

الباب الثامن

البخار Steam

توليد البخار وخواصه

Steam Generation and Propertles

تكون بخار الماء :

إذا وضعت وحدة وزنيه من الماء النقي فى اناء ذو غطاء عند درجة حرارة الصفر المئوى أو 32°F واضيفت الى الاناء كمية من الحرارة تحت ضغط ثابت فان درجة حرارة الماء سوف ترتفع تدريجيا الى ان يصل الماء الى درجة الغليان Boiling Point وتعتمد درجة حرارة الغليان على الضغط الموجود على الماء ، فنجد مثلاً انه عند الضغط الجوى العادى أى 14.7 رطل/بوصه مربعه تكون درجة حرارة الغليان 212°F (واحد كجم/سم² - درجة الغليان 100°C)، ويلاحظ انه كلما زاد الضغط زادت درجة حرارة الغليان .

وتعرف كمية الحرارة اللازمه لرفع درجة حرارة الماء من درجة التجمد (الصفر

المئوى أو 32°F) الى درجة الغليان بحرارة السائل الظاهرية Sensible or Liquid Heat وإذا استمر التسخين بعد وصول الماء الى درجة حرارة الغليان نجد ان درجة حرارة الماء سوف لا تتغير وتظل ثابتة تحت ضغط ثابت . ويكون نتيجة لحرارة الممتصه ان يتحول الماء من الحالة السائله الى الحاله الغازيه بالتدريج وذلك تحت درجة حرارة وضغط ثابتين . وتعرف كمية الحرارة الممتصه بالحراره الكامنه Latent Heat وإذا استمرت عملية التسخين يتحول جميع الماء الى بخار مشبع وتعرف هذه الحاله بحاله التشبع Saturation وتساوي درجة حرارة الغليان درجة حرارة التشبع Saturation Temperature وإذا استمرت عملية التسخين بعد ذلك تتسبب فى رفع درجة حرارة البخار تحت نفس الضغط وتعرف هذه العمليه بعملية التحميم Superheating .

ويتلخص مما سبق انه يوجد هناك ثلاثة انواع من البخار :-

١- البخار الجاف والمشبوع : Dry and Saturated Steam

وهو البخار الذى تكون نتيجة تبخر الماء تبخيراً كاملاً بحيث لا يوجد به أى اثر لقطرات الماء العالقه اى انه بخار خال تماماً من الرطوبه . ودرجة حرارته تكون هى نفس درجة حرارة التبخير او الغليان او التشبع .

٢- البخار الرطب : Wet Steam

وهو بخار ماء به قطرات ماء عالقه نتيجة لعدم تبخره تبخرا كاملا . وتكون درجة حرارته هي نفس درجة حرارة التبخير أو الغليان أو التشبع .

٢- البخار المعمص : Superheated Steam

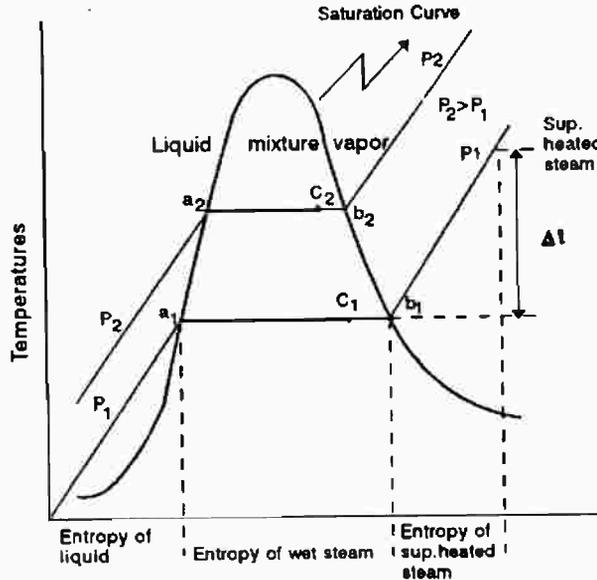
وهو بخار جاف ومشبع اكتسب درجة حرارة أكثر من حرارته الكامنه مما تسبب في ارتفاع درجة حرارته عن درجة حرارة التبخير أو التشبع .

وكمية الحرارة الكامنه في البخار عند ضغط ثابت تعتمد على نسبة الرطوبه الموجوده فيه اي على نسبة جفافه - وتعرف نسبة جفاف البخار او جودته (X) كالآتى :-

جودة البخار او نسبة جفاف البخار Dryness Fraction or Steam Quality

$$X = \frac{\text{Weight of dry steam}}{\text{Weight of wet steam mixture}} \quad (8-1)$$

ويمثل الرسم البياني الآتى (شكل ٨-١) العلاقه بين درجة الحرارة وانتروپيا البخار عند ضغوط مختلفه :-



شكل (٨-١) خريطة خصائص البخار

يمثلان نقطة الغليان عند ضغط P_2 , P_1 على الترتيب	a_2 , a_1
يمثلان نقطة التشبع عند ضغط P_2 , P_1 على الترتيب	b_2 , b_1
يمثلان حالة بخار رطب عند ضغط P_2 , P_1 على الترتيب.	c_2 , c_1

وتحسب الحرارة الكلية لوحدة وزنيه واحدة من البخار الرطب كالآتى:

$$\dot{I}_{wet} = \dot{i}' + XL \quad (8-2)$$

والحرارة الكلية فى وحدة وزنيه واحدة من البخار الجاف والمشبع

$$\dot{I}_{D\&S} = \dot{i}' + L \quad (8-3)$$

والحرارة الكلية لوحدة وزنيه واحدة من البخار المحمص

$$\dot{I}_{S/H} = \dot{i}' + L + C_p \Delta t \quad (8-4)$$

حيث ان :

$$\begin{aligned} \text{الحرارة الكلية لوحدة وزنيه من البخار الرطب} &= \dot{I}_{wet} \\ \text{B.T.U/Lb. or k.cal./kg.} & \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{الحرارة الكلية لوحدة وزنيه من البخار الجاف} &= \dot{I}_{D\&S} \\ \text{B.T.U/Lb. or k.cal./kg.} & \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{الحرارة الكلية لوحدة وزنيه من البخار المحمص} &= \dot{I}_{S/H} \\ \text{B.T.U/Lb. or k.cal./kg.} & \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{الحرارة الظاهريه للسائل لكل وحدة وزنيه} &= \dot{i}' \\ \text{B.T.U/Lb. or k.cal./kg.} & \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{الحرارة الكامنه للبخار لكل وحدة وزنيه} &= L \\ \text{B.T.U/Lb. or k.cal./kg} & \end{aligned}$$

$$\text{الحرارة النوعيه للبخار تحت ضغط ثابت} = C_p$$

$$\text{B.T.U/Lb. } ^\circ\text{F or k.cal./kg. } ^\circ\text{C}$$

$$= 47\% \text{ للبخار المحمص (كمتوسط عام).}$$

$$\text{جودة البخار الرطب او نسبة جفافه} = X$$

Δt = درجات حرارة التخميص عند ضغط ثابت

= درجة حرارة البخار المحمص - درجة حرارة التشبع

استخدام جداول البخار :

المعلومات الموجودة فى جداول البخار كانت نتيجة لتجارب على بخار الماء الجاف ، عند درجات حرارة وضغوط مختلفه . وهذه النتائج محتسبه ابتداء من درجة حرارة الصفر المئوى او درجة ٣٢°ف على حسب ما اذا كانت الجداول تتبع الوحدات المتريه او الوحدات البريطانية وتشتمل هذه النتائج على المعلومات الآتية :-

درجة حرارة التسخين (درجة الغليان) ، الضغط المطلق للبخار، الحرارة الكلية للبخار الجاف والمشبع ، الحرارة الظاهريه للسائل ، الحرارة الكامنه للبخار الجاف . وجميع هذه المعلومات منسوبة الى وحدة وزنيه واحدة من البخار الجاف .

ويجب عند استخدام جداول البخار حساب الضغط المطلق وذلك باضافة الضغط الجوى الى الضغط المانومتري قبل البدء فى عمل اى حسابات على البخار كما يجب الاخذ فى الاعتبار درجة حرارة (أو كمية الحرارة) الموجود عندها الماء المستخدم فى توليد البخار وذلك بطرح كمية الحرارة الموجودة عندها من الحرارة الظاهريه للسائل والمقيدة فى جداول البخار .

كما تبين جداول البخار بعض البيانات الاخرى مثل الحجم النوعى للسائل وللبخار الجاف .

مثال :

ما هى كمية الحرارة الكلية اللازمه لتوليد ١٠ كجم من بخار رطب جودته ٩٠٪ وضغطه ٤ كجم/سم^٢ اذا علمت ان الماء المستخدم فى توليد هذا البخار كان عند درجة حرارة قدرها ٤٣٦°م .

البخار

الصل

من جداول البخار يمكن الحصول على المعلومات الآتية لبخار عند ضغط مطلق
٤ كجم/سم^٢ .

$$At \quad P = 4 \text{ kg/cm}^2$$

$$i' = 143.7 \text{ kcal/kg vapor}$$

$$L = 510.2 \text{ kcal /kg vapor}$$

$$t_{sat} = 142.92 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$i_{wet} = i' + XL \quad \text{وحيث ان :}$$

إذا كان توليد البخار من ماء عند الصفر المئوى

$$\begin{aligned} \therefore i_{wet} &= 143.7 - (1 \times 43.6) + (0.9 \times 510.2) \\ &= 100.1 + 459.18 = 559.28 \text{ kcal/kg vapor} \end{aligned}$$

$$\therefore \text{Total heat} = 10 \times 559.28 = 5592.8 \text{ kcal.}$$

الحجم النوعى للبخار الرطب :

الحجم النوعى هو عبارة عن حجم وحدة وزنيه وأحدة من المادة . ويعتمد حجم وحدة وزنيه من البخار الجاف اعتمادا أساسيا على ضغط البخار ، ويمكن حسابها بدقه من التجارب العمليه المدونه فى جداول البخار .

فإذا كان الحجم النوعى للبخار الجاف عند ضغط P من جداول البخار يساوى V_s متر مكعب لكل كجم بخار جاف فتكون كثافة البخار الجاف $1/V_s$

فإذا فرض ان البخار رطب ونسبة جفافه (X) فان الحجم النوعى للبخار الرطب يكون :

$$V_{wet} = XV_s + (1 - X) V_w \quad (8-5)$$

حيث ان :

$$V_s = \text{الحجم النوعى للبخار الرطب المطلوب حسابه}$$

$$V_w = \text{الحجم النوعى للماء السائل الموجود فى جداول البخار}$$

وعند الضغوط المنخفضه يكون حجم الماء صغير جدا اذا ما قورن بحجم البخار وعلى ذلك فانه يمكن اهمال حجم الماء فى المعادلة السابقة وينتج عن ذلك ان :

$$V_{wet} = X V_s \quad (8-6)$$

الحجم النوعى للبخار المحمص :

يمكن حساب الحجم النوعى للبخار المحمص من القانون الاتي :

$$V_{s/H} = \frac{1.253 (i_{s/H} - 835)}{P} \quad \text{ft}^3/\text{Lb} \quad (8-7)$$

$$V_{s/H} = \frac{0.01 (i_{s/H} - 464)}{P} \quad \text{m}^3/\text{kg}. \quad (8-8)$$

وهناك طريقة تقريبيه لحساب الحجم النوعى للبخار المحمص باعتباره غاز مثالى يتبع القانون العام للغازات كالاتى :-

$$V_{s/H} = V_s \frac{T_{s/H}}{T_s} \quad (8-9)$$

حيث $T_{s/H}$ = درجة الحرارة المطلقة للبخار المحمص

T_s = درجة حرارة التشبع المطلقة

خلط البخار

أولاً : خلط البخار مع ماء :

ويمكن عمل الحسابات الخاصة بها وذلك بعمل موازنه حراريه ، قبل وبعد عملية الخلط ، أى ان الحرارة التى اكتسبها الماء نتيجة الخلط تساوي الحرارة التى فقدها البخار . فإذا فرض انه يراد خلط كمية من البخار مقدارها m_1 عند ضغط مطلق P_1 ونسبة جفاف البخار X_1 ، الى كمية من الماء مقدارها m_2 عند درجة حرارة T_2 ونتيجة لعملية الخلط فان البخار سوف يتكثف وتكون درجة حرارة المخلوط T_3 اقل من درجة حرارة التشبع للبخار T_1 .

$$\therefore m_1 [(\dot{I}'_1 + X_1 L_1) - \dot{I}'_3] = m_2 (\dot{I}'_3 - \dot{I}'_2) \quad (8-10)$$

ومن هذه المعادله يمكن حساب \dot{I}'_3 ومن جداول البخار يمكن الحصول على درجة حرارة المخلوط T_3 المناظرة.

ثانياً : خلط بخار مع بخار عند ضغوط ودرجات حرارة مختلفه :

إذا فرض انه يوجد لدينا خزان به كمية من بخار m_1 عند ضغط P_1 ودرجة حرارة T_1 ونسبة جفافه X_1 . واضيفت الى هذا البخار كمية من بخار آخر وزنها m_2 عند ضغط P_2 ودرجة حرارة T_2 ونسبة جفاف X_2 ، والمطلوب معرفة درجة حرارة وضغط المخلوط . ويمكن حسابه على خطوتين :-

١- حجم الخزان ثابت

$$m_1 X_1 V_{s1} = (m_1 + m_2) X_3 V_{s3} \quad (8-11)$$

حيث X_3 هى نسبة جفاف مخلوط البخار .

٢- بعمل موازنه حراريه : الحرارة الكلية الموجوده فى كل نوع بخار على حده قبل عملية الخلط تساوي الحرارة الكلية الموجوده فى البخار الناتج عن عملية الخلط .

$$m_1 (\dot{I}_1 + X_1 L_1) + m_2 (\dot{I}_2 + X_2 L_2) = (m_1 + m_2) (\dot{I}_3 + X_3 L_3) \quad (8-12)$$

وتحل المعادلتين السابقتين بطريقة الصواب والخطأ للوصول الى درجة الحرارة المطلوبه مع استخدام جداول البخار .

ثالثا: مخلوط من البخار والهواء :

ويستخدم فى هذه الحالة قانون دالتون للضغوط الجزئيه والتي سبق شرحها .
فاذا اريد معرفة وزن الهواء الموجود فى مخلوط من البخار والهواء وفرض ان درجة حرارة المخلوط معلومه لدينا ، فتكون الخطوات كالاتى :-

١- انظر جداول البخار تحت درجة حرارة المخلوط ويكون الضغط المقابل هو الضغط الجزئى للبخار .

٢- يحسب الضغط الجزئى للهواء كالاتى :

الضغط الجزئى للهواء = الضغط الكلى للمخلوط - ضغط البخار الجزئى (المقابل لدرجة حرارة التشبع) .

٣- وزن الهواء فى المخلوط يمكن حسابه من القانون العام للغازات .

$$PV = m.R.T. \quad (8-13)$$

حيث :

P = الضغط الجزئى للهواء

m = وزن الهواء فى المخلوط

T = درجة حرارة المخلوط

القيزانات البخارية : STEAM BOILERS

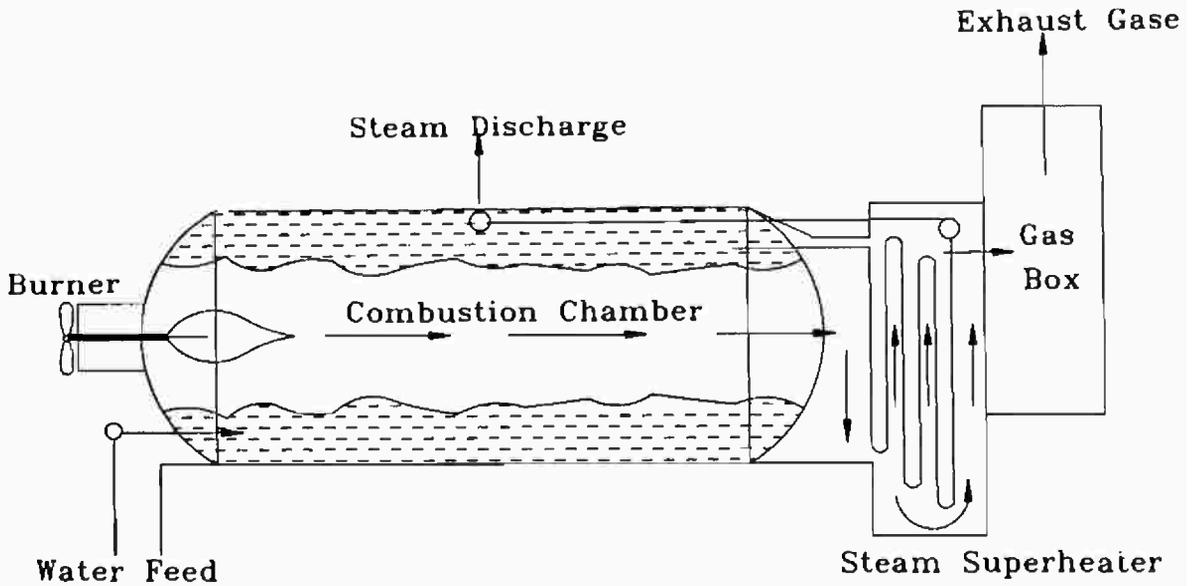
الفلايه او القيزان البخارى هي جهاز يستخدم فى توليد البخار تحت ضغط ثابت وتخزينه لاستعماله فى اغراض التسخين او فى توليد القوى المحركه .

ويتكون القيزان عادة من وعاء اسطوانى يسمى بالفلايه يحتفظ بالماء داخله لتوليد البخار منه وتخزينه تحت ضغط ثابت الى حين استخدامه ، وهذا الوعاء متصل بعدة مواسير افقيه او رأسيه او على ميل بغرض زيادة سطح التسخين المعرض للغازات الناتجه من احتراق الوقود داخل غرفة الاشتعال .

والقيزانات البخارية يمكن تقسيمها عامة الى ثلاثة انواع رئيسيه :

١- القيزان الاسطوانى : Tank or Shell Boiler

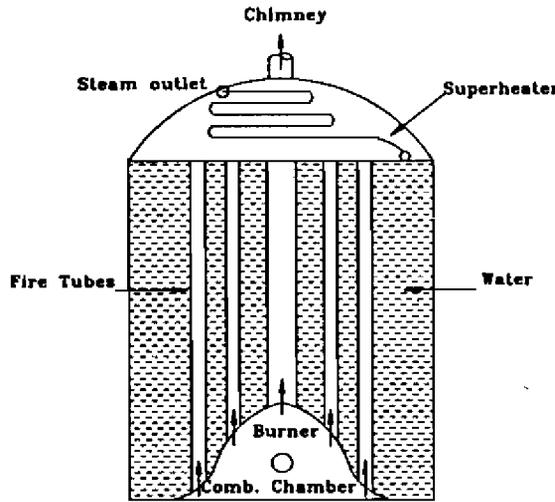
وهذا النوع من القيزانات يستخدم لتوليد كمية صغيرة من البخار لاغراض التسخين فى المصانع الصغيره ويتكون من اسطوانه تحتوى على ماسورة او عدة مواسير لزيادة سطح التسخين (شكل ٨-٢).



شكل (٨-٢) قطاع فى قيزان اسطوانى

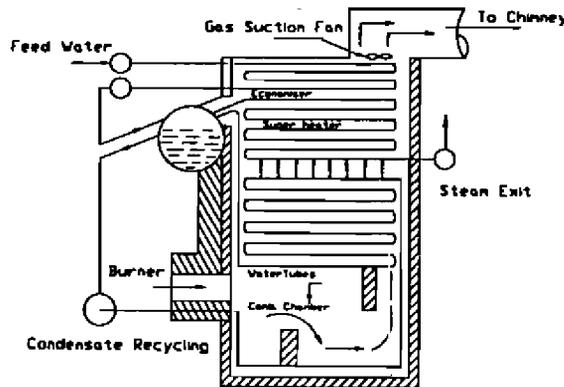
٢- القيزانات ذو أنابيب اللهب : Fire-Tube Boiler

وهذا النوع من القيزانات (شكل ٢-٨) يتميز بان به عدة مواسير موصله من غرفة الاحتراق الى المدخنه حيث تمر الغازات الناتجه عن الاحتراق وتحيط بهذه المواسير المياى الذى يتولد منها البخار نتيجة لانتقال الحرارة من الغازات الساخنه الى المياى خلال جدار المواسير .



شكل (٢-٨) قطاع فى قيزان أنابيب اللهب

٣- القيزان ذو أنابيب المياى : Water-Tube Boiler

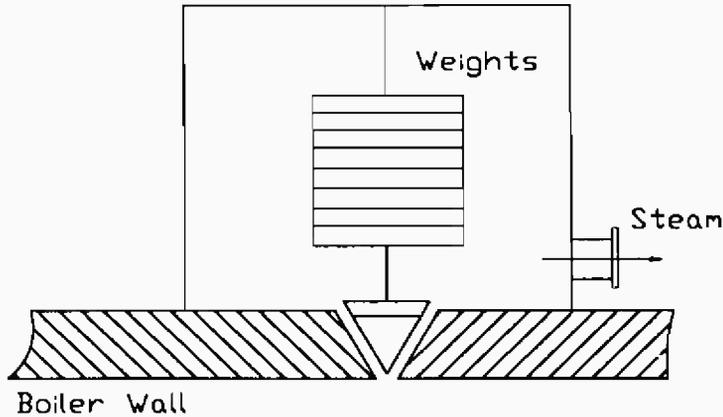


شكل (٤-٨) قطاع فى قيزان أنابيب المياى

وفى هذا النوع من القيزانات يمر الماء داخل شبكة من المواسير التى تعترض طريق مرور غازات الاحتراق الى المدخنة (شكل ٨-٤) . وهذا النوع يستخدم عادة لتوليد كمية كبيرة من البخار ويمكن استعماله فى التسخين او فى توليد القوى المحركة . ويمتاز هذا النوع بكفاءته العاليه فى تحويل كميات كبيرة من الماء الى بخار فى وقت قصير . وحتى يمكن زيادة كفاءة انتقال الحرارة من الغازات الناتجة عن الاحتراق تستخدم عادة مروحة لسحب هذه الغازات فتزيد من سرعة مرور الغازات على مواسير المياه ومواسير البخار المحمص . ويمكن الاقتصاد فى كمية الوقود المستعمله باستخدام جزء من غازات الاحتراق فى تسخين مياه تغذية القيزان فى مبادل حرارى يسمى بالموفر Economizer وتستخدم طلمبة طاردة مركزيه فى ايجاد حركة مستمره للمياه داخل مواسير توليد البخار .

ولسلامة تشغيل القيزان ولكى يعمل بكفاءه عاليه يجب تزويده ببعض الاجزاء الاضافيه التى تعرف بتمتمات القيزان وهى :

١- صمام الامن Safty Valve

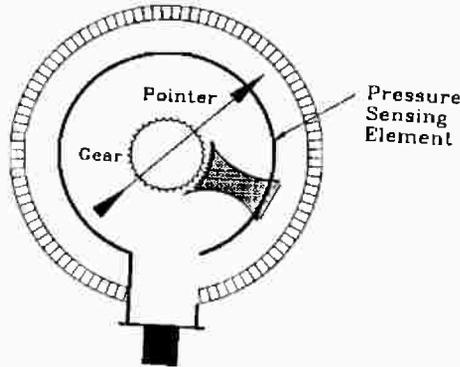


شكل (٨-٥) رسم مبسط لصمام أمن

وفائدته هو حفظ البخار داخل القيزان تحت ضغط معين ثابت بحيث اذا زاد الضغط عن حد معين يفتح الصمام حتى تتسرب كميته من البخار الى خارج القيزان (شكل ٨-٥) حتى لا يؤدي ازدياد الضغط الى انفجار الفلايه . ويمكن كذلك بواسطة صمام الامن التحكم فى ضغط البخار وبذلك يمكن تنظيم درجة حرارة البخار اللازم فى

عمليات التسخين . ويظل صمام الامن مفلقا بواسطة ثقل متحرك فى طرف رافعه او عدة اثقال موضوعة مباشرة فوق الصمام ويوجد عادة صمامان لكل قيزان حتى اذا تعطل واحد يؤدي الآخر وظيفته .

٢- مقياس الضغط : Pressure Gauge

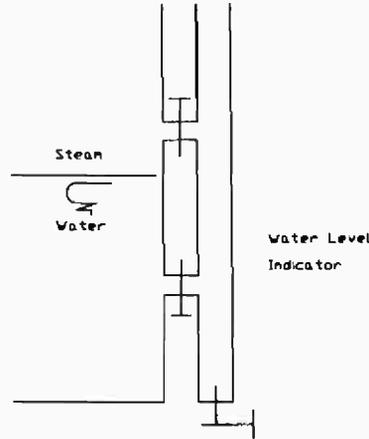


شكل (٦-٨) قطاع فى جهاز قياس ضغط البخار

يوضع مقياس الضغط فى الجزء العلوى من الغلايه ليكون متصلا بالبخار المتكون حيث انه يقرأ ضغط البخار . وقراءة المقياس تبين الضغط المانومتري للبخار اى انه يجب اضافة الضغط الجوى للقراءة لمعرفة الضغط المطلق للبخار . وهناك مقاييس للضغط يبدأ تدريجها من الضغط الجوى لتعطى مباشرة الضغط المطلق .

ويتكون مقياس الضغط (شكل ٦-٨) من شريط من معدن خاص يتأثر بضغط البخار فيتمدد كلما زاد الضغط وينكمش كلما قل الضغط عليه . وهذا الشريط متصل بواسطة تروس بمؤشر يتحرك فى حركة دائرية على قرص به تدريج .

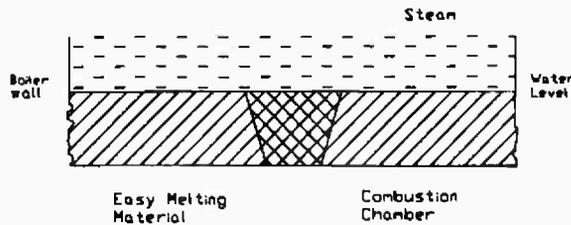
٢- زجاجة البيان : Water Level Indicator



شكل (٧-٨) زجاجة البيان

وتعمل بنظرية الاواني المستطرقة وفائدتها بيان مستوى المياه في وعاء القيزان وهي متصله بواسطة محابس الجزء الذي يوجد به البخار والآخر بالجزء الذي يوجد به الماء (شكل ٧-٨) . وفي حالة ما اذا كسرت زجاجة البيان تقفل هذه المحابس حتى لا يتسرب الماء والبخار خارج الغلايه . وكذلك تزود كل غلايه بزجاجتين للبيان حتى ما اذا كسرت واحدة يمكن استخدام الاخرى لبيان مستوى المياه .

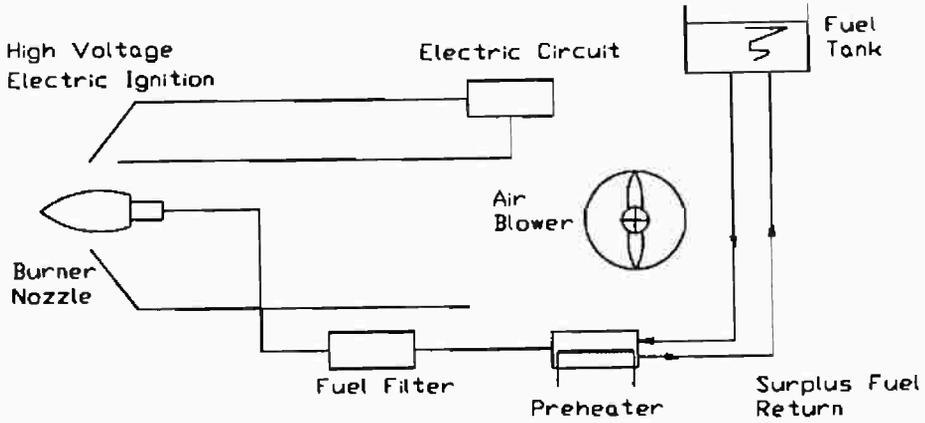
٤- مسمار الامن Safty Pin



شكل (٨-٨) مسمار الامن

وفأئذته ضمان سلامة الغلاية فى حالة ما اذا انخفض مستوى الماء بها . ويوضع عادة فوق غرفة الاحتراق مباشرة وهو مصنوع من مادة سهلة الانصهار مثل الرصاص وطالما كان الماء يغطى طرف المسمار فى وعاء الغلاية فتكون درجة حرارة المسمار اقل من درجة انصهار معدنه حتى اذا انخفض مستوى الماء فى القيزان فيتعرض مسمار الامن (شكل ٨-٨) للحرارة الشديده الموجوده فى البخار زيادة على الحرارة التى يتعرض لها من الغازات الناتجة عن الاحتراق مما يسبب انصهاره واندفاع البخار الى بيت النار لآخماد الحريق متفاديا بذلك تعرض الغلاية للانفجار .

٥- جهاز اشعال الوقود (الولاعة) : Fuel Burner

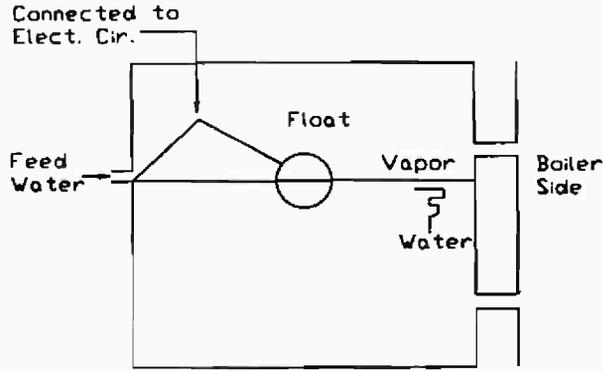


شكل (٨-٩) جهاز اشعال الوقود

هناك طرق متعددة لاشعال الوقود تعتمد اساسا على نوع وطبيعة الوقود فالقيزانات التى تستخدم الفحم تستعمل عادة سير حديدى ناقل يوزع الفحم على سطحه ثم يبدأ فى اشعال الفحم التى تنتقل منه الحرارة الى الشحنات التالىة . وفى مصانع شركة السكر بالجمهورية تستعمل مصاصه القصب كوقود يتم احتراقه بواسطة اجهزة تلقيم وجنازير ناقله داخل غرفة احتراق القيزان .

ومعظم القيزانات التى تستخدم حاليا تستعمل الوقود السائل فى غرفة الاحتراق بواسطة الولاعة او جهاز الاشعال (شكل ٨-٩). وتتكون الولاعة من طلمبية ذات ازاحة ايجابيه (طلمبية ترسيه) لدفع الوقود الى الرشاش حيث يتحول الوقود السائل الى رزان عند فوهة الرشاش (الفونيه) التى يوجد بها عدة ثقب لتسهيل مهمة تفتيت السائل الى جزئيات دقيقه وتوجد مروحة مركبة على عامود موتور طلمبيه الوقود ، فأئذتها دفع الهواء داخل ماسورة الرشاش لتسهيل عملية خلط الهواء برزان الوقود الذى يشتعل عند حدوث شرارة كهربائية ذات جهد عال .

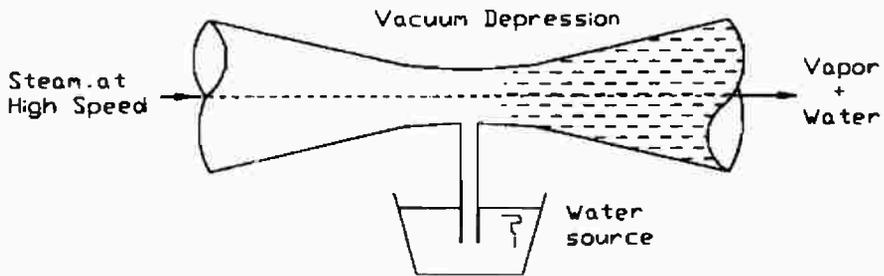
٦- العوامه : Float Control



شكل (٨-١٠) العوامه

وفائدتها تزويد الغلايه بالماء اللازم لتوليد البخار أوتوماتيكيا عندما ينخفض مستوى الماء عن المنسوب اللازم . وتوجد العوامه فى صندوق متصل بفتحتين أحدهما للبخار والثانيه للماء فى وعاء الغلايه وتتصل رافعة العوامه بدائرة كهربائيه تقوم بتشغيل طلمبة تغذية الغلايه بالمياه وذلك فى حالة انخفاض مستوى الماء بها عن منسوب التشغيل .

٧- الشفاط أو الحاقن : Water Injector



شكل (٨-١١) الشفاط أو الحاقن

ويستعمل عادة فى حالة توقف طلمبة المياه . وهو عبارة عن ماسورة بها اختناق يمر فيها البخار بسرعة عاليه (شكل ٨-١١) . وتتصل ماسورة المياه بعنق الاختناق الذى تحدث به منطقة ضغط منخفض (خلخله) نتيجة لسرعة مرور البخار عند الاختناق ، ويتسبب عن ذلك سحب المياه الى داخل الماسوره ويرم مع البخار الى داخل الغلايه لملئها .

الحصان البخارى :

تقدر عادة قدرة الغلايه بالحصان البخارى (Boiler Horse Power (Boiler H.P.) وهى ليس لها اى علاقه بالحصان الميكانيكى . ويعادل الحصان البخارى لغلايه كمية الحرارة اللازمه لتحويل ٣٤ر٥ رطل من الماء الى بخار فى الساعه الواحده عند الضغط الجوى العادى (١٤ر٧ رطل/بوصه^٢) ودرجة حرارة ٢١٢^٥ ف . وقد اتخذت هذه الوحده على اساس انها كمية الحرارة التى تنتج من سطح تبادل حرارى بالغلايه قدره ١٠ قدم مربع فى مدة ساعه واحده .

والحرارة الكامنه لرطل واحد من البخار عند ضغط ١٤ر٧ رطل/البوصه المربعه ودرجة حرارة ٢١٢^٥ ف تساوى ٩٧٠.٤ B.T.U/Lb .

$$\text{Boiler H.P} = 34.5 \times 970.4 = 33479 \text{ BTU}$$

وبالوحدات المترية ، هى كمية الحرارة الناتجة من تحويل ١٥ر٦٥ كجم من الماء الى بخار فى الساعه الواحده عند الضغط الجوى العادى (١ر٠٣ كجم/سم^٢) ودرجة حرارة ١٠٠^٥ م على اساس انها كمية حرارة تنتج من سطح تبادل حرارى قدره متر مربع فى الساعه .

وبذلك يكون الحصان البخارى بالوحدات المترية :

$$\text{Boiler H.P.} = 15.65 \times 539 = 8435.35 \text{ kcal.}$$