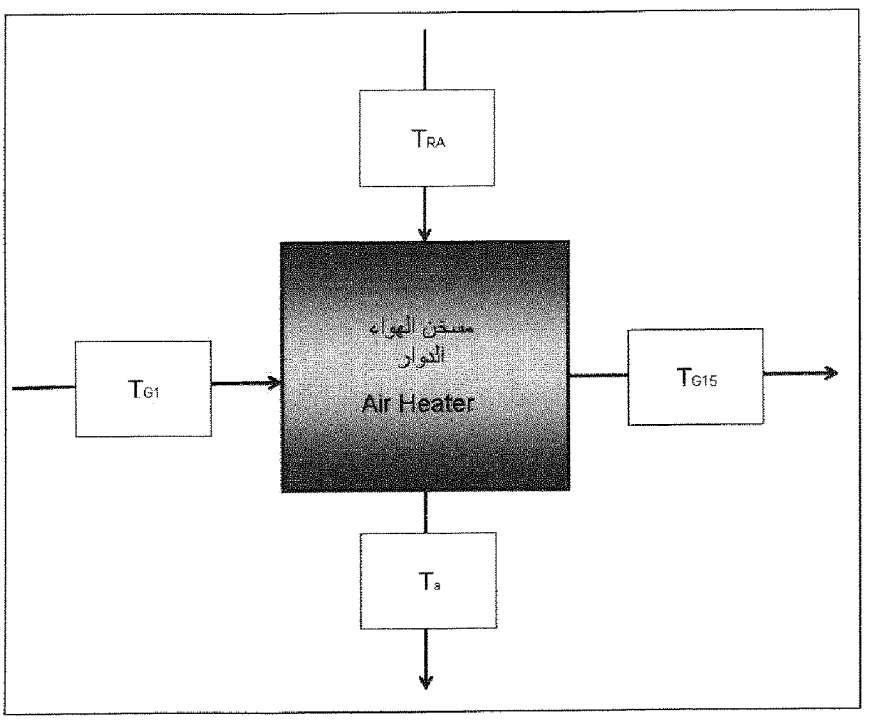
تبين من خلال التجارب العلمية ان درجة حرارة غازات الاحتراق (عند استخدام الغازات في تسخين الهواء الداخل الى المرجل) ترتبط بنسبة الكبريت في الوقود من خلال العلاقة الرياضية التالية:

$$T_{G15} = 1957 \text{ In } (S) + 13292 \ldots\ldots\ldots\ldots (4-6)$$

حيث ان

T_{G15} = درجة حرارة غازات الاحتراق الخارجة (C^o)

في هذه الحالة سوف تحسب قيمة الضياعات الحرارية مع الغازات العادمة بالاعتماد على التوازن الحراري كما مبين في الشكل (6 -2) ادناه



الشكل رقم (6 -2) قيمة الضياعات الحرارية مع الغازات العادمة

حيث يمكن حساب الطاقة الحرارية مأخوذة من الغازات من خلال المعادلات

$$Qg = \frac{Qa}{\eta AH} \quad \text{.....(5–6)}$$

$$Q_g = C_{PG} \cdot W_G (T_{G1} - T_{G15}) \quad \text{.....(6–6)}$$

$$Q_a = C_a \cdot W_A (T^1_a - T_{RA}) \quad \text{...(7–6)}$$

وبالتالي فان درجة حرارة الهواء الداخلة الى المسخن الحراري تسخن من خلال العلاقة التالية

$$T_{RA} = T^1a - [C_{PG} \cdot W_G (T_{G1} - T_{G15}) \cdot \frac{\eta_{AH}}{C_a \cdot W_A}] \quad \text{.....(8–6)}$$

حيث ان

T_{RA} : - درجة حرارة الهواء الداخلة على مسخن الهواء الدوار الخارجة من مسخن الهواء البخاري (°C)

T_{G1} : - درجة حرارة الغازات الداخلة على الهواء الدوار (°C)

T^1_a : - درجة حرارة الهواء الخارج من مسخن الهواء الدوار(°C)

Q_g : - الطاقة الحرارية المأخوذة من الغازات (kw)

η_{AH} : -المردود الحراري لمسخن الهواء الدوار (٪)

Q_a : - الطاقة لحرارية المعطاة الى الهواء المار خلال مسخن الهواء البخاري (kw)

W_A : - التدفق النوعي للهواء وهو عبارة عن كمية الهواء الحقيقية الداخلة الى المرجل لكل واحد كيلو غرام من الوقود. (kg/kg).

W_G: - كمية الغازات العادمة الناتجة عن احتراق واحد كيلو غرام من الوقود (kg/kg)

C_{PG}: - السعة الحرارية للغازات العادمة (KCal/kg C°)

ان وجود شوائب معدنية كالبوتاسيوم والصوديوم مع غازات الاحتراق الحاوية على الكبريت او أكاسيده (SO_2,SO_3)، يؤدي الى تآكل في انابيب المرجل البخاري المواجهة للهب الحاوي على تلك الشوائب حيث تتكون الكبريتات الحرارية المركب (Pgrosul Sulphates) NaS_2O_7 و $K_2S_2O_7$. حيث ان هذا المركب يحصل من تفاعل كبريتات الصوديوم او البوتاسيوم مع ثالث اوكسيد الكبريت بوجود اوكسيد الحديدوز كعامل مساعد.

$$Na_2 + ½O \longrightarrow Na_2O \ldots\ldots\ldots (9\text{-}6)$$

$$So_2 + ½O_2 \xrightarrow{Fe_2O_3} SO_3 \ldots\ldots\ldots (10\text{-}6)$$

$$Na_2O + SO_3 \longrightarrow Na_2SO_4 \ldots\ldots\ldots (11\text{-}6)$$

$$Na_2SO_4 + SO_3 \longrightarrow Na_2SO_{7\,(liquid)} \ldots\ldots\ldots (12\text{-}6)$$

$$3Na_2S_2O_7 + (liquid) + Fe_2O_3 \longrightarrow 2Na_3\,Fe(SO_4)_3 \ldots\ldots\ldots (13\text{-}6)$$

نفس التفاعلات تحدث بالنسبة للبوتاسيوم حيث يتكون المركب 2K3Fe(SO4)3. ان تحول كبريتات الصوديوم والبوتاسيوم الى كبريتات حرارية تتم بالدرجات الحرارية (370- 480 C°) وان اقصى درجة حرارية لهذا النوع من التأكل يعتمد على اقصى درجة حرارية لاستقراريه الاطوار وهذا يعتمد بدوره على تركيز (SO3). المركبات 2Na3 Fe(SO4)3 و 2K3Fe(SO4)3 تتصهر بدرجة حرارة 395C°

بالنسبة لأملاح الصوديوم 320 °C - 210 بالنسبة لأملاح البوتاسيوم وان هذا يدل على ان وجود أملاح التآكل بواسطة تكوين الطور السائل.

أن تكوين المركبات القاعدية $2Na_3\ Fe(SO_4)_3$ و $2K_3Fe(SO_4)_3$ في الرواسب المنصهرة على سطوح أنابيب المراجل البخارية أيضا درست من قبل الباحث Jackson وان التفاعلات التي توصل اليها الباحث كالاتي : -

$$SO_2 + ½O_2 \xrightarrow{Fe_2O_3} SO_3^- \ldots\ldots\ldots (14\text{-}6)$$

$$2MCl+SO_3+H2O \longrightarrow M_2SO_4 -2HCl \ldots\ldots\ldots (15\text{-}6)$$

$$M_2So_4+Fe_2O_3+3SO_3+1½O_2 \longrightarrow 2M_3Fe(SO_4)_3 \ldots (16\text{-}6)\ 3$$

Where M = Na or K

3.2.6 التآكل بتأثير الفناديوم Corrosion by Vanadium

عند حرق النفط الخام Crude Oil او متبقي الوقود(Residual Fuel) الحاوي على نسبة عالية من الفناديوم هناك ثلاث ميكانيكيات من الممكن ان تظهر وهي كالتالي: -

1 - مركبات الفناديوم من الممكن ان تكون حاملة للأوكسجين.

2 - مركبات الفناديوم تعمل على اذابة طبقة الحرارة الأوكسيدية او القشرة الأوكسيدية.

3 - الفناديوم يدخل في طبقة الحماية الأوكسيدية التي تغطي المعدن من الخارج وتجعلها مسامية وغير متماسكة.

على كل حال تزداد مهاجمة الفناديوم للمعدن مع زيادة درجة الحرارة وزمن التلامس بين المترسبات وسطح المعدن وكمية الفناديوم في الرماد. ان وجود المترسبات في طور المسال (Liquid Phase) يعمل على زيادة مهاجمة المترسبات إلى سطح المعدن لذلك المترسبات مهمة جدا حيث تستقر المنصهرات على السطوح المواجهة للهب بهيئة معجونيه تتكون من مركبات الفناديوم تعمل على تحطيم القشرة (طبقة الحماية الأوكسيدية).

$$\text{Fuel Containing Vanadium} \xrightarrow[[O]]{\text{Combustion}} V_2O_2 \ldots\ldots \quad (17\text{-}6)$$

$$V_2O_2 + \tfrac{1}{2}O_2 \longrightarrow V_2O_3 \quad \ldots\ldots\ldots (18\text{-}6)$$

$$V_2O_3 + \tfrac{1}{2}O_2 \longrightarrow V_2O_4 \ldots\ldots\ldots (19\text{-}6)$$

$$V_2O_4 + \tfrac{1}{2}O_2 \longrightarrow V_2O_5 \ldots\ldots\ldots (20\text{-}6)$$

ان المركب خامس اوكسيد الفناديوم V_2O_5 ينصهر بدرجة حرارة اقل من (700 °C) وان درجة الحرارة في غرف احتراق المراجل البخارية وسطوح ريش التوربين تتراوح (800-900 °C) وعلية فان هذا المركب يكون في حالة المنصهر في غرف احتراق المراجل او التوربين وانه يكون حامضي الصفة ويعمل كمادة سائلة يستقر على السطوح الخارجية لأنابيب المراجل البخارية وريش التوربين الغازية مذيبا للطبقة الواقية على سطح المعدن ومن ثم يعرض المعدن مرة ثانية الى التأكسد لتكوين طبقة واقية مدة اخرى مما يستدعي اخذ ذرات أيونية من السبيكة المكونة للسطوح وهذا يعني استنفاذ لذلك العنصر و بالتالي التقليل في سمك ومقاومته وميكانيكية تلك السطوح مما يؤدي إلى التآكل.

ومن جانب أخر في حالة وجود مركبات الصوديوم والبوتاسيوم كشوائب معدنية حيث تحدث سلسلة من التفاعلات خامس اوكسيد الفناديوم V_2O_5 و اوكسيد الصوديوم Na_2O لتكوين مركب معجوني يسمى صوديوم فنادل فناديت (Sodium Vanadyl Vanadate) ($NaO.V_2O_4.5V_2O_5$) يمتلك هذا المركب درجة انصهار اقل من (675 C^o) وهو يمتلك القدر على مهاجمة السطوح المعدنية لتكوين اكاسيد معدنية وبوجود ثالث اوكسيد الكبريت.

ان قدرة منصهرات الفناديوم على احداث تأكل تعتمد انتشار الاوكسجين خلال السوائل المنصهرة وان اقصى تآكل يحصل عندما يكون المزيج ($5V_2O_5$ & 2% Na_2O).

3.3.6 التآكل الناتج من تأثير الصوديوم والبوتاسيوم

ان وجود الكبريت في الوقود جنبا الى جنب مع البوتاسيوم والصوديوم، يحدث مشاكل تآكليه، حيث ان وجود كميات قليلة من الكبريت والصوديوم كافية لإنتاج كبريتات الصوديوم التي لها درجات انصهار تتراوح من (800-900 ^oC). كبريتات الصوديوم بحالتها النقية لا تسبب تآكل في المعدن ولكن بوجود كمية من الشائب الفلزية كالفناديوم، الرصاص، التنكستن، الموليبدتيوم والكالسيوم تجعل كبريتات الصوديوم ذات طبيعة تآكليه وذلك بإنتاج (Eutectics) ذات درجات انصهار واطئة جدا.

ان التآكل بسبب كبريتات الصوديوم Na_2SO_4 يعرف على انه النوع المحدد حيث ينفذ الى مكونات السبيكة وعلى حدود حبيبات المعدن وهو ايضا يسمى بالنخر ما بين الحبيبات.

حيث يكون حفر بقطر 2 مايكرون وبعمق 5 مايكرون، النخر ما بين الحبيبات (Intergranular Attack) يجعل الاجزاء المعدنية المنخورة ضعيفة ميكانيكيا وعلية فان الانصهار يسبب هذا النوع من التآكل ممكن ان يحدث خلال فترة زمنية قصيرة دون إعطاء سابق إنذار.

4.6 ميكانيكية التاكل الحار Mechanisms of Hot Corrosion

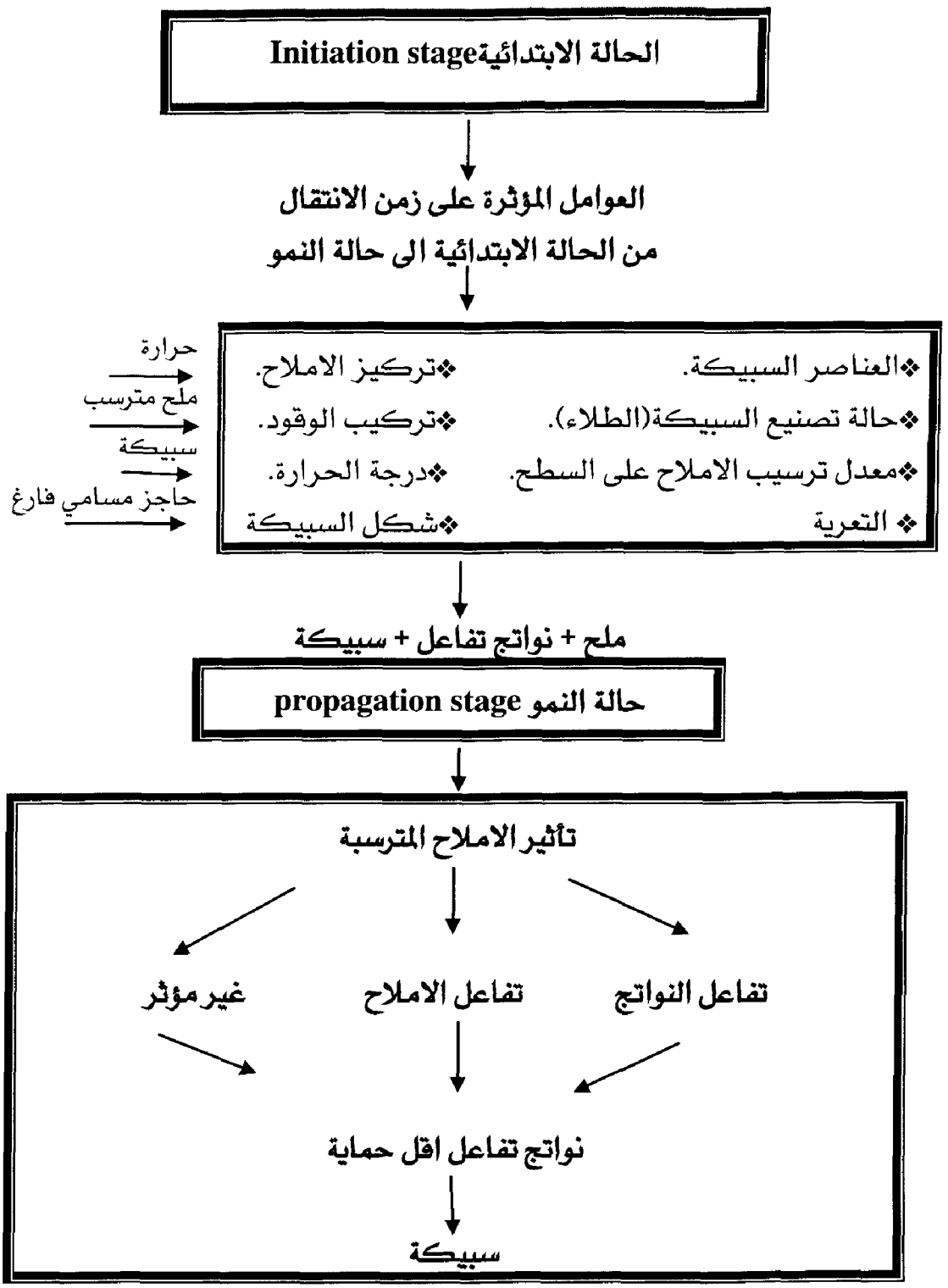
تم دراسة تأثير العناصر المعدنية الموجودة في الوقود، الصوديوم، البوتاسيوم، الفناديوم، الكبريت اثناء عملية الاحتراق وتأثيرها التآكلي على معدات الاحتراق كأنابيب المراجل البخارية، والمداخن للمراجل البخارية وريش التوربينات الغازية ...الخ ولابد من الاشارة ان هذا النوع من التآكل يعرف بالتأكل الحار (Hot Corrosion) وذلك لأنه يحدث اثناء عملية الاحتراق وهذا النوع التآكل بدورة يقسم الى نوعين (Type 1) يعرف بالتأكل في درجات الحرارة العالية (High Temperature Hot Corrosion) (HTHC) ويحدث في المدى الحراري. (825-950 °C)، ان الفحص المجهري للتآكل من (HTHC) يظهر تكوين كبريت تؤثر على طبقة الحماية (الاوكسيدية وتنفذ خلالها بحيث تتفاعل مع عناصر السبيكة المكونة للسبيكة وتجعلها مستنفذة، لذلك ينتج تآكل خارجي متكرر وبعدها يتكون الاوكسيد المعدني وفي كلا الحالتين التفاعل يحدث بين تفاعل استبدالي مرة عناصر السبك مع الكبريت وعنصر السبك مع الاوكسجين الى ان تصبح السبيكة متآكلة.

اما النوع الثاني من التآكل الحار فيسمى بالتأكل الحار بدرجات الحرارة المنخفضة (Hot Corrosion) Low Temperature (LTHC) هذا النوع من التآكل يحدث بدرجات حرارة اقل من نقطة انصهار كبريتات الصوديوم النقية (Na_2SO_4)، نواتج التفاعل لهذا النوع من التآكل يمكن ان تصنف على المهاجمة (Attack) غير المنتظمة، حيث وجود كمية قليليه من الكبريتيد المتكون على الخط الفاصل (Interface) بين السبيكة/القشرة (Alloy/Scale) بحيث يكون استنفاذ عناصر السبك كالكروم او الالمنيوم قليل. ان المدى الحراري الذي يحدث فيه هذا النوع من التآكل يتراوح (650-800 ^{o}C).

ان ميكانيكية التآكل الحار قام بدراستها عدد كبير من الباحثين، ان تأثير الفناديوم التآكل من نوع (HTHC) حيث ان طبقة الحرارية سواء كانت Cr_2O_3 او Al_2O_3 تحصل لها الإذابة الحامضية على عندما الغشاء الملحي يحتوي على الفناديوم وذلك بسبب ان حامض اوكسيد الفناديوم V_2O_5 المتكون نتيجة سلسلة من التفاعلات بين الاوكسجين والفناديوم خلال عملية الاحتراق يعتبر اوكسيد حامضي قوي وهو بشكل مذاب حامضي قوي بوجود الفناديت حيث تساهم بتعجيل النخر بشكل قوي بوجود كبريتات.

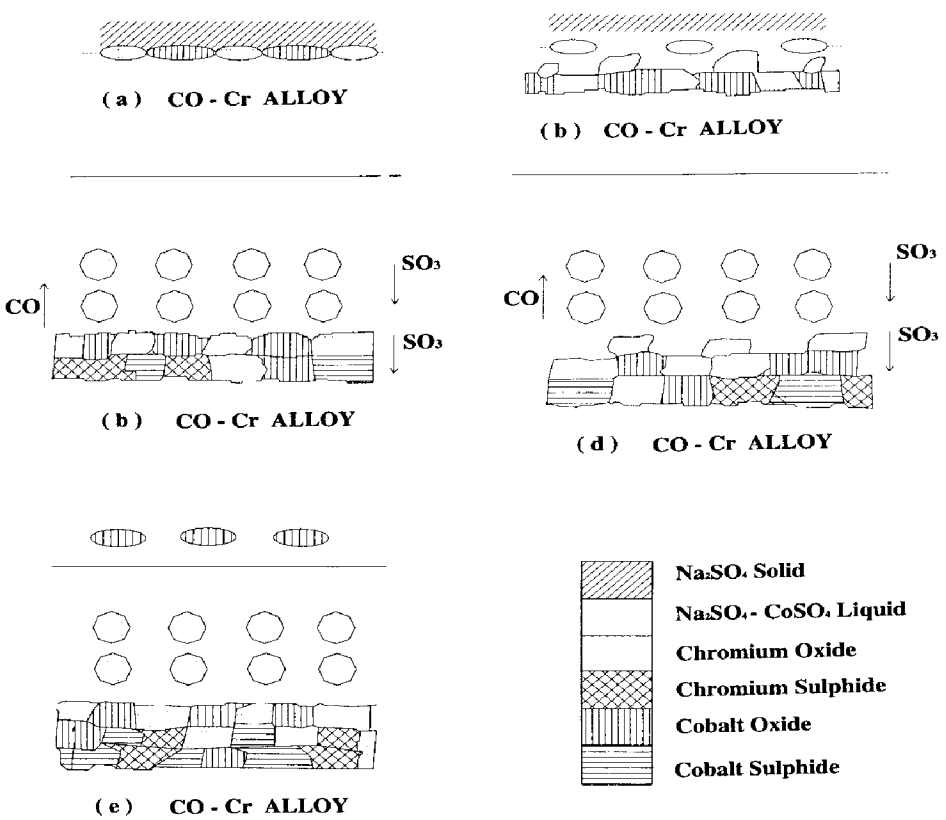
ان المركب الذي يسمى صوديوم فنادل فناديت ($NaO.V_2O_4.5V_2O_5$) الذي يتكون نتيجة لحصول سلسله من التفاعلات التي تنتهي بتكوين المركب خامس أوكسيد الفناديوم (V_2O_5) الذي يتفاعل بدوره مع (Na_2SO_4) لتكوين منصهر يترسب على طول سطح السبيكة على هيئه شبيه بسائل (معجونيه) وان هذا المترسب مع وجود ضغط جزئي من(SO_2/SO_3) يتكون نتيجة الغازات المحترقة سيؤدي الى ذوبان طبقة الحمايه الاوكسيديه ويعيق تكوينها مرة أخرى.

ان الحركية(Kinetic) للتآكل الحار فإنها تقسم الى مرحلتين: تسمى المرحلة الأولى بالمرحلة الابتدائية (Initial Stage) وتحدث عندما يكون التعرض قليلا حيث ان تشبه ما يحصل في عملية الاكسدة(Oxidation) يتكون من خلالها طبقة الحماية الاوكسيدية ، وبمرور الزمن عندما يزداد التعرض لسطح السبيكة من قبل غازات الاحتراق الحاملة للشوائب المعدنية التي تستقر على سطح تلك السبيكة تبدا المرحلة النهائية حيث تتحطم طبقه الحماية الاوكسيدية وتحدث تفاعلات استبداليه تارة الاوكسجين يهاجم سطح السبيكة التي أصبحت فاقدة لطبقتها الواقية ويكون أوكسيد معدني وتارة أخرى يهاجم الكبريت لتكوين كبريتيت معدني عندها يتم استنزاف عناصر السبك من سطح المعدن وهذا فان عملية التأكل ستدخل في المرحلة الثانية، فاذا السطح المعدني عبارة عن سبيكة ذات أساس نيكل ونسبة من الكروم عالية ومعرض الى نواتج احتراق كالوقود الثقيل (Heavy Fuel) الذي يحتوي على نسبة الكبريت مع كميات من الاملاح والتي ممكن ان تكون متواجدة مع هواء الاحتراق .تكون في المرحلة الأولى طبقة الحماية الاوكسيدية من أوكسيد الكروم (Cr_2O_3) المتكونة بطريقة الاكسدة المختارة وذلك نتيجة الالفة العالية الألفة العالية للأوكسجين للاتحاد مع الكروم. يتفاعل الصوديوم مع أوكسجين الهواء لتكوين اوكسيد (Na_2O) والذي بدوره يتفاعل مع الكبريت الذي يوجد مع الوقود لتكوين كبريتات الصوديوم(Na_2SO_4) .ان الجو التأكسدي (Oxidizing Atmosphere) وكبريتات الصوديوم المترسبة على السطح ستنشأ انحدارا في الجهد الكيميائي (Chemical Potential Gradients) للأوكسجين والكبريت خلال طبقة الاوكسيد وستؤدي الى تكوين قوه دافعه (Driving Force) للنمو المستمر لطبقه الاوكسيد ولانتشار الاوكسجين والكبريت في السبيكة ، ان النمو المستمر لطبقه الاوكسيد سيحصل نضوب الكروم من الطبقات السفلي من السبيكة (Under Laying Alloy) . الشكل (6 -3) يوضح مراحل التآكل الحار والعوامل المؤثرة عليه.



شكل (6 -3) يوضح مراجل التأكل الحار مع المؤثرة عليه

اما التآكل من نوع (LTHC) فان ميكانيكيتة تتم بمرحلتين، ففي بالمرحلة الأولى عند اخذ سبيكة Co,Cr Alloy فانه يكون سائل من الصوديوم – كوبلت – كبريت على السطح، اما في المرحلة الثانية فان يحدث نمو او انتشار يقابله هجرة ثالث اوكسيد الكبريت (SO_3) والكوبلت داخلي وخارجي على التوالي خلال السائل الملحي. لاحظ الشكل (6-3).



الشكل رقم (6 -3) يوضح التفاعلات المتعاقبة من نوع (LTHC)

حيث من الملاحظ من خلال الشكل تحدث تفاعلات متعاقبة لإحداث تآكل من نوع (LTHC) لسبيكة (Co-30% Cr) والمتعرضة من اجواء من O_2-SO_2-SO_3، حيث ان كل سائل Na_2SO_4,$CoSO_4$ Co_3O_4, في حالة الاستقرار. اما

في حالة التركيز العالي من SO_3 حيث يصبح Co_3O_4 غير مستقر في الخط بالفاصل Gas-Salt) Interface)، ايضا تحدث هجرة خارجية للكوبلت حيث يتكون $CoSO_4$ او Co_3O_4.

السيطرة على التاكل الحار Hot Corrosion Control

يمكن السيطرة او التقليل م تأثيرات هذا النوع من التآكل من خلال عدة طرق، منها التقليل من الشوائب المعدنية الموجودة مع الوقود كالصوديوم والبوتاسيوم من خلال غسل الوقود، اضافة مركبات معطلة للتآكل (Inhibitors) او من خلال استخدام سبائك مقاومة لهذا النوع من التآكل.

اولا: السيطرة على البوتاسيوم والصوديوم Control for Sodium and Potassium

من المعروف ان الصوديوم والبوتاسيوم يتواجدان مع النفط الخام بنسب تختلف باختلاف تواجد النفط الخام في الممكن النفطي تتراوح نسبها من (10-100 ppm)، لهذا يمكن ان يتحدان مع الفناديوم مكونة مركبات ذات درجات انصهار واطئة. واكثر من ذلك ممكن للصوديوم والبوتاسيوم ان يتحدان مع الكبريت الموجود في زيت الوقود مكونة كبريتاتهما التي درجة انصهارها ضمن درجة الحرارة التشغيلية لكل من المراجل البخارية والتوربين الغازي مكونة تآكل شديد.

ممكن تخفيض نسبة الصوديوم والبوتاسيوم في الوقود سواء كان النفط الخام (Crude Oil) او متبقي الوقود (Residual Fuel) الى النسبة المقبولة والغير مسببة للتآكل وهي (0.5 ppm) باستخدام اجهزة غسل الوقود. بحيث تقليل نسب وجود كل البوتاسيوم والصوديوم في الوقود من خلال عملية الغسل بالماء لذلك الوقود، حيث تتم

العملية بمزج النفط الخام بالماء ومادة كاسرة للاستحلاب (Emulsifications) بحيث يتم تقليل كل من الصوديوم والبوتاسيوم الى النسبة المقبولة الغير تآكليه (0.5 ppm) اما ذا لم تتمكن عملية الغسيل بتقليل هذه النسبة وبقيت نسبة كل من الصوديوم والبوتاسيوم اكثر(1 ppm) يمكن يعطل تأثيرها بإضافة مادة معطلة تحوي على الكروم Cr. الاجواء البحرية فان المراجل البخارية والتوربينات الغازية القريبة من تلك الاجواء (الملحية) ممكن تزداد نسبة كل الصوديوم والبوتاسيوم من خلال تواجدها مع هواء الاحتراق الذي من الممكن ان يحتوي على نسبة كل الصوديوم والبوتاسيوم يدخلان مع هواء الاحتراق الذي من الممكن ان يحتوي على نسبة من العنصرين اعلاه، لذلك يمكن التقليل منهما من خلال نصب مرشحات للهواء الداخل الى غرف الاحتراق بحيث تصنع خصيصا للتخلص من الاتربة والمواد الحاملة للأملاح.

ثانيا: السيطرة على الفناديوم Control for Vanadium

ان وجود الصوديوم والبوتاسيوم سويا مع الفناديوم يشكلان مركبات ذات درجات انصهار واطئة، لذلك من الممكن معاملة الوقود الحادي على الفناديوم من خلال اضافة المعيقات (Inhibitors) مثل مركبات المغنيسيوم، الالمنيوم وغيرها.

1 - معيقات الفناديوم Vanadium Inhibitors

إن الفكرة من إضافة مركبات المغنيسيوم للتقليل من تأثير الفناديوم أثناء الاحتراق هي فكرة بسيطة ومهمة في ان واحد، حيث ان الغاية من اضافة المغنيسيوم هي لرفع درجة انصهار خامس اوكسيد الفناديوم V2O5 بحيث لا ينصهر ولا ينتج المادة المتميعة المعجونية بدرجات الحرارة التشغيلية لكل من المراجل البخاري والتوربين.

المغنيسيوم المضاف والفناديوم يتفاعلان خلال عملية الاحتراق التي تجري في غرف الاحتراق منتجا فندات المغنيسيوم $Mg_2V_2O_7$ التي تنصهر عادة بدرجات حرارة اعلى من 1000 °C وهي اقل من درجة الحرارة التشغيلية في غرف احتراق المراجل البخارية او وحدات التوربينات الغازية.

$$\text{Fuel Oil Vanadium} \xrightarrow[[O]]{\text{Combustion}} V_2O_5 \text{ [mainly]}..... \quad (21\text{-}6)$$

M.pt (675 °C)

$$V_2O_5 + 3MgO \longrightarrow Mg_3V_2O_8 ..... \quad (22\text{-}6)$$

M.pt (2696 °C) M.pt (1124 °C)

بسبب درجة انصهار المركب الجديد اعلى من حرارة التشغيل فان رماد جاف سوف ينتج، وبما ان الرماد غير قابل للميوعة وعلية لا يساعد على تآكل انابيب المراجل البخارية المستقر عليها ولا يؤثر على طبقة الحرارية الاوكسيدية. اما من جانب اخر فان وجود الكبريت في غازات الاحتراق فانه يحدث تفاعل بين الكبريت والمغنيسيوم يتكون من خلاله كبريتات المغنيسيوم $MgSO_4$ وفنادات المغنسيوم اما بصيغة $Mg_2V_2O_5$ او $Mg_2V_2O_8$ اما الكمية المضافة الزائدة من مركبات المغنسيوم فانه يترسب على شكل MgO

ان مركبات كل من الفناديوم والمغنيسيوم Mg2V2O7 او Mg2V2O8 وكذلك MgO، تستقر هذه المركبات على السطوح الخارجية لأنابيب المراجل البخارية المواجهة للهب بهيئة صلبة غير متماسكة مع السطح لذلك من السهل ازالتها من خلال عملية (Soot Blower) من جانب اخر ان تأثير معيق الفناديوم (Vanadium) (Inhibitor) يتناقص بزيادة نسبة الصوديوم عندما يكون اكثر من (1ppm) وهذا

يؤكد على وجوب معاملة النفط الخام لإزالة الصوديوم والبوتاسيوم إلى المستوى المقبول بحيث يمكن للمعيق ان يقوم بواجهة بصورة مرضية.

2 - المثبط المزدوج (مغنسيوم – سليكون)

Double Inhibitor (Silicon – Magnesium)

المثبطات المزدوجة كالمغنيسيوم والسليكون، تستخدم لتثبيط تأثير التآكل بواسطة الفناديوم والعناصر الاخرى كالرصاص، من الناحية الكيماوية لم يعرف بالضبط طبيعة تأثير السيليكون (Silicon) في تثبيط الفناديوم والرصاص، لكن من الناحية الفيزيائية فانه يجعل ترسبات الرماد في معدات الاحتراق المضاف اليها هذا المثبط اقل صلابة ويمكن تهشيمها. ومن سلبيات المعطل المزدوج (Mg-Si) انتاج رماد عند احتراق الوقود المضاف الية هذا المعطل لهذا لا يستخدم هذا النوع من المثبطات المزدوجة الا في حالات الضرورة القصوى ومن هذه الحالات: -

a- اذا كان الوقود المستخدم يحتوي على الرصاص بالإضافة الى الفناديوم يعتبر المثبط المزدوج [Mg-Si]اكثر فعالية ويعطي حماية اكثر من المثبط الحاوي على مركبات المغنيسيوم فقط.

b- اذا كانت نسبة الصوديوم والبوتاسيوم في الوقود اعلى (1ppm) فان تأثير المثبط الحاوي على مركبات المغنيسيوم ينخفض كثيرا ويكون المثبط المزدوج اكثر كفاءة.

مركبات المغنيسيوم المستخدمة كمثبطات

Magnesium Compound Using as Inhibitors

ان الشركات المصنعة للمراجل البخارية والتوربينات الغازية أخذت في اعتباراتها اضافات مركبات المغنيسيوم كمثبطات (Inhibitor) في حالة استخدام وقود حاوي على الفناديوم، مثلا اوكسيد المغنيسيوم MgO هو مركب غير عضوي يحتوي على نسبة عالية من المغنيسيوم والذي يستخدم على شكل محلول عالق، لهذا المثبط مشاكل فنية كثيرة علاوة على فعالية اقل من مركبات المغنيسيوم العضوية مما يلزم استخدام كميات كبيرة من مادة اوكسيد المغنيسيوم لموازنة احتياج المضاف.

اما مركبات المغنيسيوم غير العضوية الأخرى كالأملاح كبريتات المغنيسيوم الذي يتحد مع الفناديوم مكونا فنادات المغنيسيوم ذات درجة الانصهار العالية لكن من الناحية العملية يجب استخدام ملح ذات نقاوة عالية جدا بحيث لا يؤثر على نسبة الشوائب الذائبة في الوقود المسموح بها مثل البوتاسيوم والصوديوم. ولغرض الحصول على محلول ذي نقاوة عالية يستخدم الماء المقطر لتحضير كبريتات المغنيسيوم وبكميات كبيرة و لتهيئة محلول مخفف لهذا الغرض تستخدم خلاطات ومرشحات واجهزة اخرى لتهيئة مستحلب من محلول كبريتات المغنيسيوم والزيت قبل عملية الاحتراق، كذلك من الممكن ان تتبلور كبريتات المغنيسيوم من المستحلب في ظروف معينة مما يسبب في انسداد في شبكة معدات خزن ونقل الوقود قبل الاحتراق.

ان المساوئ الاساسية عند استخدام كبريتات المغنيسيوم $MgSO_4$كمثبط هو تحرير ثالث اوكسيد الكبريت SO_3اثناء الاحتراق وهذا يتحد بدورة مع بخار الماء مما يكون حامض الكبريتيك الذي يكثف المداخن او المقتصدات ويتحول الى سائل مما يسبب مشاكل تآكليه كبيرة

$$MgSO_4 + V_2O_5 \longrightarrow 2MgO.V_2O_5 + SO_3 \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (23\text{-}6)$$

توصلت الشركات العالمية مثل شركة (Petrolite) المنتجة للإضافات البترولية الى مركبات عضوية تحتوي المغنيسيوم، ولهذه المركبات العضوية حدود للاتحاد مع عنصر المغنيسيوم وكذلك هناك حدود للحصول على منتجات ذات شوائب قليلة من التراكيز العالية في المركبات العضوية الحاوية على المغنيسيوم.

ومن المنتجات التي توصلت اليها الشركات العالمية هو المنتج (K1-16) والذي يفي بمتطلبات مواصفات (General) (28150-) للمضافات الذائبة في الوقود والحاوي على المغنيسيوم.

يمتاز مركب (KI-16) العضوي باحتوائه على نسب ضئيلة جدا من الشوائب التي تجعله يستخدم في الوقود ذات النسب العالية من الفناديوم بدون ادخال عناصر غير مرغوبة بها مثل الصوديوم البوتاسيوم.

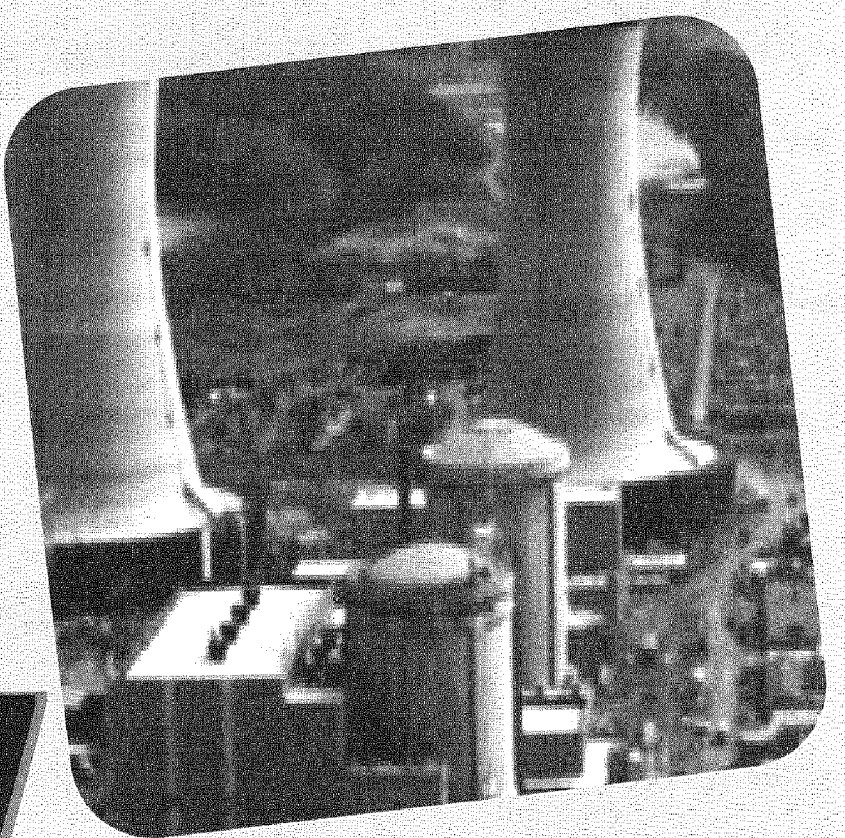
ويمكن القول ان المضافات التي تحتوي المغنسيوم يمكن تحديد استخدامها وفقا لكمية نسب الشوائب في المضاف كمثال تحدد المضافات ذات الشوائب العالية في استخدامها للوقود ذات محتوى الفناديوم الواطئ النسبة لتقليل نسبة التلوث ومن ثم الابتعاد عن المشاكل الجانبية التي يسببها المضاف ذات

النسبة العالية من الشوائب وبالتحديد يمكن استخدام المضافات في هذا النوع من الوقود ذات نسبة الفناديوم التي تتجاوز (25 ppm) .

صنعت الشركات العالمية المنتجة للمضافات البترولية مضاف عضوي يحتوي على المغنيسيوم قد تم تسميته (KI-150) فقد برهن استخدام هذا المثبط بشكل سليم في الوقود الحاوي على نسبة الفناديوم (75 ppm) وهذا المحتوى من الفناديوم يشمل نسبة عالية من النفط الخام.

الفصل السابع

صيانة المراجل



7

الفصل السابع
صيانة المراجل

7-1 المقدمة Introduction

ان من الأهمية بموجب العمل على صيانة المراجل البخارية والتوربينات الغازية بشكل دوري ومنتظم، وذلك لان الصيانة الدورية المنتظمة تعمل على اطاله تلك المعدات وزيادة في مقدار الطاقة الكهربائية المنتجة منها وتوفير في الأموال المصروفة لأغراض الصيانة في هذا الفصل سيتم التطرق الى معالجه الماء قبل وبعد دخوله الى المرجل وكذلك التطرق الى الطرق المستخدمة في التشغيل. اما التوربينات الغازية فسيتم معرفة أنواع وقود الاحتراق وتحسين التصميم في التوربينات الغازية التي تستخدم النفط الخام او الوقود الثقيل.

7-2 معالجة المياه المستخدمة Water Boiler Treatment

الترسبات هي من أخطر المشاكل التي تواجه المراجل حيث تتكون نتيجة وجود الشوائب في الماء المغذي للمرجل ومصطلح الترسيب او الترسبات تشير الى طبقة او طبقات لاصقة مستمرة على السطح الداخلي لسطوح التسخين.

تتكون الترسبات نتيجة تسخين الماء حيث تقل الذوبانية (Solubility) لكل املاح العسرة التي تشمل املاح الكالسيوم واملاح الصوديوم واملاح المغنيسيوم، وبزيادة درجة الحرارة للماء وباستمرار التسخين وزيادة الضغط فان هذه الاملاح والمواد الشائبة تترسب على السطح الداخلي للأنابيب، وفي بعض

الاحيان نتيجة التدوير المستمر للماء في المرجل التي تؤدي الى زيادة تركيز الشوائب وان أي نقصان في طبقة الماء الموجودة على السطوح الداخلية لبعض الانابيب ذات التسخين العالي يؤدي الى حدوث ترسبات على هذه السطوح.

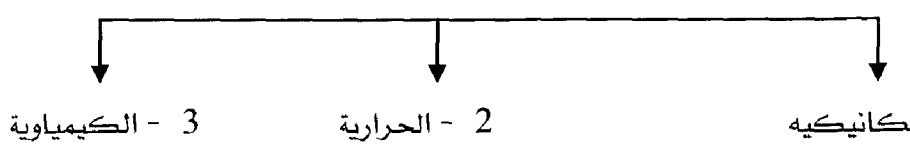
تعمل الترسبات كطبقة عازلة بين سطوح التسخين والمائع (ماء او بخار) وتكمن خطورة الترسبات في موصليتها الواطئة للحراة وتعمل الترسبات على منع انتقال الحرارة الى مائع التشغيل.

وكلما زادت الترسبات يزداد سمكها وسمكها يحدد قيمة المقاومة الحرارية التي تبديها لانتقال الحرارة وكلما زادت درجة الحرارة يؤدي الى حدوث ترقق في جدران الانابيب المواجهة لغازات الاحتراق وقد يؤدي في النهاية الى الفشل لذلك وجب معالجة المياه لمنع حدوث الترسبات في المراجل.

الماء المغذي للمرجل قبل دخوله يتم علية بعض الإجراءات لان نوعية المياه المستخدمة في المراجل عاملا حرجا في عملية تشغيل وحدات محطات القدرة الكهربائية. معالجة المياه قسم منها تجري بمرحلتين: -

1. المعالجة الخارجية External Treatment
2. المعالجة الداخلية Internal Treatment

ان معالجة المياه تقسم: -



1. المعالجات الميكانيكية

ا -الترشيح Filtration

ب -الترسيب Sedimentation

2. المعالجات الحرارية

أ - التقطير

ب - نزع الهواء والغازات حراريا

3. المعالجة الكيمياوية الخارجية: -

هي التي تحد من تكون الترسبات على الجدران الداخلية للأنابيب وفيها يتم إزالة أملاح العسرة (املاح الكالسيوم، أملاح المغنيسيوم، املاح الصوديوم).

تتم في البداية ازالة ايونات الكالسيوم والصوديوم من الماء ثم ازالة الكبريتات، النترات، الكربونات، والكلوريدات، التي تسبب العسرة بعملية (Softening). وبعدها ترسب العوالق بواسطة الشب.

بالنسبة للمعالجة الكيميائية الداخلية فتتم داخل المرجل وفيها يتم ازالة الاملاح المتبقية في الماء او التي تسربت داخل المنظومة عن طريق فتحات حدثت في المكثف (Condenser) نتيجة التأكل.

يستخدم في المعالجة الداخلية

1 -احادي فوسفات الصوديوم ($NaH_2 PO_4$).

2 -ثنائي فوسفات الصوديوم (Na_2HPO_4).

3 -ثلاثي فوسفات الصوديوم ($NaH_2\ PO_4$).

وتستخدم ايضا مواد كيمياوية عضوية في المعالجة الغرض منها ازالة المواد الغير عضوية والغازات خاصة الاوكسجين (O_2) من مياه المراجل اضافة الى ذلك تعمل هذه المواد على تعطيل فعالية الترسبات على السطح الداخلي للأنابيب من هذه المواد العضوية يضاف الهيدازين في كافة انواع المراجل الى الماء كمحلول اعتمادا على ضغط المرجل.

اولا: الهيدرازين Hydrazine(N_2H_4).

ثانيا: حامض التنيك. Tannic Acid

الهيدرازين : يستخدم الهيدرازين في كافة انواع المراجل بنسبة ويضاف الى الماء كمحلول اعتمادا على ضغط المرجل يكون الهيدرازين متطاير بطبيعته ويحقن في الماء الخارج من جهاز (De-aerator) مزيل الغازات ويقوم الهيدرازين بإزالة (O_2) وفق المعادلة ادناه :

$$N_2H_4 + O_2 \longrightarrow N_2 + 2H_2O \ldots\ldots\ldots\ldots (1-7)$$

اما بالنسبة لحامض التنيك فيستخدم في ازالة الاوكسجين في الماء ويعتمد في سرعة تفاعله على رقم (pH) ودرجة حرارة الماء.

ان الغرض الاساسي من معالجة مياه المراجل هو لتقليل حدوث الترسبات ومنع حدوث التآكل والتخلص من المواد والاملاح الضارة الغير مرغوب بها. ورغم كل المعالجات تظهر الترسبات على السطح الداخلي لأنابيب المراجل لذلك فان المراجل يجري عليها كيميائي بشكل دوري.

2.1.7 الغسيل الكيميائي Chemical Washing

ان المراجل العامة والتي مضى عليها فترة تشغيلية طويلة تحتوي انابيبها على ترسبات ناتجة من عدم نقاوة الماء واحتوائها على املاح وانه من الصعب او المستحيل ازالة هذه الترسبات بالتنظيف الميكانيكي الا باستخدام طرق كيميائية حيث تكون أسرع وأكثر اقتصادية.

يتخذ قرار عملية الغسل الكيميائي للمرجل عندما يصل سمك الاوكسيد والترسبات الى (5 mm) على السطح الداخلي للأنابيب فعند هذا السمك فصاعدا تبدأ مخاطر التآكل وفرط التسخين في الانابيب.

هنالك طريقتان للغسيل الكيمياوي

1 - طريقة التدوير المستمر Continuous Circulation

2 - طريقة التنقيع Soaking

ان طريقة الغسل تحدد نوع الحامض المستخدمة حيث يفضل استخدام حامض الفسفوريك في طريقة التدوير المستمر. هذه الطريقة اغلب الاحيان تكون غير مفضلة لان الترسبات لا تنظف بشكل جيد.

أما طريقة :Soaking يستخدم في هذه الطريقة حامض الهيدروكلوريك(HCl) حيث يسمح للمحلول ألحامضي بان يبقى في الانابيب بدون تدوير.

في نواتج الغسل الحامضي من الممكن يتكون غاز الهيدروجين الذي يسبب التقصف للسبيكة الحديدية لمعدن الانابيب ويعرف التقصف الهيدروجيني وحسب المعادلة التالية:

$$Fe_3 + 2H_2 \longrightarrow 3Fe + CH_4\uparrow \ldots\ldots\ldots(7-1)$$

يستخدم غاز (N_2) لتقليل خطر انفجار الأنابيب ولطرد نواتج الغسل الحامضي من المرجل ويجب غسل المرجل مرتين بالماء الدافئ وبدرجة حرارة ($70°C$).

وبعد الغسل الحامضي يتبع ذلك غسل قاعدي حيث تستخدم هيدروكسيد الصوديوم (NaOH) ويشغل المرجل لفترة زمنية تزيد على (40 hr) ساعة بعدها يتم تفريغ المحلول القاعدي في المرجل.

حيث ان استخدام المحلول القاعدي يؤدي الى معادلة بقايا الحامض في انابيب المرجل.

7-3 الوحدات الغازية

لقد استحدثت الحاجة الى انشاء الوحدات الغازية في المنظومة الكهربائية في العراق عند ازدياد الطلب الكبير والسريع الى الطاقة الكهربائية في نهاية السبعينات وبداية الثمانينيات من القرن المنصرم مما ادى الى شحة في انتاج الطاقة الكهربائية ومن اجل ذلك تم الاتجاه الى انشاء الوحدات الغازية لسد الطلب السريع وذلك لعدة مميزات منها انخفاض تكلفة التصنيع وسرعة التركيب وضمان سرعة التشغيل، وتوفر التوربينات الغازية حاليا في وحدات ذات قدرات

بين (10-150 MW) من المعلوم ان كلفة نصب الوحدات الغازية تقل بما يقارب 50٪ من كلفة نصب الوحدات التي تحوي على المراجل البخارية

3.1.7 الوقود المستخدم في تشغيل الوحدات الغازية

ان المحطات الغازية موزعة في مختلف المناطق في الخارطة العراقية وذلك لسهولة تنصيبها وكذلك ان الشركات التي تم التعاقد معها هي شركات مختلفة ومن اهم بنود العقود مع تلك الشركات إن تلك المحطات لا تعمل على الوقود الغازي فقط دائما تعمل على مختلف انواع الوقود كالنفط الخام (Crude Oil) والنفط الثقيل (Heavy Oil)، النفط الابيض (Kerosene)، زيت الكاز (Diesel Fuel). هذا التعداد في انواع الوقود المستخدم في تلك المحطات اعطى وثوقا اعلى في تلك الوحدات، لكن استخدام أي نوع من انواع الوقود السائل وخصوصا النفط الخام او النفط الثقيل سبب مشاكل جمة لتلك الوحدات وعلى مختلف الاصعدة سواء كانت تأثيره على الكفاءة، العمر التشغيلي، الصيانة، التلوث البيئي.....الخ

اما أهم تأثيرات زيت الوقود على تشغيل الوحدات الغازية فهي إجمالا تعتمد على المواصفات الكيمياوية لزيت الوقود وبالأخص نسبة محتويات الرماد ذات تأثير كبير على الاجزاء الحارة للتوربينات بسبب الحرارة العالية للغازات المحترقة.

العناصر الكيمياوية التي لها تأثير كبير على سبائك التوربينات الغازية الصوديوم، البوتاسيوم، الفناديوم، الكبريت، الرصاص، هذه العناصر لها تأثير

تآكلي كبير في الاجزاء الحارة من التوربينات مسببة ترسبات قوية وصعبة الإزالة من على ريش التوربين وتختلف نسبها حسب مصدر النفط الخام.

اما اهم المواصفات الفيزيائية لزيت الوقود التي لها علاقة مهمة ومباشرة بتشغيل الوحدات الغازية فهي اللزوجة، درجة الانسكاب، ضغط بخار الزيت، درجة اتقاد الوقود، تحسين التصميم في التوربينات الغازية التي تستخدم النفط الثقيل.

3.2.7 تحسين التصميم في التوربينات الغازية التي تستخدم النفط الخام او زيت الوقود

الاحتياجات لاحتراق الزيوت ذات النوعية الرديئة تقودنا الى اجراء تحسينات مهمة في تصميم التوربينات الغازية والتي حصلت عليها من خلال تجارب عملية وخبرة تشغيلية طويلة.

العوامل التالية لها تأثير كبير على تشغيل الوحدات الغازية:

- اختيار معادن وطلاء للريش وVarese.
- تخفيض درجة حرارة سطوح معادن الجزء الحار بطريقة التبريد بالهواء.
- ترشيح هواء الاحتراق الحامل للعناصر القلوية.
- معامل الوقود التشغيل او النفط الخام قبل استخدامه.

3.3.7 معاملة زيوت الوقود او النفط الخام المستخدم في الوحدات الغازية

لأجل استخدام النفط الخام كوقود في الوحدات الغازية، يجب ان تأخذ بنظر الاعتبار العوامل التالية: -

- معاملة النفط الخام باستخلاص الاملاح الغير المرغوب بها واضافة مواد محللة للعناصر المسببة للتأكل.

حيث يمكن استخلاص الصوديوم والبوتاسيوم من الزيت واضافة مركبات المغنيسيوم الى الزيت لتعطيل عمل الفناديوم.

عملية استخلاص املاح الصوديوم والبوتاسيوم من النفط الخام أسهل فيما هو علية في النفط الثقيل ذات المواصفات الرديئة بسبب خفة وزنة النوعي بالمقارنة مع الماء.

يمكن ازالة الصوديوم والبوتاسيوم من الوقود الى حدود 0.5 ppm هي النسبة التي لا تسبب مشاكل التآكل في الاجزاء الحارة من التوربين عند الاحتراق. يعتبر الصوديوم ذا تأثير تآكلي كبيرا وخصوصا عندما يتحد مع الفناديوم.

وكما ذكرنا فان اضافة المعطل (Inhibiter) الى الزيت لتعطيل فعل الفناديوم التآكلي اما مركبات الصوديوم والبوتاسيوم والكالسيوم الذائبة في الماء وغير ذائبة في زيت الوقود فهي تزال بطريقتين:

1 - طريقة القوة الطاردة المركزية.

2 - الطريقة اليكتروستاتية.

الخبرات العالمية التي تم الحصول عليها من خلال التجارب تفضل طريقة لإزالة الاملاح من الزيت على طريقة اليكتروستاتي بما يلي:

1 - بدرجة حرارة ثابتة تتراوح ما بين(^{o}C 150 – 35)وتعتمد على لزوجة الزيت اما بالنسبة للنفط الخام العراقي فالحرارة تتراوح ما بين(^{0}C 55 -45)بضغط ثابت 6 bar كمعدل.

2 - مزج (5-10%) ماء وايضا تعتمد على نوعية زيت الاحتراق المستخدم من خلال صمام المزج لتكوين مستحلب الذي يذيب الاملاح الموجودة في الزيت بقدر الامكان وتعتمد على عوامل كثيرة. ومن ثم يفصل المستحلب بواسطة مادة فاصلة المستحلب وهي مواد عضوية تستخدم بنسب مختلفة بحسب نوع الزيت وبالنسبة للنفط الخام العراقي الكمية تتراوح بمقدار(25 ppm)ويمكن الحصول على الزيت الوقود او النفط الخام ذا نسبة صوديوم و بوتاسيوم مذاب مقدار(0.5 ppm) وبالطريقة اليكروستاتي بمرحلة واحدة او بمرحلتين على التوالي.

اما تأثير الملوثات في النفط الخام الذي يحرق في الوحدات الغازية والحاوي على الفناديوم هي غازات الاحتراق مضافا اليها رماد شوائب المركبات الفلزية في الزيت.

$$Crude\ oil \xrightarrow[[O]]{Combustion} CO_2 + H_2O + Ash - deposit \quad .....(3-7)$$

فاذا انصهرت رواسب الرماد نتيجة للحرارة العالية مكونا مادة على شكل معجون، وهذا المعجون يسبب تأكل في درجة الحرارة العالية لمعادن الاجزاء الحارة من التوربين. ولهذا فان تكون الرماد المنصهر يعد نذيرا لبدء التآكل في درجة الحرارة العالية.

الشوائب الموجودة في النفط الخام مثل الفناديوم، الرصاص والبوتاسيوم جميعها عند احتراقها تنتج رواسب ذات درجة انصهار أوطأ من درجة الحرارة التشغيلية للوحدات الغازية.

وهناك نوعان رئيسيان من التآكل الذي ممكن حدوثه في الوحدات الغازية نتيجة لحرق النفط الخام.

3.4.7 التآكل بتأثير الفناديوم

عند حرق النفط الخام الحاوي على الفناديوم اكاسيد الفناديوم، تتكون نتيجة لذلك وبصورة رئيسية خامس اوكسيد الفناديوم

Fuel containing vanadium M.pt apperox.700 °C

$$\xrightarrow[[O]]{Combustion} V_2O_5[mainly] \quad \text{.....(4- 7)}$$

خامس اوكسيد الفناديوم V_2O_5 ينصهر بدرجة حرارة وان درجة حرارة مناطق الاحتراق وسطوح ريش التورباين تتراوح (800 °C - 900) وعلية فان تكون الرماد المنصهر (معجون الرماد)، خامس اوكسيد الفناديوم المنصهر حامضي الصفة ويعمل كمادة سائلة يلتصق على سطوح ريش التورباين مذيبا الطبقة الواقية على سطح المعدن ومن ثم يعرض المعدن مرة ثانية الى التأكسد لتكوين مرة اخرى الطبقة الاوكسيدية الواقية وهذه ايضا سوف تذاب بخامس اوكسيد الفناديوم المنصهر.

$$Fe_3O_4 + 2V_2O_5 \longrightarrow 3FeVO_4 + VO \quad \text{.....(5- 7)}$$

وبالنتيجة فان عملية التأكسد وتآكل سطوح الريش مستمر بوجود خامس اوكسيد الفناديوم المنصهر.

ومن المعروف ان التآكل بسبب الفناديوم يعرف بالتآكل السطحي للمعادن ويتصف هذا التآكل بالتآكل المنتظم للسطوح. ومن الممكن ان قسما من سطح الريش يتأكل كليا في بضع الاف من الساعات التشغيل.

تأثير الرصاص مشابه لتأثير الفناديوم عدى ان المعدن بتأثير أكثر شدة وان شكل التآكل مشابه لتآكل الفناديوم.

3.5.7. التاكل بسبب مركبات الكبريت Sulphation Corrosion

كان يعتقد بان علمية التآكل الكبريتية بسبب وجود الكبريت فقط في النفط الخام لكن ثبت بان هذه العملية تظهر بسبب وجود الكبريت والصوديوم، الكبريت هو جزء من مكونات النفط ولهذا يعتبر وجوده دائميا ، وجود كميات قلية من الكبريت والصوديوم كافية لإنتاج كبريتات الصوديوم بدرجة حرارة تتراوح بين (800- 900 °C).

كبريتات الصوديوم بحالتها النقية غير اكله وهي ذات درجة انصهار عالية نسبيا تقارب (880 °C) ولكن كميات قليلة م الفلزات مثل الفناديوم ، الرصاص، التنكستن، المولبيديوم، والكالسيوم تجعل كبريتات الصوديوم اكله بشكل كبير للمعادن وذلك بإنتاج (Eutectics) ذات درجة انصهار واطئة جدا.

التآكل الكبريتيدي يحدث بواسطة كبريتات الصوديوم وهو يعد محدد حيث ينفذ الى مكونات السبيكة وعلى حدود حبيبات المعدن وهذا النوع من التأكل والنخر يعرف (Intergranular Attach) يجعل الاجزاء المعدنية المنخورة ضعيفة ميكانيكيا وعلية فان هذا النوع من التأكل ممكن ان يحدث خلال فترة زمنية قصيرة دون اعطاء انذار مسبق.

3.6.7 الصوديوم والبوتاسيوم Corrosion by Sodium and Potassium

طبيعيا ميكانيكيه التآكل بالفناديوم والتآكل بوجود مركبات الكبريت لا يقع ويحدث على انفراد لكن بوجود الصوديوم او البوتاسيوم تحدث تفاعلات تؤدي الى تكوين فندات الصوديوم او فندات البوتاسيوم الذي له درجة انصهار واطئة تقارب (600 °C)حتى اقل من درجة انصهار خامس اوكسيد الفناديوم وعلية فان التآكل بالفناديوم والكبريتيد يمكن ان يحدث فقط بقليل من الصوديوم والبوتاسيوم كافية للبداء بهذا التآكل.

4-7 السيطرة على التآكل / معاملة الوقود

- الصوديوم والبوتاسيوم هما املاح ذائبة بالماء وتعتبر شوائب ممكن ازالتها واختزالها الى مستوى مقبول بطريقة غسل الوقود بالماء.
- الفناديوم والرصاص (ان وجد) لا يمكن ازالتهما ولهذا فانهما يعملان بطريقة اضافة مواد معطلة للفناديوم.

5-7 المقارنة بين المحطات البخارية والغازية

خواص الوحدات الغازية

1 - ان اهم ما تتميز به الوحدات الغازية هي سرعة تشغيله اذ لا يستغرق ذلك سوى عدة دقائق لربطها وتحميلها بالحمولة القصوى علما بان الوحدات البخارية تستغرق التشغيل والتحميل الى الحمولة القصوى عدة ساعات. كما ان مرونة الوحدات الغازية للتشغيل والتوقيف يستفاد منه في تغطية حمل الذروة والحالات الاضطرارية .

2 - يمكن تشغيل الوحدة على أي حمولة ولمدة طويلة وكلما قلت الحمولة طال عمر الوحدة وبعكس الوحدات البخارية التي تنتج مشاكل كثيرة في المراجل البخارية عند تخفيض الحمولة عن حد معين بالإضافة الى تأثر أجهزة السيطرة عند تخفيض الحمولة إلى أدنى من الحد المقرر وكذل تحدث مشاكل في مقتصد المراجل والمبادلات الحرارية.

3 - ببساطة الاجهزة المرافقة لا تحتاج الى مصادر الماء لذا يمكن انشاؤها في الصحاري والاماكن النائية البعيدة عن مصادر الماء والانهار وهي ايضا لا تحتاج الى عدد كبير من المنتسبين في الصيانة.

4 - تجهيز الوحدات الغازية بأجهزة سيطرة متطورة لذا لا تحتاج ملاك كبير في التشغيل وكذلك يمكن ربطها في مراكز السيطرة وتشغيلها من هناك بواسطة اجهزة حاسة.

5 - ان التطور الحاصل في تكنلوجيا صناعة الوحدات الغازية واستخدام سبائك من المعادن المتطورة ادى الى الوصول الى درجات حرارة عالية مما حسن كفاءة هذه الوحدات وزيادة سعتها الانتاجية

6 - يستفاد أيضا من الوحدات الغازية المحمولة على عجلات لتغطية حمولة المناطق النائية او تزويد المناطق الصناعية عند انشائها بالطاقة الكهربائية.

7 - المدة الزمنية لوضع مواصفات واعلان وتحليل العروض وحالات قصيرة جدا مقارنة بالمواصفات الخاصة بالوحدات البخارية اذ لا يستغرق ذلك اكثر من اشهر معدودة في الوحدات الغازية بينما في الوحدات البخارية تحتاج الى عدة سنوات لذا يشجع ذلك على التوسع في انشاء الوحدات الغازية في المنظومة الكهربائية كما ذكر سابقا لسد الحاجة المتعاظمة الى الطاقة ولمواجهة الظروف خاصة الظروف التي يمر بها العراق حالياً شريطه عمل هذه الوحدات على الغاز الطبيعي او المشتقات النفطية كالنفط الابيض (Kerosene) او زيت الغاز(Gas Oil) ولا يفضل استخدام الوقود الثقيل(Heavy Fuel) او النفط الخام (Crude Oil) وذلك لاحتوائها على شوائب تعمل على تآكل ريش التورباين اثناء عملية الاحتراق.

8 - كلفة انشاء الوحدات الغازية والسعر النوعي أوطأ من الكلفة والسعر النوعي لبناء المحطات البخارية.

9 - لا يتطلب توليد المحطات الغازية مساحة كبيرة من الارض وتغير هذه النسب تبعا لحجم الوحدة المنصوبة.

10 - ان الصيانة العامة التي تستغرقها الوحدة الغازية اقل بكثير مما علية في الوحدات البخارية وان عدد العامين في صيانة هذه الوحدات قليل جدا الا ان ذلك لا يتطلب خبرات خاصة وقسم منها نادرة.

11 - تستخدم الوحدات الغازية (بالإضافة إلى توليد الطاقة الكهربائية) في تحسين القدرة الكهربائية وذلك بتزويدها بفواصل (Clutter) لربط المولد بالمنظومة وتوقيف التوربين للاستفادة من المولدة لهذا الغرض.

12 - كفاءة المحطات البخارية اقل من الوحدات البخارية ويمكن تحسين كفاءة هذه الوحدات بالاستفادة من الطاقة المهدورة في المداخن ببناء مراجل عليها ثانوية للأغراض الصناعية او لتوليد الطاقة الكهربائية حيث يمكن تشغيل توربين بخاري بطاقة تقارب نصف طاقة التوربين الغازي باستخدام هذه الطاقة المهدورة وبدون اضافة أي وقود.

13 - نظرا للارتفاع في درجة الحرارة التي تعمل بها الوحدات الحديثة فان عمر هذه الوحدات أقصر بكثير من الوحدات البخارية.

14 - يستعمل الوقود الخفيف اعتياديا في تشغيل الوحدات الغازية لذا فان كلفة التشغيل باهظة فيما اذا استخدم وقود زيت الغاز ويمكن تشغيلها بالغاز الطبيعي ونظرا لتوافر الغاز الطبيعي في القطر

العراقي وبأسعار رخيصة لذا اصبح تشغيل الوحدات الغازية بالغاز الطبيعي اقتصاديا مما شجع على توسع في بناء الوحدات الغازية في المنظومة الكهربائية. كما يمكن تشغيل الوحدات الغازية بالنفط الخام الا ان ذلك يحتاج معاملة النفط الخام معاملة خاصة لفصل الاملاح الموجودة فيه ويجب اضافة مواد كيمياوية لتقليل من تأثير الفناديوم مع النفط الخام في تآكل ريش التورباين. والخبرة في هذا المجال محدودة وغير مشجعة نظرا للتعقيد الذي يحصل في نصب مثل هذه الاجهزة وكلفة المواد المضافة ومشاكل التآكل الناتجة عن استخدام النفط الخام. ويمكن أيضا تشغيل الوحدات الغازية على النفثا الخفيفة وهي بالإضافة الى انها خطرة وسعرها مرتفع فان كذلك في تشغيل هذه الوحدات على النفثا غير مشجعة لان لزوجة النفثا قليلة مما يسبب مشاكل في المضخات المستعملة لضخ هذا الوقود ويحتاج ايضا الى اضافة مواد كيمياوية لتلافي المشاكل الناتجة عن ذلك مما يترتب كلفة اضافية في التشغيل.

6-7 تشغيل المراجل Boiler Operation

تشغيل الوحدات الصناعية او المراجل البخارية، يتضمن تشغيل معدات تلك الوحدة بشكل يضمن الوصول إلى المستوى المقبول من المخرجات والكفاءة العالية. التشغيل عادة يفرض أن الأجهزة والمعدات في أحسن حالاتها نتيجة لعمليات صيانة أجريت عليها مسبقا.

إن الأجهزة والمعدات التي سيتكون منها المرجل البخاري تكون أكثر تعقيدا من غيرها نسبة الى الوحدات الصناعية الأخرى، لذلك تحتاج الى العناية الفائقة عند الصيانة.

الصيانة Maintenance هي ليست محصورة بإعمال الفحص او إزالة الأجزاء المعطلة أثناء عملية توقف المكائن فقط بل هي تشمل جميع الوظائف المستعملة بتلك المكائن، مثال، ترتيب قطع الغيار، مراقبة والاستنساخ لظروف التشغيل ومن ثم عمل توثيق لجميع الظروف التي تعمل من خلالها تلك المكائن.

للوصول إلى أداء عالي ومستمر من عملية التوليد البخار Steam Generator يتطلب ذلك الجمع بين جهد العاملين والصيانة الجيدة، ان العاملين او المشغلين يحب عليهم الحرص على تسجيل جميع المتغيرات للوصول إلى كفاءة عالية، إن العاملين في الصيانة يجب ان يسجلوا جميع الظروف والمتغيرات والقيام بتحليلها، ان فترات التحليل للمعلومات المسجلة يجب ان تشمل مختف المراحل لتدقيق ظروف المعدات وعمل ضبط لعمليات الصيانة، وهذه السجلات يجب ان تشمل: -

1 - إحصاء الكلف الاقتصادية للصيانة.

2 - تدقيق ظروف الأجهزة.

3 - تحليل الفشل.

4 - تدريب القائمين على الصيانة.

5 - توثيق أداء الأجهزة.

6.1.7 إجراءات تشغيل المراجل Do for Boiler Operation

ان عملية تشغيل وصيانة المراجل تتطلب اجزاء من القواعد المهمة، وهذه القواعد تشمل الاتي: -

1 - تدقيق وإزالة أي جسم غريب عند الصيانة، قطع الأقمشة المستخدمة في التنظيف وأي جسم اخر من جميع معدات المرجل.

2 - إزالة أي انسدادات في أي معدة في المرجل.

3 - جميع صمامات التنفيس (Vents) يجب أن تعمل بشك دقيق.

4 - إجراء العمليات التصحيحية لجميع الخوانق (Dampers)وملحقاتها كذلك لجميع معدات (Interlocks).

5 - يجب ان تكون جميع أنظمة الخوانق بالنسبة للهواء والغازات جاهزة عند بداية التشغيل.

6 - تدقيق وقود الأفران في المراجل قبل بداية التشغيل.

7 - السيطرة على معدل الوقود وحسب منحنى بداية التشغيل.

8 - تدقيق مستوى الماء في الاسطوانة عند الحدود المسموح بها.

9 - تدقيق ماء المرجل، وظروف البخار المسموح بها.

10 - السيطرة على الحمل وفق ما هو مسموح به.

11 - ضمان تفريغ الوقود من الفرن بعد كل عملية توقف.

12 - القيام بإعمال الصيانة الثانوية لبعض المعدات كالتسرب من خلال الواشرات (Value)، الصامولات (Gland) ...الخ، أثناء عمليه التشغيل وكذلك ملاحظة هذه المعدات أثناء عملية التوقفات.

13 - تشغيل المراوح من نوع ID و FD بعد عملية التوقف للمرجل الى ان تصبح درجة حرارة غازات الاحتراق اقل من(100 °C).

14 - التدقيق بشكل دوري للاهتزازات ودرجة حرارة المحامل (Bearing) ومستوى الصوت وتيار المحرك للأجهزة الدوارة. هذه القيم تسجل ويتم تحليل القيم بشكل دوري لضمان تخطيط جيد لعمليات الصيانة.

15 - تدقيق ظروف الربط للوصلات (Bushes) المطاطية.

16 - ضمان عمل نفاخات السخام (Soot Blower) بعد عملية تشغيل المرجل بشكل منتظم.

17 - ضمان إفراغ الرماد (Dump Grate) بشكل جيد.

18 - عمل تجانس مع التشغيل اليدوي للمرجل وتحديث سجلات التشغيل لتوثيق جميع معلومات وحوادث ذلك التشغيل.

المحظورات أثناء عمل المرجل Don'ts boiler operation

1 -عدم البدء بعملية تشغيل المروحة ((Fan وخمد (Damper) الدخول المفتوح.

2 -عدم تشغيل المرجل بدون ضمان عمل أجهزة قياس المستوى في الاسطوانة (Drum).

3 -عدم تشغيل مضخة التغذية مع بقاء صمام التفريغ مفتوح.

4 -عدم تشغيل المرجل وان مستوى الماء في الاسطوانة(Dram) اقل من المستوى الاعتيادي .

5 -عدم تشغيل المرجل ما لم يكن هناك كمية مناسبة من الماء المنزوع الايونات (Soft Water) موجودة.

6 -عدم ضخ الماء الخام (Raw Water) إلى المرجل تحت اي ظرف من الظروف.

7 -عدم تشغيل المرجل بوجود تسرب (Leaks)لأي أنبوب من أنابيب المرجل.

8 -بشكل مطلق عدم التشغيل بحيث تحصل على درجات حرارية عالية للبخار بوضع مفاجئ وإنما يتم الالتزام بالمستوى التشغيلي الذي يوضح التدرج في زيادة درجة حرارة البخار لكيلا تتضرر المحمصة (Super heater).

9 -عدم استخدام أنواع المزيتات (Lubricants)من مصادر مختلفة.

10 - عدم ترك فتحات المراقبة (Peep Holes) او فتحات أبواب فتحات الدخول (Man Holes) مفتوحة

6.2.7 أعمال الإصلاح للمرجل Repair Works for Boilers

صيانة معدات مولدات البخار، يجب إن يسبقها عمليات الفحص الهندسي (Inspection Engineers) إن عملية الإصلاح للمولدات البخارية يجب إن ترجع بعدها المرجل إلى حالة التشغيل الاعتيادية، جميع إعمال الصيانة لمعدات الضغط يجب إن يتم مصادقتها من خلال (IBR).

6.3.7. إصلاح الفرن وأنابيب المرجل Repair of Furnace and Boiler Tube

إن إصلاح أنابيب المرجل والفرن يتم من خلال الاتي: -

1 - يجب أن لا يتجاوز طول القطعة التي يتم استبدالها من أنبوب المرجل أكثر من (150 mm). بحيث يتم إزالة (75 mm) من كل جهة من الأنبوب من موقع الفشل.

2 - حلقات إسناد (Backing Rings) يجب ان تستعمل عند اللحام لامتصاص حرارة الماء او مزيج الماء – بخار.

3 - إذا لم تستعمل حلقات الإسناد، عند عملية اللحام في الممر الأول (First Pass) يجب أن يكون اللحام بوجود غاز او ما يسمى Inert (Gas – Arc) أو باستخدام الشعلة الاوكسي استلين (Oxyacetylene).

4 - قبل عمليات اللحام يجب أن يتم تنظيف نهايات الأنبوب كذلك داخل و خارج المنطقة التي تم لحامها من الأنبوب بطول لا يقل عن (40 mm) من المنطقة التي تم لحمها، كذلك يجب أن يتم إزالة جميع الرواسب

الاوكسيدية والرواسب الملحية والخبث لتجنب تواجد شوائب مع اللحام .

5 - السماح للتقلص في اللحام، لحام المعادن يؤدي إلى ذوبان المنطقة من المعدن التي تم لحمها نتيجة لتسليط درجات حرارية أثناء عملية اللحام وان المنصهر المعدني يتقلص ويصبح صلبا. الحام التناكبي(Butt-welding)يؤدي الى نقصان في طول الأنبوب بمقدار (1.5 mm).

6 - لا يتم البداية في عملية اللحام ان لم تكن القطعة التي يتم وضعها بدل القطعة التالفة والجزء الأصلي من الأنبوب التي يتم لحم القطعة الجديدة معها بنفس درجة الحرارة بحيث يبردان إلى أن يصلان إلى درجة حرارة المحيط.

7 - في حالة وجود شقوق طولية ناتجة من عمليات فرط تسخين (Overheating)عندها فان الأنبوب سوف ينفتح Swollen وكذلك يحدث نقصان في سمك الأنبوب، اللحام في هذه الحالة يكون اللحام صعب لذلك يجب إزالة كل ذلك الجزء من الأنبوب الذي حدث فيه انتفاخ ولحام قطعة جديدة بدلا عنة.

8 - الشقوق المحيطة (Circumferential)تحدث نتيجة لوجود اجتهادات زائدة مسلطة فانه يتم إصلاحه باللحام ما لم يحدث شق جديد بالقرب من الشق الأصلي الذي تم لحامه.

9 - البثور (Blisters)الناتجة عن جدران الفرن وأنابيب المرجل والتي تحدث نتيجة المترسبات الداخلية، هذه الظاهرة عادة تحدث عندما

المرجل يعمل بماء مغذي يحتوي على نسبة عالية من الماء المعوض .Make – (Up

10 - البثور (Blisters)يسبب الترسبات الداخلية والتي تعمل على زيادة درجة حرارة المعدن الذي يكون منة الأنبوب مما يؤدي إلى حدوث الزحف. (Creep)المنطقة الساخنة يحدث فيها انبعاج، يحدث تشقق في الترسبات نتيجة الانبعاج ما يجعل درجة الحرارة ترجع الى درجة الحرارة الطبيعية قبل حدوث الانبعاج ثم بعيدها تتجمع الترسبات في المنطقة الترسبات التي حدث فيها تشقق لذلك ترتفع درجة الحرارة مرة ثانية، تتكرر هذه العملية لأكثر من قبل وبعدها يحدث عملية التبثر.

11 - يمكن إجراء اللحام بأي طول من القطعة المراد لحمها ولأي جزء من الأنبوب يتم الوصول إلية بسهولة. ما إذا كان هناك صعوبة في الوصول إلى الجزء المعطوب من الأنبوب فانه يمكن اجراء عملية ما يسمى باللحام الشبكي (Window Welding).

إن صيانة المراجل تتطلب توافر معدات خاصة وعمال صيانة على مستوى عالي من الأداء. هناك معدات حديثة تستعمل في صيانة المراجل حاليا، مثال استخدام نظام الكاميرا التي تعمل بالأشعة تحت الحمراء وذلك لمراقبة نمو البقع او النقاط الساخنة (Hotspot)، كذلك استخدام فحص الترددات فوق الصوتية (Ultrasonic) للفحص المبكر للأنابيب إن من المهم جدا هنا أن نذكر إن تدريب

العاملين في مجال الصيانة على استخدام الأجهزة الحديثة المستخدمة عالميا في الصيانة ضروري جدا في هذا المجال.

حيث أجريت العديد من البحوث والدراسات حول الفشل في جانب النار للمراجل حيث قام الباحث (Jackson) بدراسة علمية على الترسبات والشوائب التي تكزون على السطوح الخارجية لأنابيب المحمصة (Super heater) في المراجل التي تستخدم الوقود الثقيل (Heavy Fuel) واستنتج إن معدل الترسبات لرماد الوقود السائل والمواد المضافة للوقود على أنابيب الحمل(Convection Tubes) وأسدل من ذلك ان الأنابيب العلوية تستلم مواد أكثر من غيرها وتحدث حالة تقشير الترسبات الموجودة على المحمصات ذات الدرجات الحرارية العالية، حيث تبين ان المقدار الصافي للترسبات اكبر في دخول الغازات حيث تكون درجة حرارة الغازات تكون اكبر وان ثلث مقدار الرماد يبقى داخل المرجل على شكل ترسبات داخل المرجل، أما الباحث (Al-Sultani.K.2003) فقد أجرى دراسة حول الشوائب الموجودة في الوقود السائل وخاصة الفناديوم ودرس الباحث فعالية المضافات التي تضاف إلى الوقود لتقليل مشاكل التآكل في جانب النار، فلاحظ إن مدى نجاح أي مادة مضافة إلى الوقود السائل حيث يقدر أقصى ككمية من مركبات الفانديوم تمنع من التسامي و وصولها الى أنابيب المرجل واثبت الباحث عمليا إن قابلية تثبيت الفانديوم لا تعتمد على نوع الوقود المستخدم واستنتج إن المركبات التي تنجح في تثبيت الفانديوم في رماد الوقود في الفرن هي مركبات المنغنيسيوم (MgO) $Mg(OH)_2$، حيث تتفاعل هذه المركبات مع اكاسيد الفناديوم وتحويلها إلى مركبات غير آكلة لا تنصهر إلا بدرجات حرارة عالية

أكثر من (100 °C) وهي أعلى بكثير من درجات الحرارة في غرف احتراق المراجل العاملة.

أجرى الباحثان (Rehn and Apbleth) دراسة عملية حول السيطرة مع تقشير الاوكسيد في جانب البخار وذلك في أنابيب المحمصات ولاحظ الباحثان انه من الطرق الفعالة لتقليل والسيطرة على تقشر الترسبات و اوكسيد الحديد هي بمعاملة الأنابيب بالكروم فوجد الباحثان ان استخدام طريقة معاملة الأنابيب بالكروم تقلل كثيرا من فقدان الوصول للمراجل التي كانت تحدث نتيجة فشل أنابيبها.

وأجرى الباحثان (Scriven and Winter) دراسة حول تأثير كل من الهيدرايزين في إزالة الأوكسجين الثابت في الماء والمترسب الى المنظومة حيث إن وجود الأوكسجين يؤدي إلى حدوث تآكل في السطوح الداخلية للأنابيب، كما در الباحثان كل من الهيدرازين وحامض النتريك وتوصلا إلى الهيدرايزين يمكن استخدامه في جميع أنواع المراجل وذات الضغوط العالية، لان الهيدرازين يتفاعل مع الشوائب الموجودة في الماء بل يتحد مع الأوكسجين ليكون الماء والنتروجين.

$$N_2H_4 + O_2 \longrightarrow 2H_2O + N_2\uparrow \ldots\ldots\ldots\ldots (6-7)$$

وان حامض النتريك يتأثر بقاعدية ودرجة حرارة الماء حيث يتحد مع الحديد (Fe^{+2}) عند القاعدية (pH:10-1) ليكون طبقة رقيقة غير ذائبة تحمي المعدن من تآكل الأوكسجين، بالإضافة إلى إن حامض النتريك يتحد مع الأوكسجين ويكون مادة معقدة غير ذائبة في الماء وتزال بعملية الدسع (Slow down).

References المصادر

1- Combustion–Encyclopedia article – Citizen Dium.
(http: ll en. Citizendium.Org /wiki/Combustion)
2- Navy Boiler Water Chemical Test and Treatments
(http://www.chemsitry – usna.edu/navapps/water treat/default .html)
3- Steam power cycle.
(http//www.cartage.org.lb/en/themec/sciences /physics/thermodynamics/basic therm.)
4- Susan, D.F. and Marder, A.R, "Oxidation of Ni- Al - Base Electrodeposited Composite Coatings. I: Oxidation Kinetic and Morphology at 800 °C "Oxidation of Metals, Vol.57, No 5. 1/2, pp. (131 – 157.
5- Fuel – Wikipedia, the Free Encyclopedia.Co.
(http://en. Wikipedia .org /wiki/Fuel)
6- The Hartford Steam Boiler
(http:// www.hsb.com)
7- P.J. Jackson," Deposition of Inorganic material in Oil - Fired Boilers", Central electricity Generating Board, Matchwood Eng. Lab, Matchwood, Southampton, England.
8- N. Asrsr , Anees .V. Malik , Shahree A, Dhib Al-Subaii and Izdein M. Said "Overheating and Fuel Ash Corrosion Failure of Boiler Tubes in Swcc Power Plants" Presented in Second Acquired Experience Sys Dosium on Desalination Plants O&M, SWCC, Al- Subail Sept .29 Oct 1997.
9- Harpreet S, Defender P.and Satya P," An Overview of Na_2SO_4 and/ or V_2O_5 Induced Hot Corrosion of Fe-and Based Super alloys o, Mechanical Eng. Department ,BBSB Eng. College ,Fatchagarh Sahib – 140407, India, Rev .Adv. Mater. Sci. 16(2007) 27-50.
10- J.W. Smith, "Babcock and Wilcox Company, Supercritical (Once Through) Boiler Technology " Barberton Ohio, U.S.A. 1998.
11- Hayward Gordon Ltd., ((Boiler System Chemical Treatment 101, Montreal, Toronto, Calgary (www.Hayward Gordon.com)).

12- Steam Boiler, 1- Part 1 Section 7a, GL2010.
(WWW.gl- group.com/glope.)
13- Sams, J.A.C. and Smith, W.D., " High Temperature Gas Side Corrosion in Water Tube Boiler", British Coal Utilization Research Association Bulletin XXV No. 12, 1961, 435-485.
14- Ed wads, C.J.A., "Fire Side deposits and Corrosion in Oil Fired Navel Steam- Rising Installations ". P, .P. Research Center Compiled Panel A. Admiralty Fuels and Lubrication A Jvisory Committee .1964.
15- A.D Patwarthan, "Industrial Waste Water Treatment " , pH/learning Private limited , New Delhi -110001, 2009.
16- D.H. Bernhardt "The Mechanism of Corrosion by Fuel Impurities, Butterworth's, London, 1963.
17- File://A:\pollutant and into combustion of Heavy Liquid Frels .htm.
18- RT. Henke and J. WHickey, "Liquid Fuel Treatment Systems" General Electric Company Report GER – 2484, 1981.
19- N. Krishnamurthy, P.Vallinayagan, D. Madhavan ,"Eng. Chemistry ", 2ed, PHI Learning Private Limited, New Delhi – 110001,2009.
20- T.N. Rhys – Jonses ,J.R.Nicholls and P.Hancock "Effects of SO_2/SO_3 on the Efficiency with which MgO Inhibits Vanodic Corrosion in Residual Fuel Fired Gas Turbines Corr. Sc.Vol.23, No.2, 1983.
21- Operating on Heavy Residual Fuels, Man B&W Diesel A/S, Copenhagen, Denmark, March 2003.
22- Ratliff and Brian "Chemistry 1, Cambridge University Press. TSBN 0-512 – 78778 – 5 , 2000.
23- Http://Oxyfuelccs .Kaist. ac.Kr/media/index.hph/Power – Plant.
24- D. William and III. Swain, "The Steam Boilers of the University of Memphis HVAC Shop: A Preventive Maintenance Primer" The University of Memphis, university college, 2007.
25- Http :/ www.grc .nasa .gov/www/k-12/airplane/Combest1.htm 1.

26- S.A. payer and C.M Ugiansky."Impact of the NBS – Battelle Cost of Corrosion study in the United States, " Proc. Corrosion, Symp. Int. Approaches to Reducing Corrosion Costs" , (NACE Houston), 1986.
27- W.J. Lorentz and F. Mansfield, "Determination of Corrosion Rates by Electrochemical DC and AC Methods", Corrosion Sci.21, 647, 1981.
28- Boiler Feed Water Treatment, File: // A:\Boiler ~1.Htm.
29- Http: /www.newworldencyclopedia.org /entry/Combustion.
30- Improving Steam System Performance, a Source book for Industry, Office of Industrial technologies Energy, Efficiency, and Renewable Energy U.S. Department of Energy, 2000.
31- D. Arthur, "Overview of Energy Flow of Industries in Standard Industrial Classifications", 20-39, December 2000.
32- Mars G. Fontana "Corrosion Eng.", MC-Graw Hill 3edt., 1987.
33- Zaki Ahmad," Principles of Corrosion Engineering and Corrosion Control", Butterworth – Heinemann an imprint of Elsevier, 2007.
34- J. More, "Intel Water Temperature and Boiler Corrosion, Air Condition Heating and Refrigerating", Vol.26, No.22.
35- A. Alfanso," Preventing Corrosion in Steam Boilers", Modern Power System Vol.14, No. 11, 02607840. 1994.
36- S. Paterson and T. Kuntz, "Causes and prevention of Boiler Tube Failunes", Boiler Tube Company of America Section II,(File://17-9-2000\section 2.html).
37- J.A.C and Smith, W.D., "High Temperature gas Side Corrosion in water Tube Boilers", B.C.U.R.A., Bulletin No. 12, 1961.
38- N. Krishnamurthy, P. Vallinayagam and D. Madhvan, "Engineering Chemistry" PHI Learning Private Limited , New Delhi- 110001, 2009.
39- S.S. Dara, "A Text- Book in Engineering Chemistry" , S Chand and Company (Pvt) LTD, Ram Nagar , New Delhi – 110055 , 1988.

المصادر العربية

1 - وكالة أنباء براثا – أزمة الطاقة الكهربائية في العراق الواقع والتحديات والحلول (الحلقة الخامسة).
(http: www.buratha news.com/ news – article- 19925. Html).

2 - التآكل في المراجل وملحقاتها – ملتقى المهندسين العرب.
(http://www.arab_eng.org/vb/t178819.html).

3 - محمود عمر، سهام المدفعي، قاسم جبار، عبد الله عبد عباس، الكيمياء الهندسية، كلية الهندسة جامعة بغداد، الطبعة الأولى، 1983.

4 - المهندس مصطفى تميم، " أساليب وطرق حساب وتحسين كفاءة وحدات توليد الكهرباء الاتحاد العربي لمنتجي وموزعي وناقلي الكهرباء، ندوة مؤشرات الأداء في محطات إنتاج الطاقة الكهربائية" طرابلس الجمهورية العربية الليبية، 2004.

5 - يونس علي، " تأثير تركيب الفيول ودرجة حرارة الوسط على أداء محطات التوليد الكهروحرارية " وزارة الكهرباء، سوريا ، 2008.

6 - كاظم عباس الموسوي "التآكل"، منشورات ELGA، ليبيا، 2008.

7 - احمد مدحت إسلام، " الطاقة ومصادرها المختلفة "، مركز الأهرام للترجمة والنشر، الطبعة الأولى، مصر، 1988.

8 - قاسم محمودي العكايشي "مشكلة الكهرباء في العراق" شبكة أخبار النجف
http://www.alnajafnews.net/najafnews/news.php

9 - إيمان يوسف محمود، " دليل المراجل البخارية" المعهد المتخصص للصناعات الهندسية، وزارة الصناعة والمعادن، العراق.

Gas Constant R 8.31467J/K.mol

atom K Boltzmann's Constant k 1.381×10^{-5}
Plank's Constant h 6.625×10^{-34}(J.s)
Electronic Charge e 1.6×10^{-19} C
Velocity of Light c 2.99×10^{8}m/8
Permittivity of free space $^{£}0$ 8.85×10^{-12} C^2/J.m
Rest mass of electron m_e 9.11×10^{23} particles/mole
Gravitational Acceleration g 9.81m/s
Faraday's Constant F 96.487 C/equivalent
Permeability of free space $\mu0$ $4\times\pi\times10^{-7}$ Wb/A.m

Lenght

1m = 10^{10} A°
1m = 10^{9} nm
1m = 10^{6} µm
1m = 10^{3} mm
1m = 10^{2} cm
1m= 0.0394 in
1cm= 0. 394 in
1m= 3.28 ft

1 A°= 10^{-10}m
1 nm= 10^{-9}m
1 m= 10^{-6}m
1 mm= 10^{-3}m
1 cm= 10 -2m
L in = 25.4 mm
L in = 25.4 cm
L ft = 0.3048 m

Area

$1m^2 = 10^4$ cm^2
$1mm^2 = 10^{-2}$ cm^2
$1m^2$ = 10.76 ft^2
1cm^2 = 0.1550 in^2

$1cm^2 = 10^{-4}m^2$
$1cm^2 = 10^{2}mm^2$
$1ft^2$ = 0.093m^2
$1in^2$ = 6.452cm^2

Volume

$1m^3= 10^6cm^3$
1 $mm^3= 10^{-3}cm^3$
1 m^3=35.32ft^3
1 cm^3=0.0610in^3
1 L=10^3cm^3

$1cm^3 = 10^{-6}m^3$
$1cm^3 = 10^3mm^3$
$1ft^3$ = 00.283m^3
$1in^3$ = 16.39 cm^3
$1cm^3= 10^{-3}$L

Mass

1Mg=10^3kg
1 kg =10^3g
1 kg = 2.205 lb_m
1g = 2.205×10^{-3} lb_m

1Kg=10^{-3}Mg
1g =10^{-3}kg
1lb_m = 0.4536 kg
1lb_m= 453.6 g

1gal(us)= 3.785L
1L=0264 gal

Density

1 kg /m^3= 10^{-3}g/cm^3
1Mg/m^3=1g/cm^3
1kg/cm^3=0.0624 lb_m/ft^3
1g/cm^3=62.4 lb_m/ft^3
1g/cm^3=0.0361 lb_m/in^3

1 g /cm^3= 10^3 kg /m^3
1 g /m^3=1 Mg/m^3
lb_m/ft^3=16.02kg/m^3
1lb_m/ft^3 =16.02×10^{-2} g/m^3
lb_m/in^3 =27.7g/cm^3

Force

1N= CV/m=J/m
1N= 10^5 dynes
1 1N= 0.2248 lb_f
1 dyne = 10^{-5} N
1 lb_f= 4.448 N

Energy

1J= 6.24 × **10^{18}eV**
1eV= 3.83 × **10-^{26} cal**
1J = 1N.m= 1W.s
Photon energy :E= 1.24 eVat r=1 **µm**

1J=0.239 cal
1Btu=252.0 cal

1eV=1.602×10^{-19}J 1J=10^{-7}ergs
1cal = 2.61×10^{10}eV 1cal= 4.184J
1eV/particle = 96,500J/mole
Thermal energy (@300K) kT=0.0258eV

Power

1W=3.414 Btu/h	1cal/s=14.29 But/h
1But/h=0.293W	1But/h= 0.070 cal/s 1hp= 0.7457kW

المراجل البخارية

الوقود - الاحتراق - التآكل - الصيانة

Bibliotheca Alexandrina
1503714

9 789957 249694

دار صفاء للطباعة والنشر والتوزيع

المملكة الأردنية الهاشمية - عمّان - شارع الملك حسين
مجمع الفحيص التجاري - هاتف: 4611169 6 962+
تلفاكس: 4612190 6 962+ ص.ب 922762 عمّان 11192 الأردن
Safa@darsafa.info Safa@darsafa1.net Safa@darsafa.net
دار صفاء للنشر والتوزيع
دار صفاء للنشر