

Chapter Five

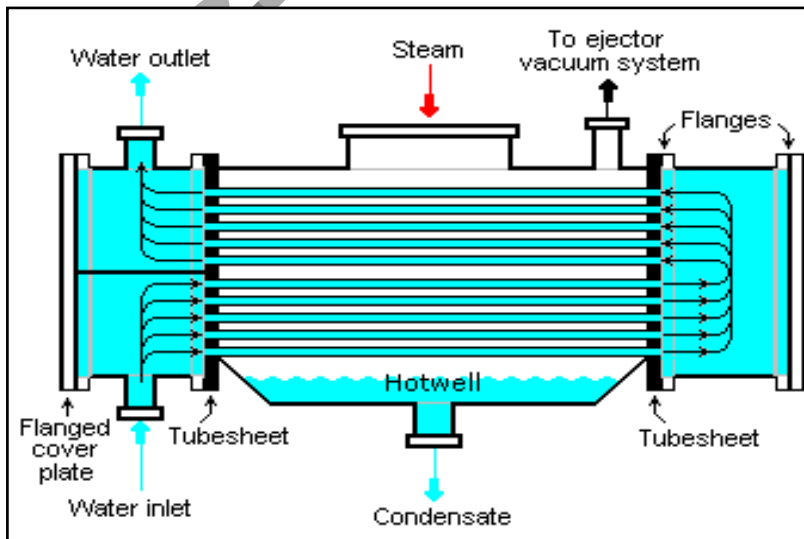
Steam Condensers

1-Introduction:

The functions of condensers in steam power plants are to condense the exhaust steam from the steam turbine. The recovery of exhaust steam in the condenser reduces the high quality (demineralized water) makeup feed water that must be added to the system from 100% when exhausting to atmosphere, to about 1 to 5%. The condenser also maintains exhaust vacuum pressure (about 25 mm of Hg absolute) and thereby increasing the work done by the prime mover and improving the cycle efficiency.

The condenser and other available heat exchanger including feed water heaters are merely heat transfer equipments which have no mechanical complexity, however it play important role in steam cycle

المقدمة: يستخدم مكثف البخار لأزاله الحرارة من البخار المغادر للتوربين واستعادة كميات ماء التغذية عاليه النوعية demi-water وإرجاعها مره أخرى لمولد البخار، حيث يقلل هذا الأسلوب كميات مياه التعويض من ١٠٠% إلى ما يقرب من ١ إلى ٥% . يقوم المكثف أيضا بالحفاظ على ضغط التخلخل الضروري لرفع كفاءة الدورة الحرارية عن طريق زيادة شغل التوربين. تعتبر المكثفات وباقي المبادلات الحرارية الأخرى في دوره البخار مثل مسخنات ماء التغذية معدات لانتقال الحرارة فقط وهي خاليه من التعقيد الى حد ما، وعلى الرغم من ذلك فإنها تلعب دورا أساسيا في أداء دوره البخار



2-The requirements for an efficient steam condenser

1. Maximum amount of steam condensed per unit of heat transfer area.
2. Minimum quantity of circulating coolant required.
3. Minimum heat transfer surface required per kW capacity
4. Minimum power drawn by the auxiliaries.

3-Elements of a condenser plant are:

1. Condenser body in which the steam is condensed.
١- بدن المكثف الذي تحصل فيه عملية تكثيف البخار.
2. A supply of cooling water.
٢- مصدر لمياه التبريد
3. Air extraction system: used to remove air and other non-condensable gases from the condenser.
٣- منظومة نزع الهواء : وهي المنظومة المختصة بنزع الهواء وباقي الغازات الغير قابلة للتكثيف للحفاظ على ضغط التخلخل.
4. Condensate extraction pump.
٤- مضخة نزع الماء المكثف: وهي المضخة التي تقوم برفع ضغط الماء المكثف إلى ضغط الجو وتسلم الماء إلى المستودع الساخن.
5. Various water circulation pumps which vary according to the unit type.
٥- مختلف المضخات لتدوير الماء وتختلف حسب نوعه الوحدة.
6. A hot well in which the condensed steam is discharged by the condensate extraction pump.
٦- المستودع الساخن: وهو الحوض الذي يتم فيه تجميع الماء المكثف.
7. Cooling Towers: This is used for re-cooling the cooling water (when a closed cooling cycle is used).
٧- أبراج التبريد وهي المنظومة التي تقوم بتبريد ماء التبريد، وتستخدم في دورات التبريد المغلقة.
- 8-Variou pumps which vary according to its function for example:

- Feed water pump: this is used to supply the boiler with feed water and it receive the water from hot well.
- Make-up water: This is used to supply the compensated water.

٨- مختلف مضخات الماء التي تختلف حسب الوظيفة مثل:

- مضخة ماء التغذية : حيث تزود المرجل بماء التغذية وتستلم الماء من المستودع الساخن.
- مضخة ماء التعويض : وتقوم بتزويد الدورة بماء التعويض.

4-Types of condensers:

- 1- Direct contact condensers.
- 2- Evaporative condensers.
- 3- Surface condenser.

تنقسم المكثفات إلى ثلاثة أنواع رئيسيه وهي:

مكثفات التماس المباشر والمكثفات التبخيرية والمكثفات ذات السطوح

4-1-Direct contact condenser:

This is the oldest type of condensers and also it called the mixing condensers. These types are not recommended for modern steam power plants due to feed water contamination. This type is sub-dived into three types:

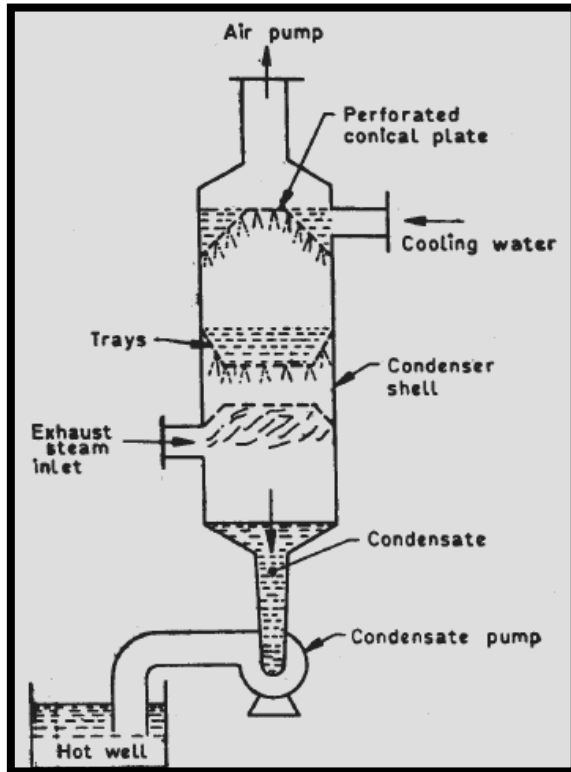
وهي أقدم أنواع المكثفات وتسمى مكثفات المزج أيضا ولا تستخدم هذه المكثفات حاليا في محطات القدرة بسبب التلوث الذي يصيب ماء التغذية من جراء مزجه مع ماء التبريد. تشابه هذه المكثفات open FWH بعملها مسخنات ماء التغذية المفتوحة.

A- Low level spray condensers:

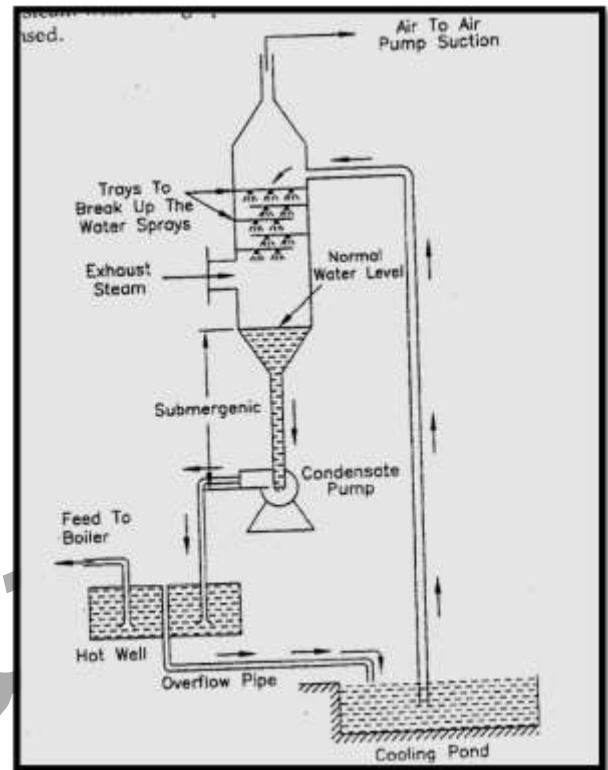
This is either counter flow or parallel flow.

- **Parallel Flow Type:** Here the steam and cooling water enter at the top of the condenser and flow downwards in parallel. The coldest water is thus in contact with hot steam and, therefore, it is less efficient.
- **Counter Flow Type:** Here, the steam flows upwards through the condenser, meeting the cooling water which flows downwards from the top. The air is removed at the top. In this type, since the hottest steam is

in contact with the hottest cooling water, it is thermodynamically the most efficient.



Spray condenser –counter flow



Spray condenser-parallel flow type

B- High level barometric condenser:

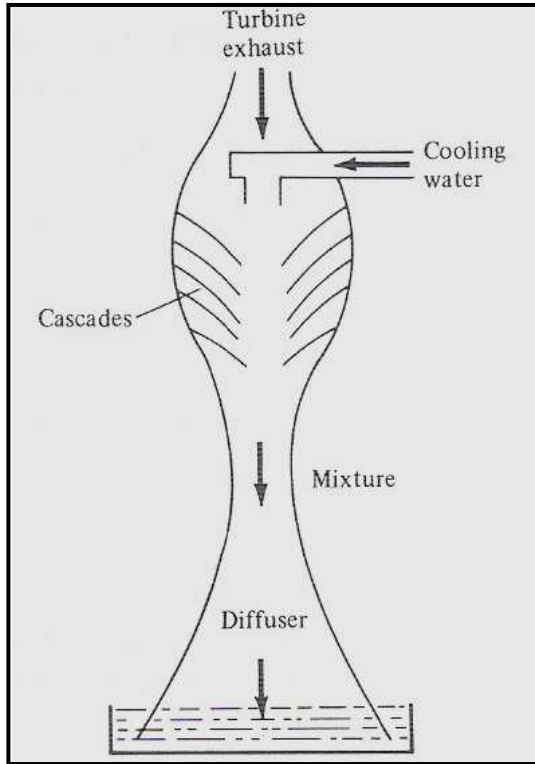
If the bottom of the condenser is not less than, say, 10.5 m above the level of the water in collection tank (hot well), condensate extraction pump is not needed and the condenser is self-discharged to atmospheric pressure.

المكثفات البارومترية عالية المستوى: في هذا النوع من المكثفات من الممكن اختزال مضخة الماء المتكثف وذلك باستخدام عمود الماء، حيث من الممكن ان يصل ارتفاع هذا النوع الى ١٠.٥ متر

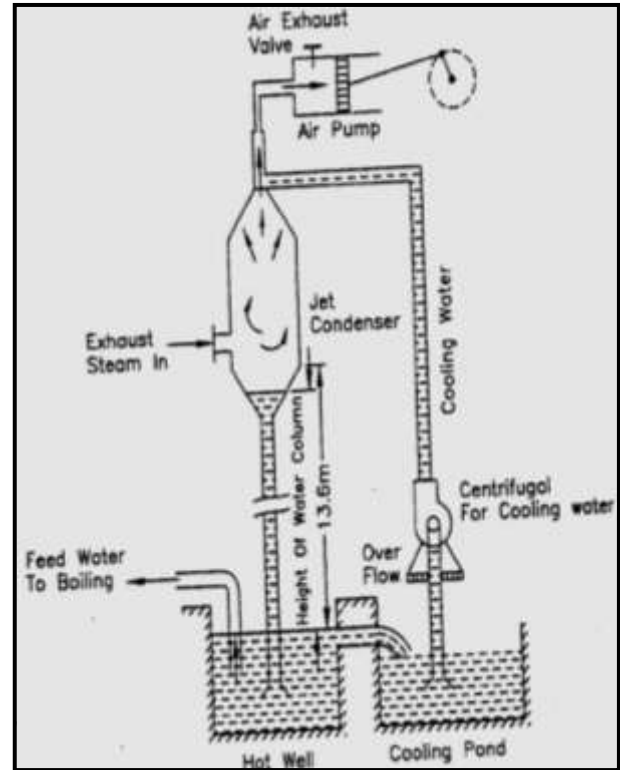
C- Low level ejector condenser:

المكثفات النفضية واطئه المستوى.

In this condenser, the height could be reduced by designing the condenser body as ejector. This condenser thus acts as a pump as well as a condenser.



Low level ejector condenser

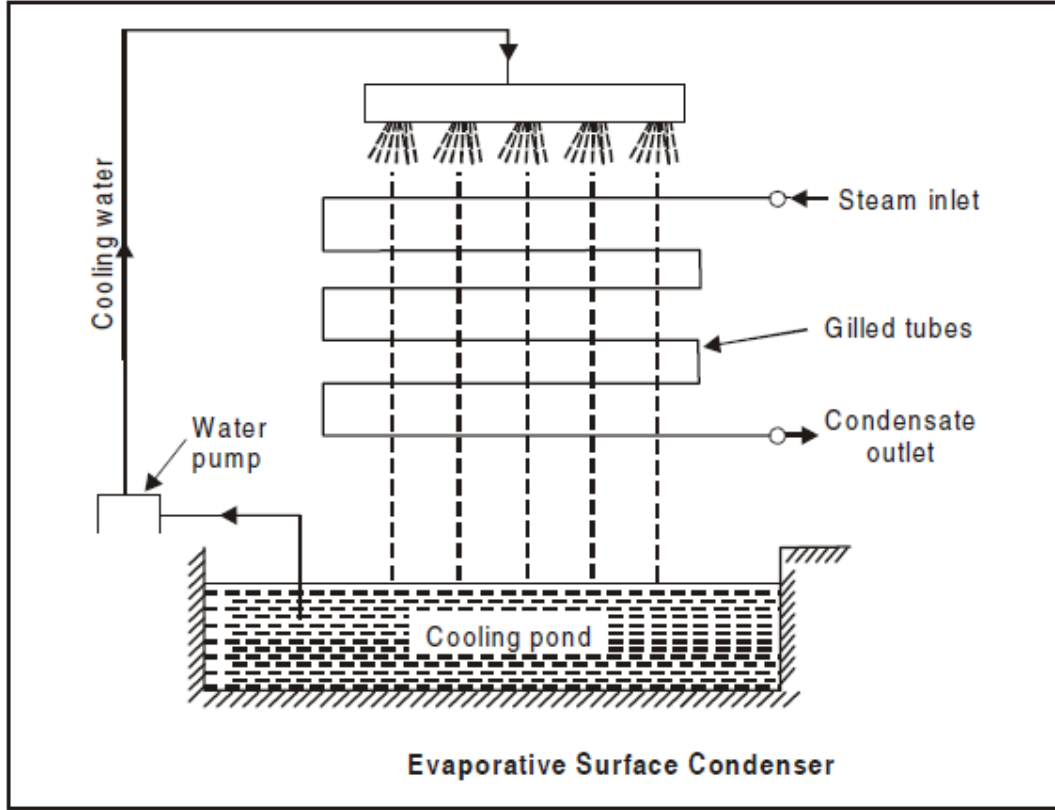


High level barometric condenser

4-2- Evaporative Condensers: In this condenser, the steam flows through a set of finned piping. Cooling water is sprayed from the top over the pipes. As it drips from one pipe to the other, it forms a thin film over the pipes. Air blowing across the pipes (by induced draught fans) rapidly evaporates the water film resulting in condensing of the steam flowing through the pipes. Several eliminators are placed at the top to save the cooling water. This type is considered as a combination of a surface condenser and cooling tower. It is very suitable for low capacity power plants and for desert climate where water is expensive or a small quantity of pure water is available.

المكثفات التبخيرية: يوضح الشكل أدناه مبدأ عمل المكثفات التبخيرية حيث يتم رش ماء التبريد فوق أسطح الأنابيب التي تحمل البخار المغادر للتوربين وبنفس الوقت يتم إمرار الهواء على الأنابيب المبتلة بواسطة مراوح لسحب الهواء فيقوم الهواء بتبخير الماء المرشوش الذي يقوم بدوره بسحب الحرارة من الهواء والبخار وبذلك تنخفض درجة حرارة الهواء والبخار (وهو نفس مبدأ عمل مبرده

الهواء التبخيريه) وللحفاظ على كميته الماء المرشوشة يتم تثبيت مرشحات أعلى المرشحات وظيفتها أعاده قطرات الماء العالقة. تمثل المكثفات التبخيريه حاله دمج بين المكثفات ذات السطوح وأبراج التبريد معا ويفضل استخدامها لمحطات ألقدره قليله السعه وفي الأماكن الصحراوية الجافة حيث يكون محتوى الرطوبة واطئ.



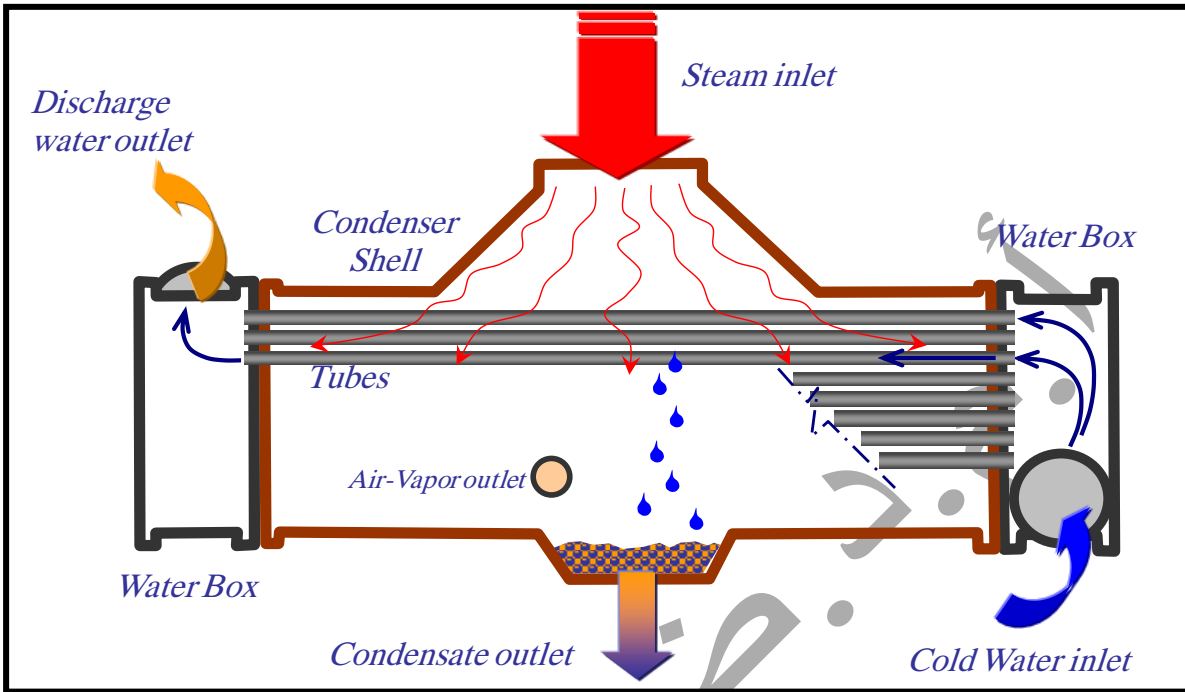
4-

3- Surface Condenser

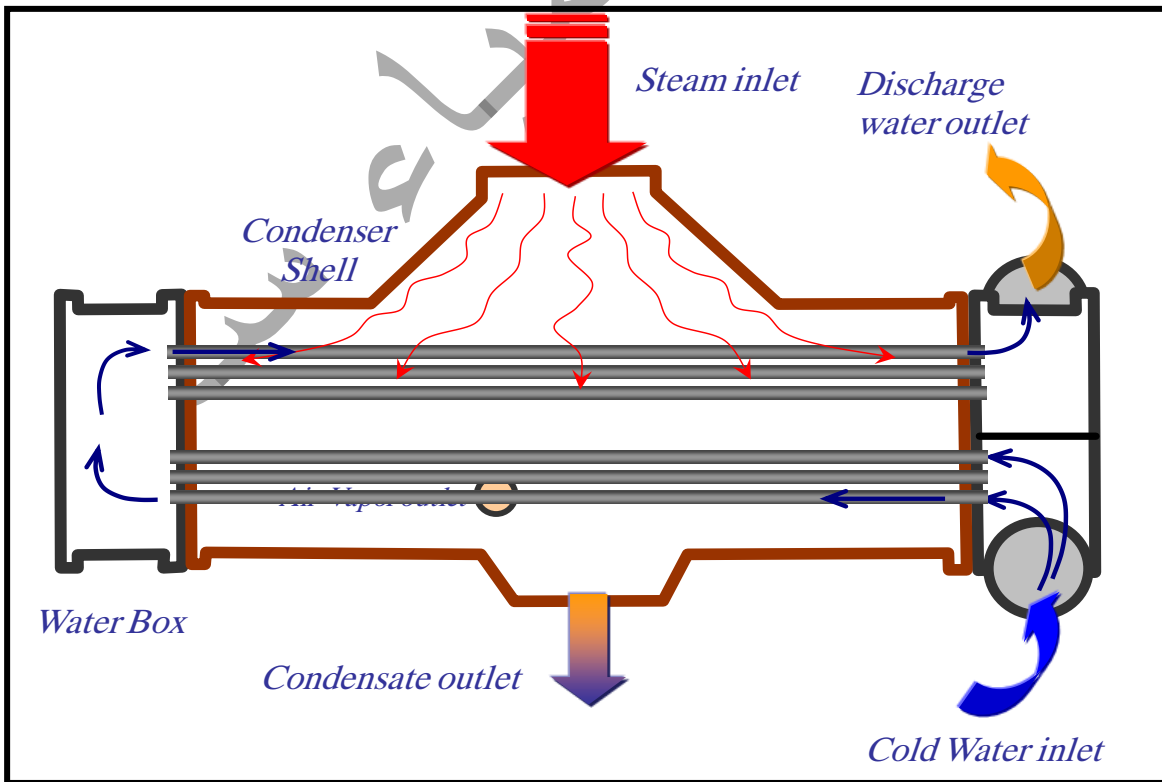
This type is preferred to use in modern power plants. The usual construction of this type is that there is a cast iron or steel shell fitted with a tube bundle fitted at each end. The usual flow pattern is that water flows through the tubes and the steam is condensed in the shell. The steam leaving the low pressure turbine enters the condenser at the top of the shell. The steam after being condensed leaves the condenser through a hole at the bottom of the shell. The surface condensers may be single pass or two pass.

المكثفات ذات السطوح: وهي النوعية الشائعة الاستخدام في محطات ألقدره حاليا وتتكون من قشره تكون البدن ويجري فيها البخار من الاعلى الى الاسفل. وتخرقها مجموعه هائلة من shell خارجية

الأنابيب يجري فيها ماء التبريد ولذلك تسمى في بعض الأحيان المكثفات ذات القشرة والأنابيب وتكون على نوعين ذات ممر واحد وأخرى ذات ممرين. shell and tubes condensers.



Down flow surface condenser -one pass



Down flow surface condenser- two pass

5-Types of cooling water cycles:

There are two types of cooling water cycles which are open and closed. In the open cycle, cooling water is drawn from the source (river or lake). The cooling water is pre-treated before sending to the condenser's tubes. After receiving the condenser heat, the cooling water is circulated in long channel around the plants. This will eliminate the "thermal pollution" which is caused by high cooling water temperature. For the closed cooling cycle, the cooling water is re-circulated and re-cooled using the cooling towers. The cooling towers are classified into two types: wet and dry. In the wet type, air cools the water via direct contact while in the dry type air does not mix with the cooling water.

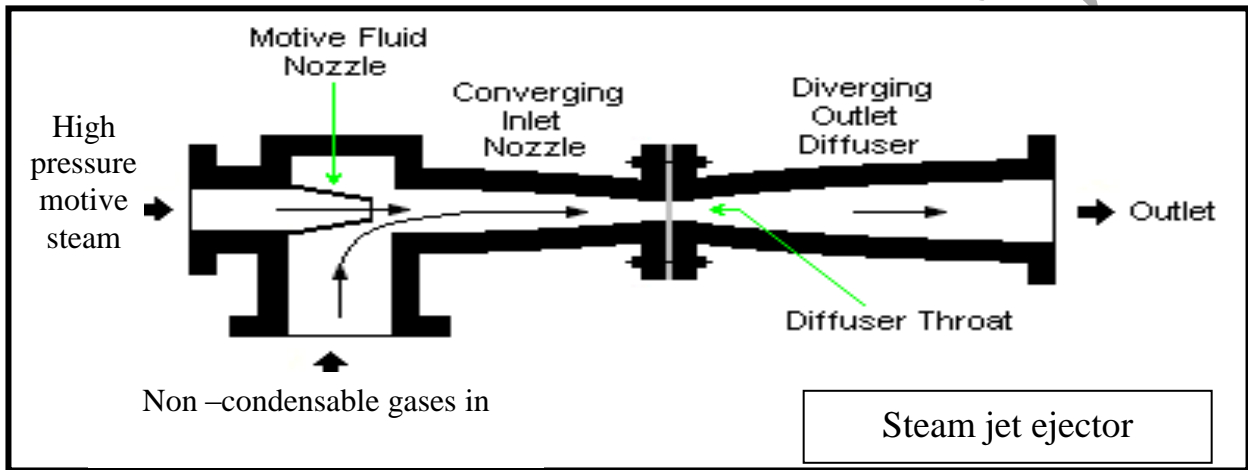
أنواع دورات التبريد

هناك نوعين من دورات مياه التبريد المستخدمة حالياً في محطات ألقدره، دوره مفتوحة وأخرى مغلقة. يتم في الدورة المفتوحة سحب مياه التبريد من النهر المجاور وتتم معالجته أولياً لأزاله الأطيان والنباتات المائية العالقة للحيلولة دون انسداد أنابيب مياه التبريد التي تخترق القشرة. وبعد مغادره ماء التبريد للمكثف يتم تدويره في مجاري طويلة قبل إعادته إلى النهر المجاور لتقليل ظاهره التلوث الحراري thermal pollution. أما في الدورة المغلقة فيتم تبريد مياه التبريد بواسطة أبراج تبريد وتستخدم هذه التقنية في حاله ندره مياه التبريد. وتكون أبراج التبريد على نوعين نوعيه جافه ونوعيه رطبه. يتم في النوعيه الرطبه تبريد ماء التبريد عن طريق التماس المباشر أما في النوعيه الجافة فلا يوجد تماس مباشر بين الهواء وماء التبريد.

6-The Air Ejector:

The removing of leaked air into the steam cycle is called "Deaeration". To perform this task, a special designing pump is used which is called "Steam jet ejector". This special pump is mounted on the condenser. In general, the deaeration process is performed using open feed water heater in which the steam jet is mounted.

نازع الهواء تدعى عملية أزاله الغازات غير قابله للتكثيف non-condensable gases (والتي تشمل بالدرجة الأساس الهواء المتسرب إلى الدورة بسبب الضغط أخوائي للمكثف أضافه إلى بعض الغازات الناتجة من تحلل الماء وتفاعله مع العناصر الأخرى في مختلف نواحي المحطة) تدعى بـ deaeration أي نزع الهواء، وتتم عملية الطرد هذه بواسطة معدة خاصة هي نازع الهواء ذو النفط البخاري steam jet air ejector والذي يثبت على المكثف. وحاليا تتم عملية نزع الهواء بواسطة معدة اكبر (من ضمنها نازع الهواء) تسمى بـ deaerator وهو عبارة عن مسخن ماء تغذيته مفتوح ومثبت عليه نازع الهواء.



7-The side effects of air and non-condensable gases:

- 1- The pressure of air in the condenser lowers the partial pressure of steam, which means steam, will condense at a lower temperature and that will require greater amount of cooling water.
- 2- Results in an increase in the condenser pressure which limits the useful work output from the turbine and thereby lowering the thermal efficiency.
- 3- It reduces the rate of condensation and boiling, because air having poor thermal conductivity impairs the overall heat transfer.
- 4- Some elements have chemical side effects. For example, oxygen causes corrosion especially in boiler. Also, hydrogen tends to extract carbon from the pipe material and causes material brittleness.

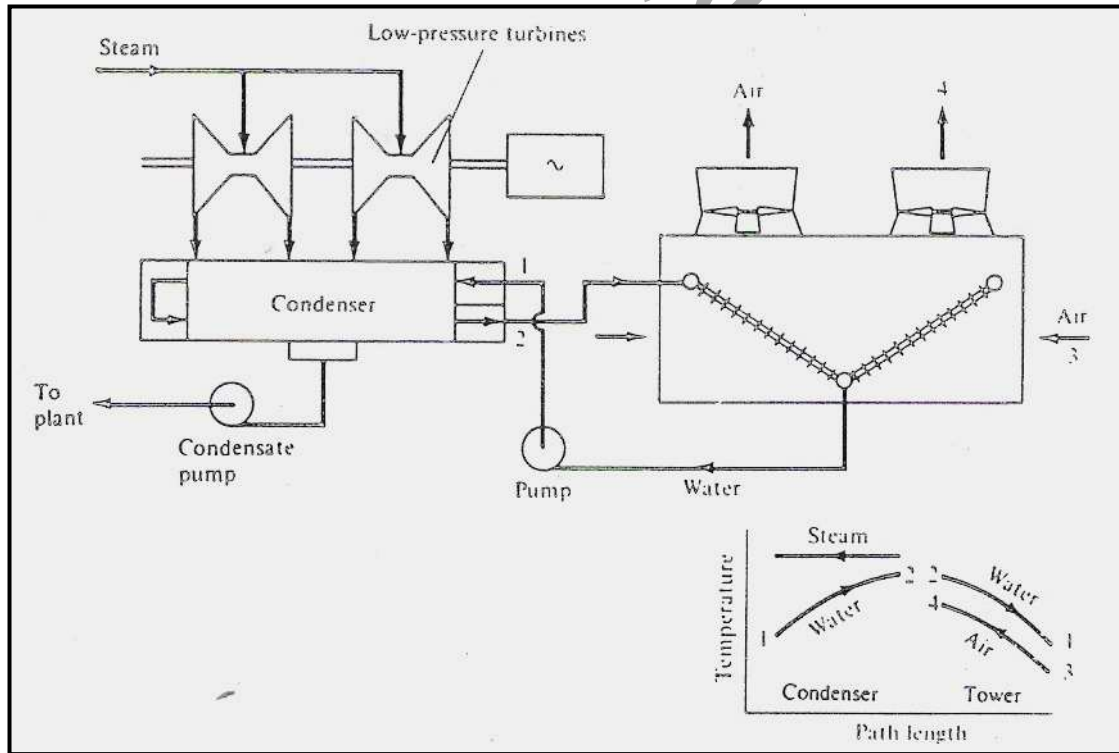
التأثيرات الجانبية للهواء والغازات الغير مكثفه: تشتمل التأثيرات الجانبية للهواء المتسرب إلى الدورة على:

١- يقلل من ضغط البخار وبالتالي تزداد الحرارة الكامنة للتكثيف latent heat وبالتالي تكون هناك حاجة ماء تبريد بمعدل اكبر.

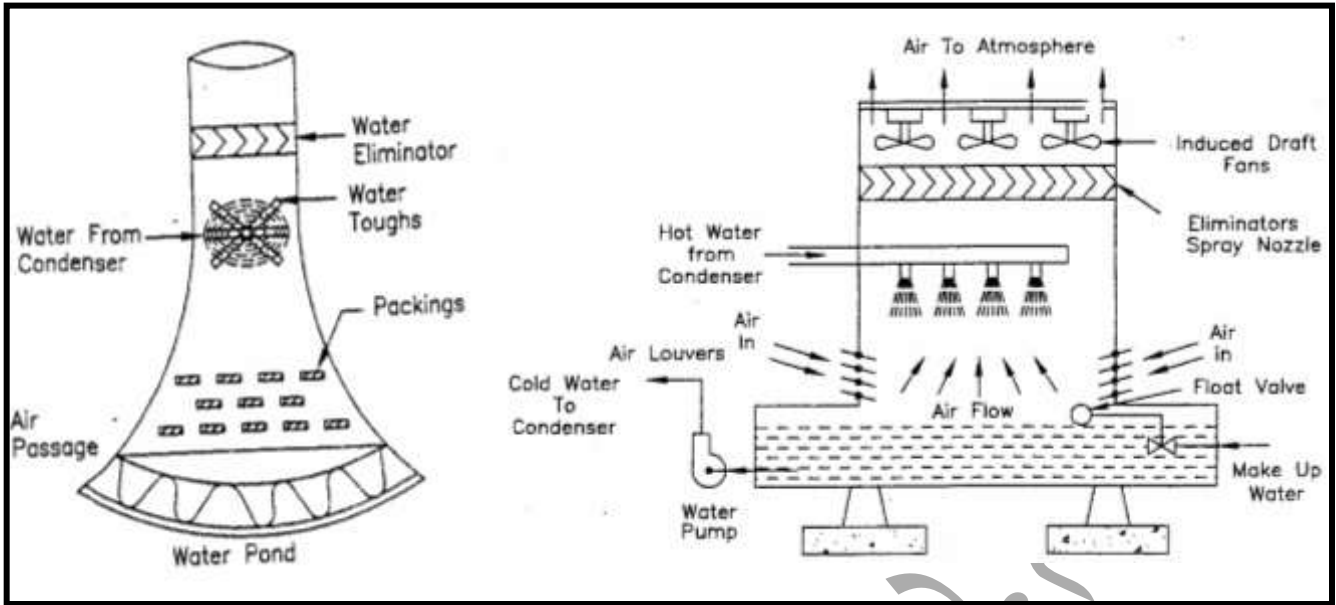
٢. يؤدي إلى رفع ضغط المكثف وبالتالي يقلل شغل التوربين مؤديا إلى تقليل الكفاءة الحرارية.

٣. تقلل من معدل انتقال الحرارة في المكثف أو المرجل لتكوينها طبقة عازله insulation على جدران الأنابيب وبالتالي تقلل كفاءة المرجل والمكثف وكافه مسخنات ماء التغذية المغلقة حيث تجري عمليات التبادل الحراري.

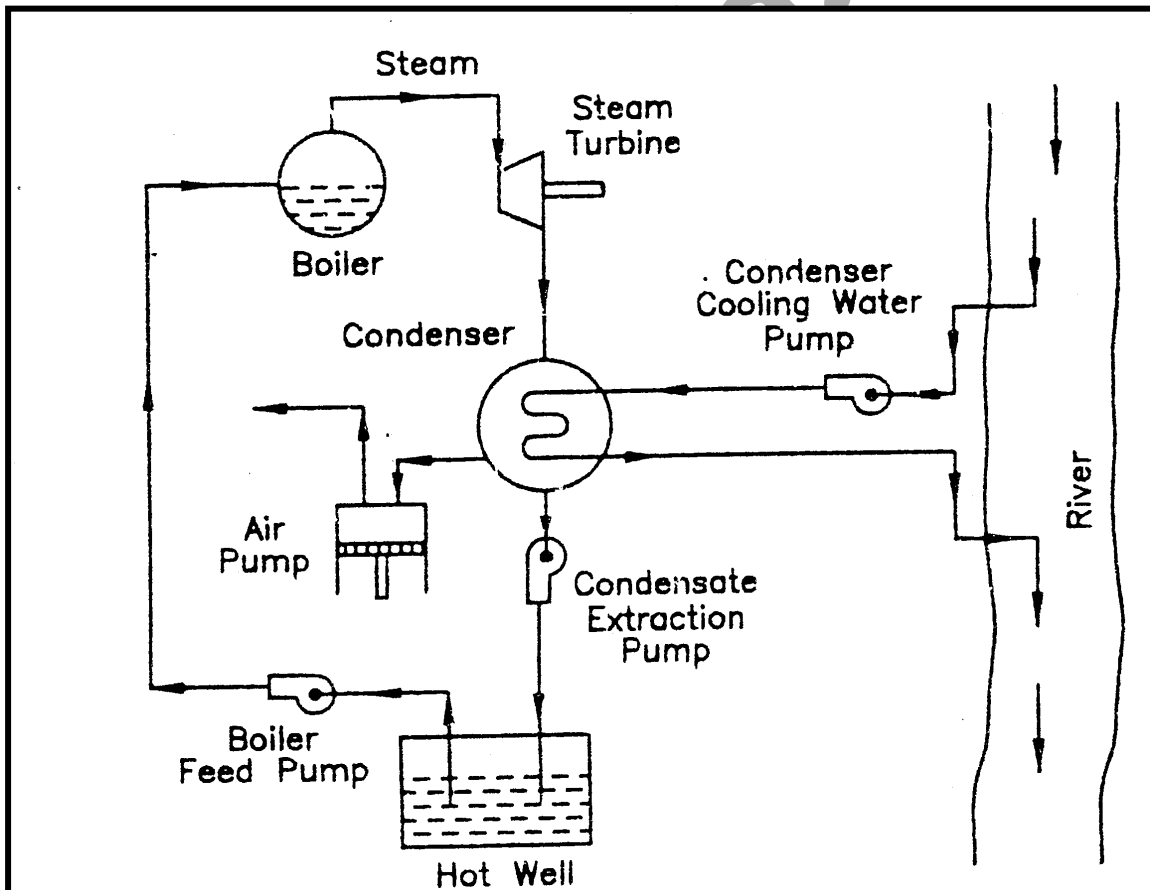
٤. لبعض العناصر تأثيرات كيميائية جانبية، فمثلا الأوكسجين يسبب التآكل وخاصة في وحده المرجل أما الهيدروجين فيقوم بسحب الكربون من المعادن ويسبب ظاهره هشاشة المعدن material brittleness



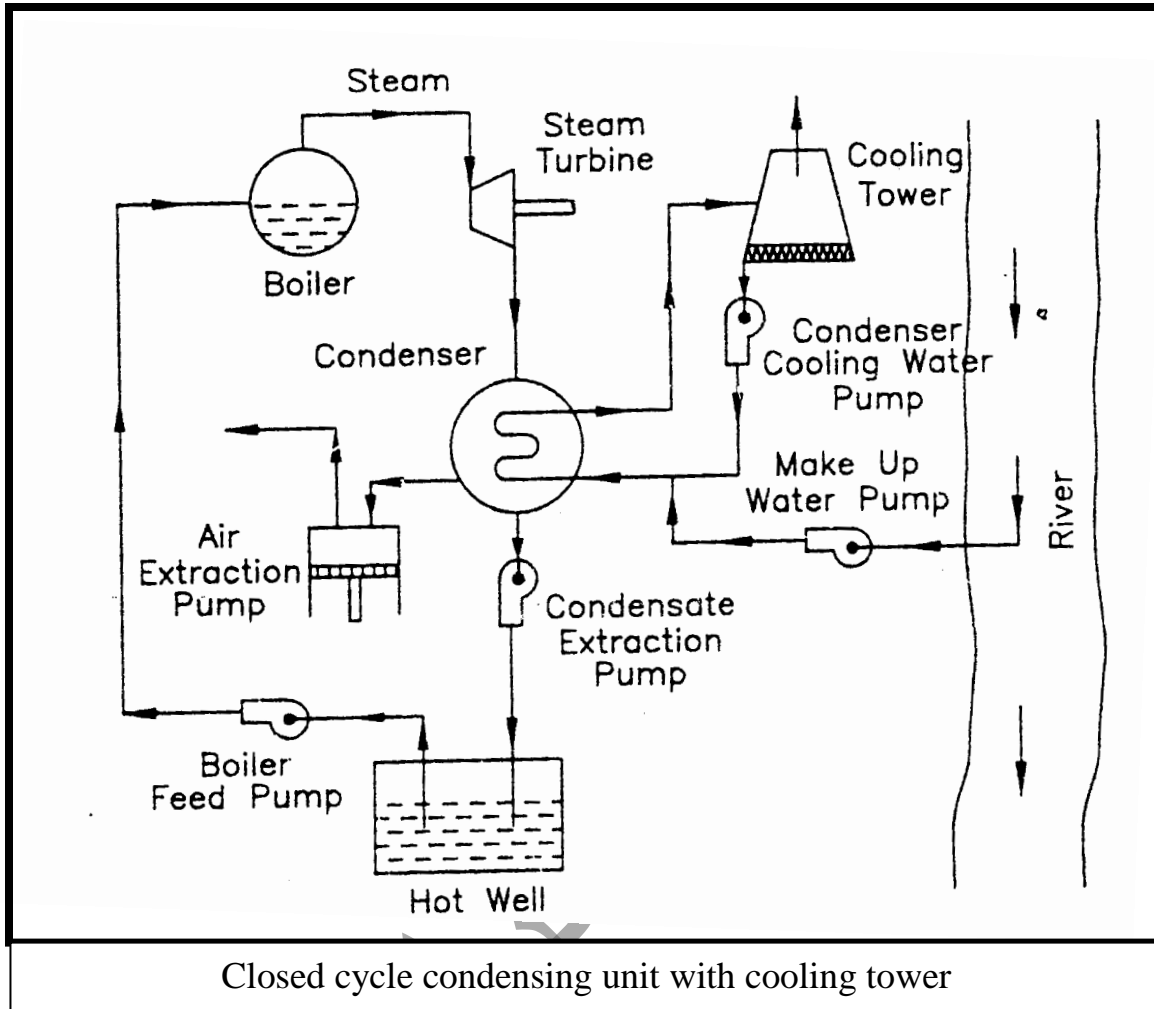
Dry cooling Tower



The wet cooling tower



Open cycle condensing system

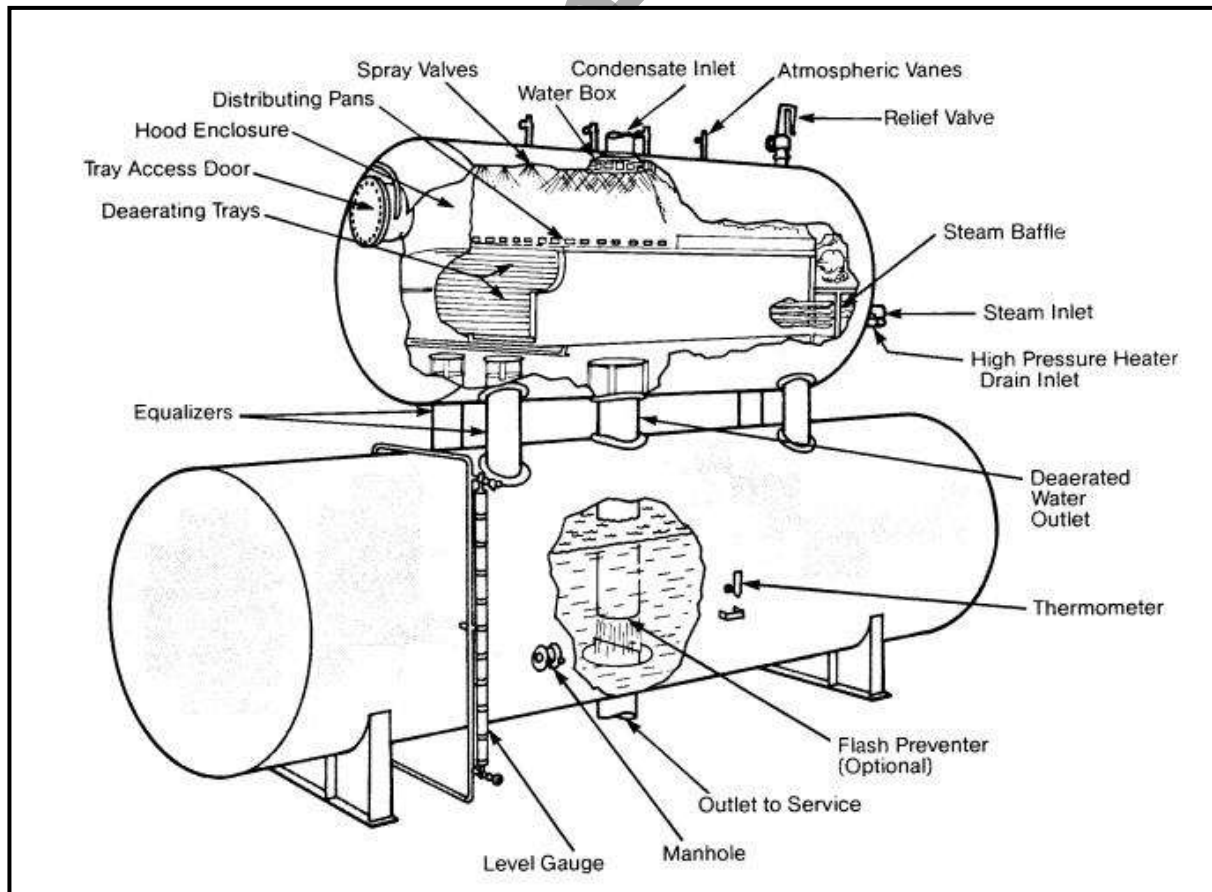
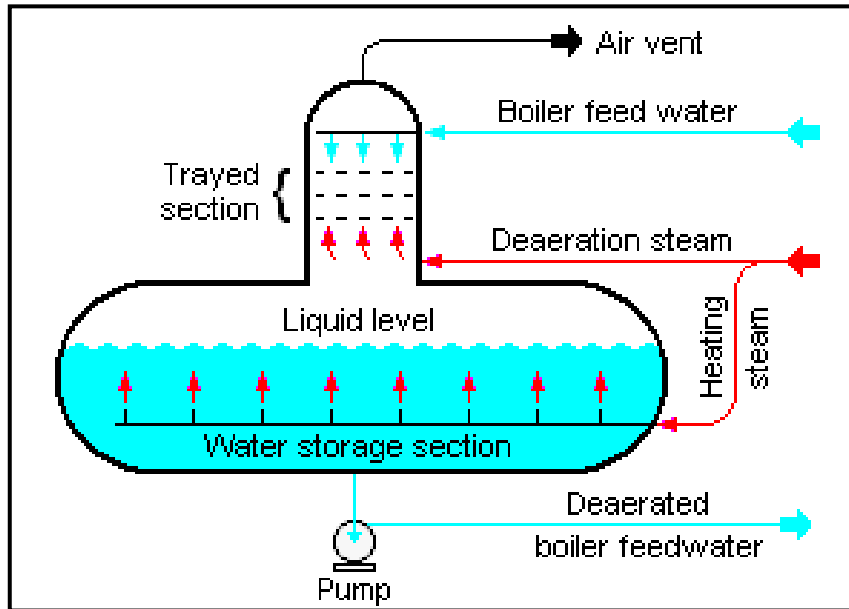


8-Deaerator

The deaerator is an open feed water heater with steam jet ejector. This device is widely used for the removal of non-condensable gases from the feed water to steam-generating boilers. It is usually mounted directly before the steam generator and has three types:

1. spray type deaerator
2. tray type deaerator
3. combined spray –tray deaerator

مسخن نازع الهواء إن مسخن نازع الهواء هو عبارة عن مسخن ماء تغذية مفتوح open feed water heater يقوم علاوة على تسخين ماء التغذية بنزع الهواء المتسرب إلى الدورة. يقع مسخن نازع الهواء قبل المرجل وتتبعه مباشرة مضخة ماء التغذية feed water pump . تحتوي كل محطات البخار الحديثه على مسخن نازع الهواء يكون مسخن نازع الهواء على ثلاثة أنواع.



9-Steam condenser performance analysis:

In this section, the surface condenser will be analyzed. This includes;

- 1- The amount of leaked air into the condenser shell.
- 2- The vacuum efficiency.
- 3- The condenser efficiency.
- 4- The amount of heat energy transferred from the steam to the cooling water and the rise in cooling water temperature.

تحليل أداء مكثفات البخار: سوف يتم التطرق إلى أداء المكثفات ذات السطوح surface condenser

كونها الأكثر شيوعاً في الاستخدام. ويشمل التحليل الحصول على معلومات تخص ما يلي:

- ١- كمية الهواء المحتواة في قشره المكثف والتي تشارك البخار في الحيز. ٢- كفاءة التخلل.
- ٣- كفاءة المكثف ٤- كمية الحرارة المنتقلة من البخار إلى مياه التبريد والارتفاع الحاصل في درجة حرارة ماء التبريد.

10-Dalton law of partial pressure

According to Dalton's law of partial pressures the pressure exerted by a mixture of two gases or a gas and a vapor is equal to the sum of the pressures which each fluid would exert if occupying the same space alone. So, for the condenser shell, the pressure exerted by the condenser (P_c) is the sum of the partial pressure of air and steam and air:

قانون دالتون للضغوط الجزئية ينص قانون دالتون للضغوط الجزئية على أن الضغط الكلي لمزيج من الغازات المحتواة في حجم معين يساوي مجموع الضغوط الجزئية للغازات المحتواة في ذلك الحجم علماً إن كل غاز يشغل كامل الحجم. وتطبيق هذا القانون على المكثف يبين أن ضغط المكثف (الأقل من الجو) يكون مساوي إلى مجموع ضغط الهواء المتبقي في القشرة (حيث لا يوجد فراغ مطلق) وضغط البخار المساوي إلى ضغط التشبع المقابل إلى درجة حرارة الماء المكثف في البئر الساخن hot well (إذا لم يوجد تبريد فائق)

$$p_c = p_a + p_s$$

Where:

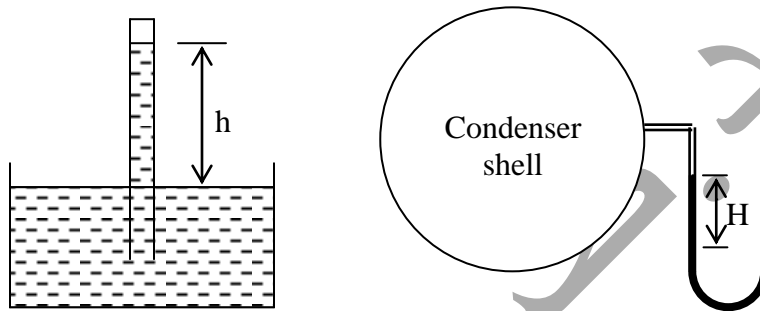
p_c : The condenser pressure.

p_a : The air partial pressure.

p_s : The steam partial pressure which is equal to the saturation pressure at the steam temperature (steam tables).

If a manometer is used to measure the condenser pressure, then:

$$p_c = p_{atm} - \rho g H$$



Where (H) is the vacuum reading.

(ρ) liquid density in the manometer.

(P_{atm}) :is the atmospheric pressure which is usually measured by a barometer.

$$p_{atm} = \rho g h$$

Where (h) is the barometer reading.

If we use the same liquid in the manometer and barometer then it can be written:

$$p_c = \rho g (h - H)$$

By assuming that the condenser volume is (V), then this volume is occupied by the leaked air and steam. So:

$$V = m_s v_s = \frac{m_s}{\rho_s} = m_a v_a = \frac{m_a}{\rho_a} \quad \Rightarrow \therefore \frac{m_a}{m_s} = \frac{v_s}{v_a}$$

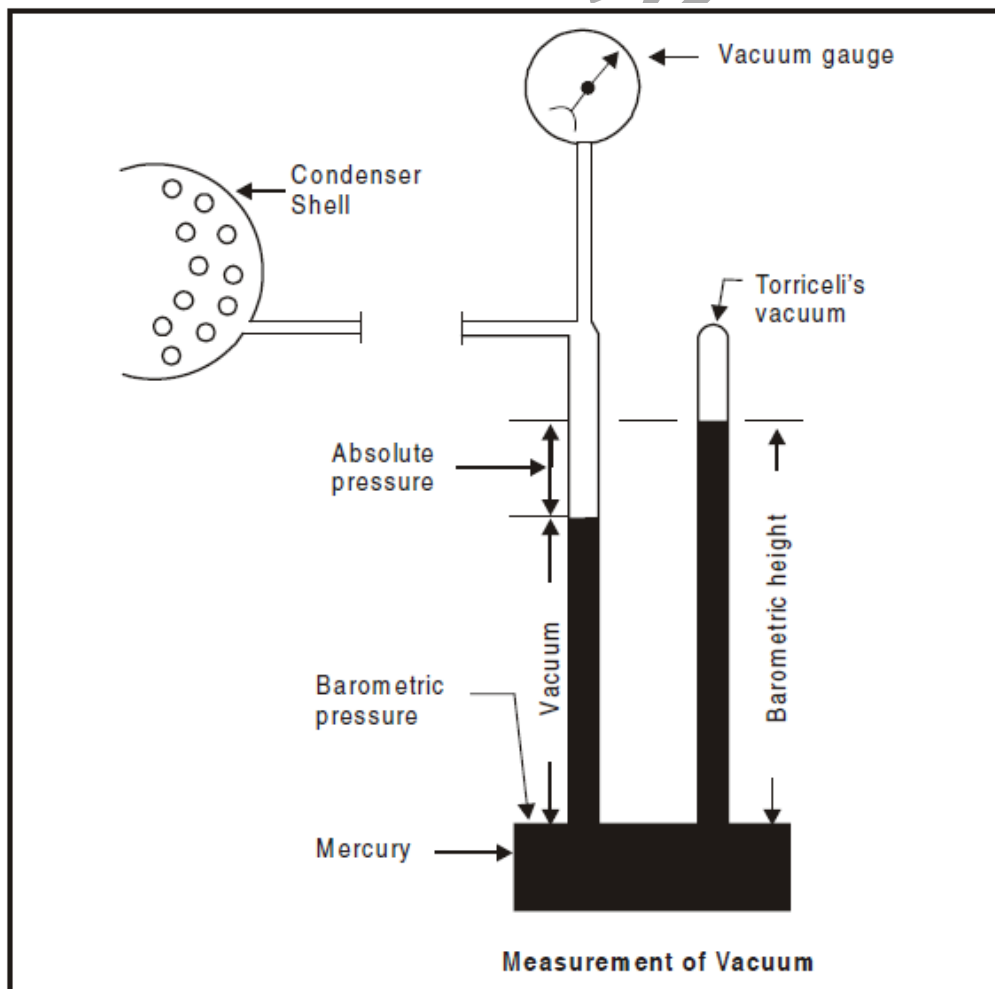
Where (v, ρ, m) are the specific volume, density and mass respectively.

Since air can be considered as a perfect gas, then the mass of leaked air per unit volume of condenser shell is:

$$\rho_a = \frac{1}{v_a} = \frac{m_a}{V} = \frac{P_a}{R_a T_a}$$

For the steam, the mass of per unit volume of condenser shell is:

$$\rho_s = \frac{1}{v_s} = \frac{m_s}{V} \neq \frac{P_s}{R_s T_s}$$



11-Vacuum efficiency:

The vacuum reading (H) refer to how much the vacuum inside the condenser is efficient. The present of air inside the condenser will affect the vacuum reading. Vacuum efficiency depends upon the amount of air present in the condenser. If there is no air present in the condenser, partial pressure of steam will be the same as the condenser pressure and the vacuum reading will be maximum (ideal):

$$ideal\ vacuum = p_{atm} - p_s$$

The actual vacuum is the usual case where air is present:

$$actual\ vacuum = p_{atm} - p_c$$

The vacuum efficiency is the ratio between the actual to the ideal vacuum reading:

$$\eta_{vacuum} = \frac{actual\ vacuum}{ideal\ vacuum} = \frac{p_{atm} - p_c}{p_{atm} - p_s}$$

كفاءة التخلخل : تعطي قراءة التخلخل H دلالة على كفاءة التخلخل فكلما كانت هذه القيمة كبيره كلما كان التخلخل جيدا داخل المكثف. إن وجود الهواء داخل قشره المكثف من شأنه أن يقلل من قراءة التخلخل وعليه فان القيمة المثالية لقراءة التخلخل سوف نحصل عليها لو كانت كتله الهواء صفر داخل القشرة وهذه الحالة لا يمكن الوصول إليها مطلقا ولكن يمكن الاعتماد عليها كمرجع لحساب كفاءة التخلخل. إذن تكون القيمة المثالية لقراءة التخلخل مساوية إلى ضغط الجو ناقصا ضغط المكثف عندما يكون ضغط الهواء صفر (أي ضغط البخار فقط)

12-Condenser efficiency

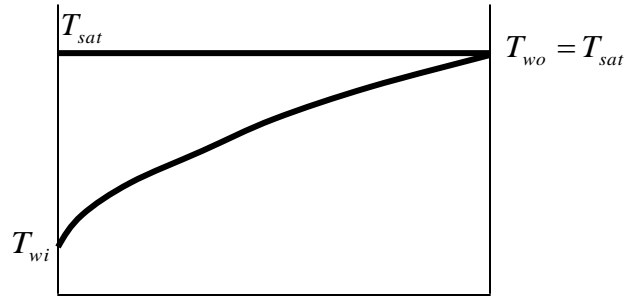
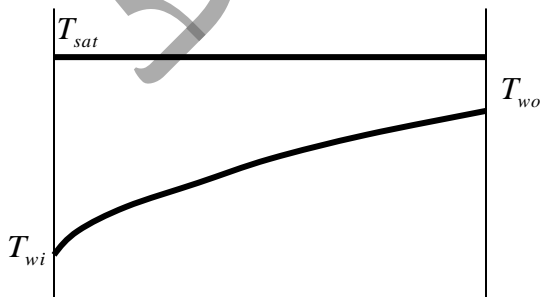
The condenser efficiency is defined as:

$$\eta_{co} = \frac{\text{Actual rise in temperature of cooling water}}{\text{Maximum rise in the temperature of cooling water}}$$

The temperature of condensate is equal to the saturation temperature of steam corresponding if there is no sub-cool. Ideally, the maximum outlet temperature of the cooling water is steam saturation temperature ($T_{wo} = T_{sat}$). This situation could not be attained due to thermal resistance.

$$\eta_{condenser} = \frac{T_{wo} - T_{wi}}{T_{sat} - T_{wi}}$$

كفاءة المكثف إن المكثف عبارة عن معدة لانتقال الحرارة فقط ، ويكون مصطلح الكفاءة محير إذا عرفنا إن معدل انتقال الحرارة من البخار يساوي معدل انتقال الحرارة إلى ماء التبريد، فكيف لنا أن نضع تعبير مناسب لكفاءة المكثف؟ لو أمعنا النظر إلى تغير درجة الحرارة لكل من البخار وماء التبريد نلاحظ أن البخار لا يعاني من تغير في درجة الحرارة T_{sat} (حيث يتم أزاله جزء الحرارة الكامنة latent heat) إلا في حالة التبريد الفائق sub-cool أما ماء التبريد فيعاني من زيادة في درجة الحرارة $T_{wi} \rightarrow T_{wo}$ وان قيمه T_{wo} تكون اقل من T_{sat} بسبب المقاومة الحرارية thermal resistance وان المكثف الجيد هو ذلك المكثف الذي يستطيع أن يرفع درجة حرارة الماء إلى درجة حرارة التشبع للبخار وهي حالة مثاليه كون المقاومة الحرارية دائما موجودة. ويمكن توضيح ذلك بالرسومات أدناه.



13-Energy balance for the condenser:

By assuming the condenser shell is isolated, then the heat energy rejected by the steam is equal to the heat energy received by the cooling water.

$$Q_{out} = \dot{m}_{cw} C_{p_w} (T_{wo} - T_{wi}) = \dot{m}_s [(h_f + x h_{fg}) - h_w]$$

Where : \dot{m}_s, \dot{m}_{cw} are the mass flow rates of steam and cooling water.

(x): the dryness fraction of steam entering the condenser.

(h_w) is the condensate enthalpy which is equal to ($4.18 * T_w$). Keeping in mind that the condensate temperature must be in degree ($^{\circ}C$).

For the case where there is no under cooling, the balance equation will be:

$$Q_{out} = \dot{m}_w C_{p_w} (T_{wo} - T_{wi}) = \dot{m}_s x h_{fg}$$

This heat energy could be calculated using the heat transfer correlation:

$$Q_{out} = U_i A_i \Delta T_{LMTD} = U_o A_o \Delta T_{LMTD}$$

Where: U_i, U_o are the inside and outside overall heat transfer coefficients.

A_i, A_o : are the inside and outside surface areas. These are equal for thin tubes and not equal for thick tubes.

$$A_i = 2\pi r_i L n$$

$$A_o = 2\pi r_o L n$$

مساحات انتقال الحرارة الداخلية والخارجية تكون متساوية للأنابيب النحيفة thin وغير متساوية للأنابيب السمكة thick

n : The number of tubes.

r_o, r_i : The outside and inside.

L : Tube length.

The overall heat transfer coefficient are give in terms of thermal resistance:

$$U_i A_i = U_o A_o = \frac{1}{R_{total}}$$

The thermal resistance is given by:

$$R_{total} = \frac{1}{\bar{h}_i A_i} + \frac{\ln \frac{r_i}{r_o}}{2\pi k L} + \frac{1}{\bar{h}_o A_o}$$

Where: \bar{h} is the heat transfer coefficient.

k : The conductivity of the pipe.

The above thermal resistance equation is for the new condenser. For old condenser the fouling factors must be included.

$$R_{total} = \frac{1}{\bar{h}_i A_i} + \frac{R_{fi}}{A_i} + \frac{\ln \frac{r_i}{r_o}}{2\pi k L} + \frac{R_{fo}}{A_o} + \frac{1}{\bar{h}_o A_o}$$

Where: R_f is the fouling factors.

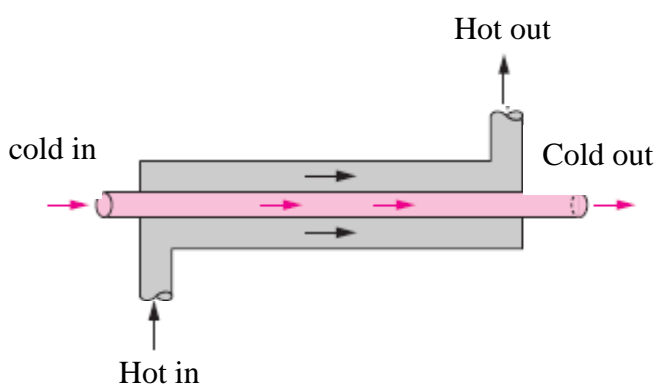
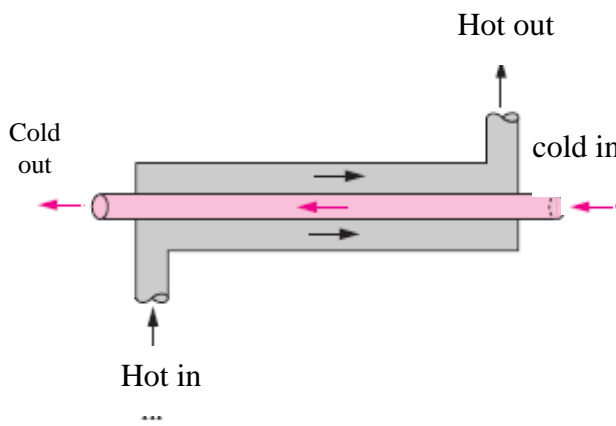
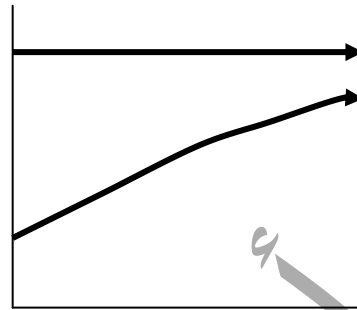
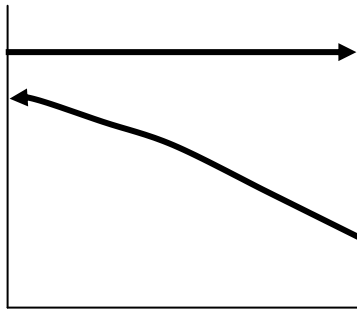
The term ΔT_{LMTD} refer to the log mean temperature difference.

$$\Delta T_{LMTD} = \frac{\Delta T_{inlet} - \Delta T_{exit}}{\ln \frac{\Delta T_{inlet}}{\Delta T_{exit}}}$$

Where: $\Delta T_{inlet}, \Delta T_{exit}$ are temperature difference between the cooling water and steam at the inlet and outlet of the condenser. These will depend on the type of flow.

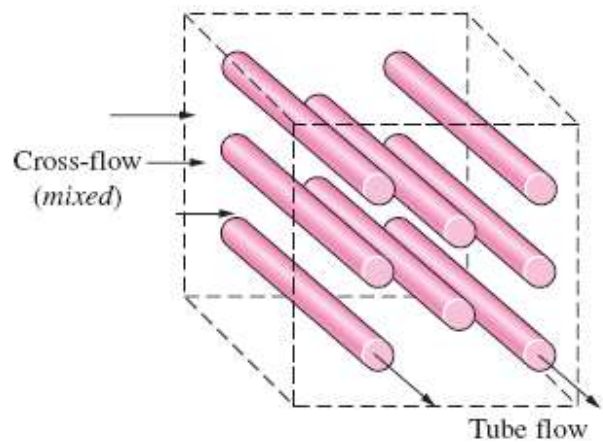
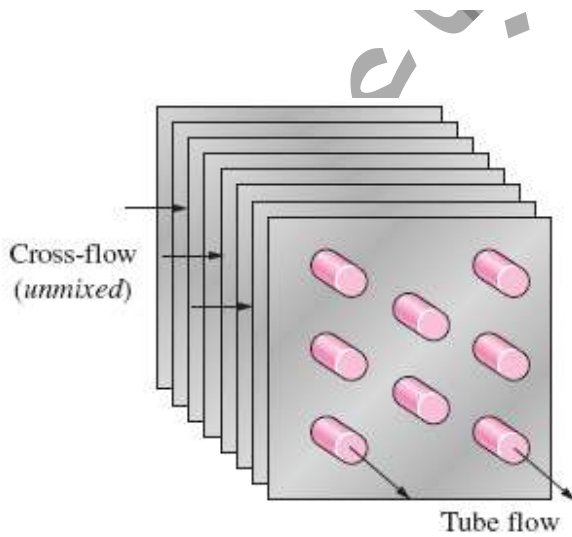
There are three types of flow:

- 1- Parallel flow. 2- Counter flow. 3- Cross flow



Counter flow

Parallel flow



For the parallel flow:

$$\begin{cases} \Delta T_{inlet} = T_{sat} - T_{wi} \\ \Delta T_{exit} = T_{sat} - T_{wo} \end{cases}$$

For the counter flow:

$$\begin{cases} \Delta T_{inlet} = T_{sat} - T_{wo} \\ \Delta T_{exit} = T_{sat} - T_{wi} \end{cases}$$

For the cross flow, the counter flow is assumed with correction factor.

اما الجريان المتقاطع فنعتبر ان الجريان متعاكس ونضيف معامل تصحيح F على معادلة انتقال الحرارة فيكون:

$$Q_{out} = U_i A_i F \Delta T_{LMTD}$$

Remark:

It can be shown that the condenser efficiency for the case of no under-cooling is given by:

من الممكن اثبات ان كفاءة المكثف تعطى بالمعادلة الاتيه فقط في حالة عدم وجود تبريد فائق:

$$\eta_{condenser} = 1 - \text{Exp}\left(-\frac{U_i A_i}{\dot{m}_w C_{p_w}}\right) = 1 - \text{Exp}\left(-\frac{U_o A_o}{\dot{m}_w C_{p_w}}\right)$$

Example 1:

The following observations were recorded during a test on a steam condenser of counter flow:

Barometer reading	765 mmHg
Vacuum reading	710 mmHg
Steam and air temperature	35 °C
Condensate temperature	28 °C
Condensate collected per hour	2 tons
Cooling water collected per hour	60 tons
Inlet cooling water temperature	10 °C
Exit cooling water temperature	25 °C
Cooling water tubes specification	Thin tubes D=2 cm ,L=5 m ,n=350,

Determine:

1. The vacuum efficiency.
2. The condenser efficiency.
3. Quality of steam x entering the condenser.
4. The overall heat transfer coefficient
5. Mass of air per m^3 of condenser volume.

Solution:

$$1. \eta_{\text{vacuum}} = \frac{\text{vacuum reading}}{P_{\text{atm}} - P_s} = \frac{710}{765 - 42.2} = 98.23\%$$

where $p_s = 0.05622 \text{ bar} = 42.2 \text{ mmHg}$ at $T_s = 35$

$$2. \eta_{\text{con}} = \frac{T_{wo} - T_{wi}}{T_s - T_{wi}} = \frac{25 - 10}{35 - 10} = 60\%$$

3.

$$Q = \dot{m}_w C p_w (T_{wo} - T_{wi}) = \dot{m}_s (h_f + x h_{fg} - C p_w T_w)$$

$$\therefore 60 * 4.2 * (25 - 10) = 2(146.6 + x * 2418.8 - 4.2 * 28)$$

$$\Rightarrow x = 0.769$$

4.

$$Q = UA \Delta T_{LMTD}$$

$$\frac{60000}{3600} * 4.2 * 1000 * (25 - 10) = U * (\pi * 0.02 * 5 * 350) * [(18 - 10) / (\ln \frac{18}{10})]$$

$$U = 701.6 \text{ W} / \text{m}^2 \cdot \text{K}$$

5.

$$p_c = \text{Barometer reading} - \text{Vacuum reading} = 765 - 710 = 55 \text{ mmHg}$$

$$\therefore p_c = p_s + p_a$$

$$p_a = 55 - 42.2 = 12.8 \text{ mmHg}$$

$$= 12.8 * 10^{-3} * 9.81 * 13.6 * 1000 = 1707.73 \text{ Pa}$$

$$\therefore \frac{m_a}{V} = \frac{p_a}{RT_a} = \frac{1707.73}{287 * (35 + 273)} = 0.01932 \text{ kg} / \text{m}^3$$

Example 2:

The following data relate to a two-pass surface condenser:

Steam condensed = 1540 kg/hr

Temperature of cooling water when it enters the condenser = 15° C

Temperature of cooling water when it leaves the condenser = 30° C

Vacuum in the condenser = 675 mm of Hg

Barometer reading = 750 mm of Hg

Temperature of condensate = 32° C

Quality of exhaust steam = 0.92

Water velocity in tubes = 2.6 m/s

Outside diameter of tubes = 2.8 cm

Thickness of tubes = 0.03 cm

Heat Transfer coefficient = 3.35 kJ/h/cm²

Determine

(i) Area of the tube surface required

(ii) No. of tubes

(iii) Length of tubes

Solution:

$$\begin{aligned} \text{Absolute pressure in the condenser} &= 750 - 675 \\ &= 75 \text{ mm of Hg} \end{aligned}$$

$$\text{Since } 1 \text{ mm of } H_g = 0.0013332 \text{ bar}$$

$$\therefore 75 \text{ mm of } H_g = 0.09999 \text{ bar}$$

$$\approx 0.1 \text{ bar}$$

From steam tables, corresponding to 0.1 bar

$$t_{\text{sat}} = 45.83^\circ \text{C}; h_f = 191.8 \text{ kJ/kg};$$

$$h_{fg} = 2392.9 \text{ kJ/kg}$$

Assuming parallel flow,

$$\Delta T_{LMTD} = \frac{\Delta T_{\text{inlet}} - \Delta T_{\text{exit}}}{\ln \frac{\Delta T_{\text{inlet}}}{\Delta T_{\text{exit}}}}$$

$$LMTD = \frac{(45.8 - 15) - (45.8 - 30)}{\ln \left(\frac{45.8 - 15}{45.8 - 30} \right)}$$

$$LMTD = 22.47^\circ \text{C}$$

Heat extracted per kg of steam,

$$\begin{aligned} &= \left(h_f + x h_{fg} \right) - m_w c_{pw} (\Delta t_w) \\ &= (191.8 + 0.92 \times 2392.9) - 1 \times 4.187 \times 32 \end{aligned}$$

$$Q_s = 2259.28 \text{ kJ/kg}$$

Since

heat lost by steam = heat gained by water

$$m_s \times Q_s = m_w c_{pw} (t_2 - t_1)$$

$$1540 \times 2259.28 = m_w \times 4.187 (30 - 15)$$

$$\therefore m_w = 55,398.3 \text{ kg/hr}$$

We know that $Q = UA (\Delta T)_{lm}$

But

$Q = \text{Heat lost by steam} = \text{Heat gained by water}$

$$\begin{aligned} &= m_w c_{pw} (t_2 - t_1) \\ &= 55,398.3 \times 4.187 (30 - 15) \end{aligned}$$

$$Q = 3479291.2 \text{ kJ/hr}$$

$$\therefore A = \frac{Q}{U \cdot (\Delta T)_{lm}} = \frac{3479291.2}{3.35 \times 22.47}$$

$$A = 46221.37 \text{ cm}^2$$

$$\therefore \text{Area of tube surface required} = 4.6221 \text{ m}^2$$

No. of tubes

$$\begin{aligned} \text{Total amount of required/sec} &= \frac{m_w}{3600} \\ &= \frac{55398.3}{3600} \\ &= 15.388 \text{ kg/s} \end{aligned}$$

$$\text{Cross section area, } A_c = \frac{\pi}{4} d_i^2$$

$$\text{Where, } d_i = d_o - (\text{thickness} \times 2)$$

$$= 2.8 - (0.03 \times 2)$$

$$= 2.74 \text{ cm}$$

$$= 2.74 \times 10^{-2} \text{ m}$$

$$\therefore A_c = \frac{\pi}{4} \times \left(2.74 \times 10^{-2} \right)^2$$

$$= 5.896 \times 10^{-4} \text{ m}^2$$

Since, Amount of water flowing/sec

$$= \rho A_c V \times n \times p \quad [\because \rho = 1000 \text{ kg/m}^3]$$

\therefore The number of tubes can be determined by,

$$\therefore 15.38 = 1000 \times 5.896 \times 10^{-4} \times 2.6 \times n \times 2$$

$$\therefore n = 5 \text{ tubes}$$

To find length of tube

$$\begin{aligned} \text{Surface area of one tube} &= \frac{A}{n} = \frac{46221.37}{5} \\ &= 9244.2 \text{ cm}^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \therefore \text{Length of tube, } L &= \frac{9244.2}{\pi d_o} \\ &= \frac{9244.2}{\pi \times 2.8} \\ &= 1050 \text{ cm} \end{aligned}$$

$$\mathbf{L = 10.5 \text{ m}}$$

Power Plant Engineering TUTORIAL SHEET - 5
Steam Condenser

الجامعة المستنصرية – كلية الهندسة
قسم الهندسة الميكانيكية

1- In a surface condenser, the pressure of steam is 12 kPa and the cooling water flow rate is 40 kg/kg of steam condensed. The condensate leaves at 44° C and the rise in temperature of circulating water is 14° C. Determine the dryness fraction of steam entering into the condenser.

Answers: [x = 0.9738]

2- In a condenser test, the following observations were made:

Vacuum reading = 715 mm of mercury

Barometer reading = 765 mm of mercury

Mean temperature of steam = 34°C

Hot well temperature = 29°C

Inlet temperature of cooling water = 15°C

Outlet temperature of cooling water = 25°C

Determine:

1. Vacuum efficiency.
- 2- Condenser efficiency.

3- The following observations were recorded during a test of a surface condenser:

Condenser vacuum reading = 69.85 cmHg

Barometer reading = 76.33 cmHg

Steam and air temperature = 35 °C

Condensation rate = 16 kg/min

Cooling water flow rate = 610 kg/min

Cooling water temperature rise = 12 °C

Assuming no under cooling for the condensate, calculate:

1. The mass of air per m^3 of condenser volume.
2. The dryness fraction of steam entering the condenser.

Answer: (0.0342 kg/m^3 , 0.79)

4- The following readings were taken during a test on a surface condenser:

Mean condenser temperature = 35°C

Hot well temperature = 30°C

Condenser vacuum = 69 cm Hg

Barometer reading = 76 cm Hg

Condensation rate = 16 kg/min

Cooling water temperature inlet = 20°C

Cooling water temperature outlet = 32.5°C

Flow rate being = 37500 kg/h

Calculate:

- (a) mass of air present per cubic meter of condenser
- (b) quality of steam at condenser inlet
- (c) vacuum efficiency
- (d) condenser efficiency

Answer: ($m_a = 0.042 \text{ kg/m}^3$, $x = 0.836$, Vacuum efficiency = 96.1% ,

Condenser efficiency = 83.33%)

5- Steam enters the condenser at 35°C . The condenser vacuum is 70 cm of mercury when the barometer reads 75.5 cm of Hg.

Determine the vacuum efficiency. Estimate the mass of air present in the condenser per kg of steam.

Answer: (Vacuum efficiency = 98.29% , $m_a = 0.467 \text{ kg air/kg steam}$)