

المبادلات الحرارية

Heat Exchangers

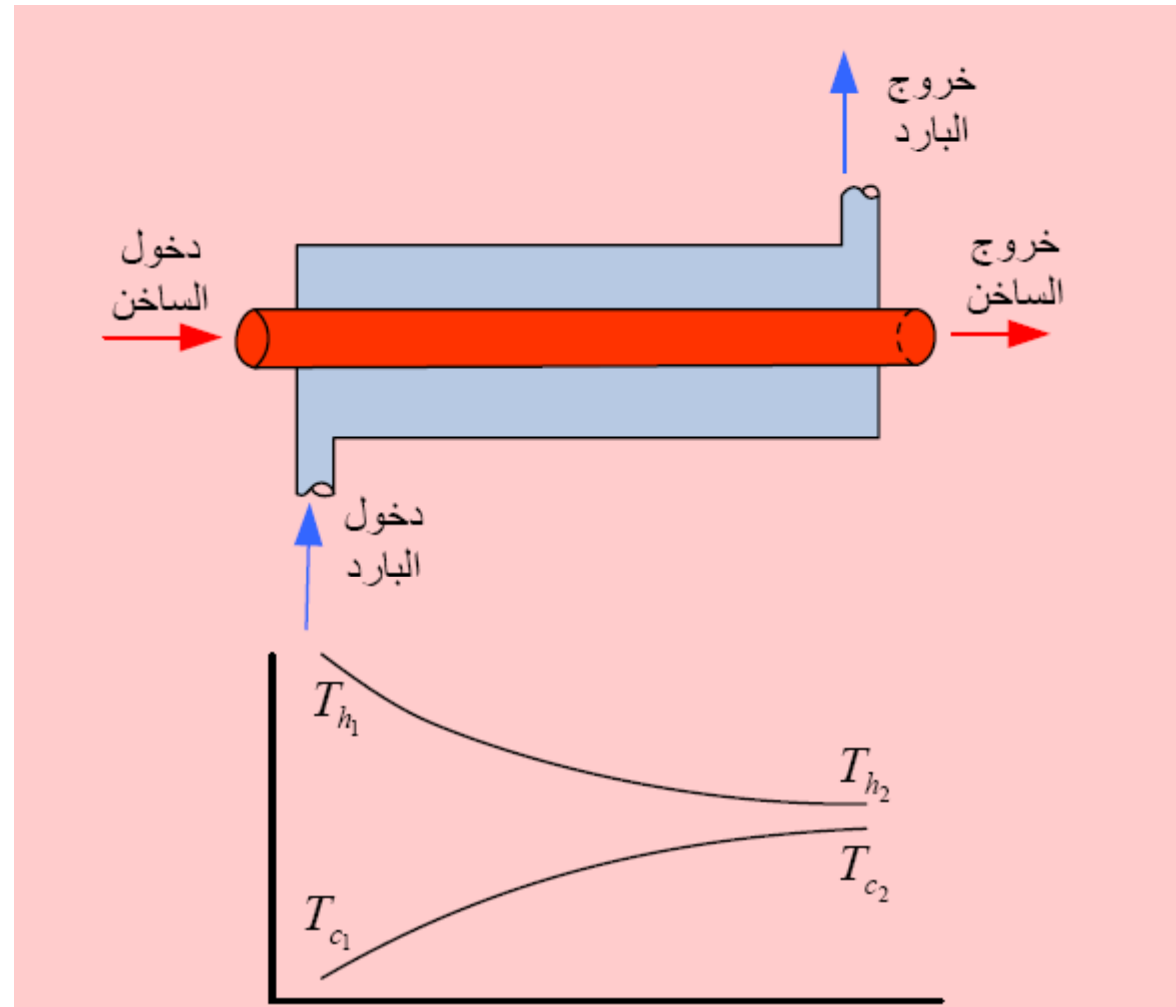
تعرف المبادلات الحرارية بأنها تلك المعدات التي تبسط و تسهل عملية انتقال وتبادل الحرارة بين مائعين عند درجتى حرارة مختلفتين مع الاحتفاظ بهذين المائعين غير مختلطين في أكثر أنواعها شيوعا. تستخدم المبادلات الحرارية في كثير من التطبيقات في مجال التبريد وتكييف الهواء وفي التصنيع الكيميائي وفي محطات توليد الطاقة خاصة الكبيرة منها. يتم انتقال الحرارة في المبادل الحراري بواسطة الحمل في المائع نفسه وبالتوصيل خلال الجدار الفاصل بين المائعين.

أنواع المبادلات الحرارية Types of Heat Exchangers

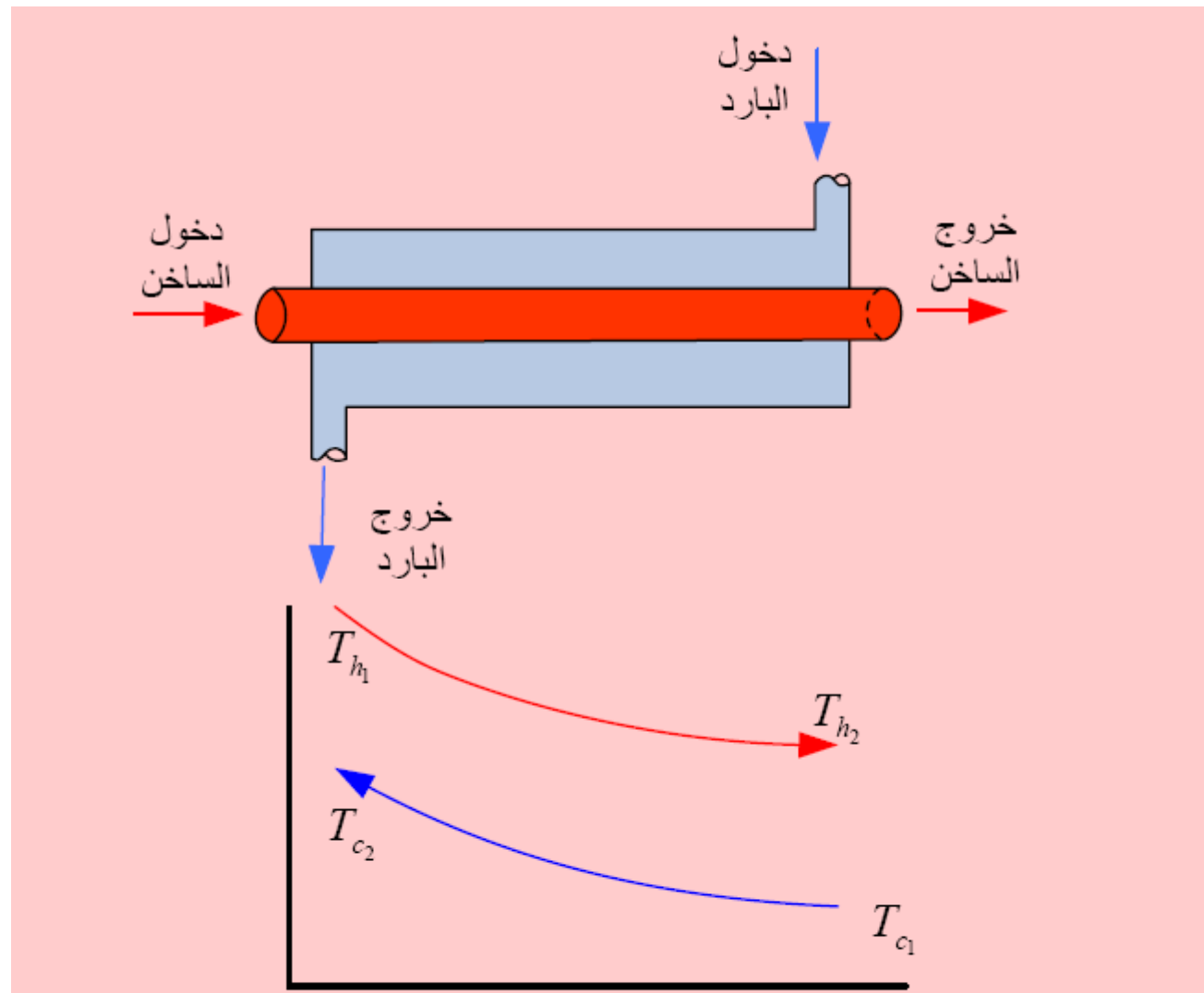
تتطلب تطبيقات انتقال الحرارة المختلفة لمواد مختلفة ولطرق تصنيع مختلفة أيضا. ولذلك وللمطابقة متطلبات انتقال الحرارة في التطبيق المحدد مع مواد تصنيع المبادل الحراري تطلب ذلك تصنيع وتصميم المبادلات الحرارية بطرق كثيرة منها:

أولا: - المبادل الحراري الأنبوبي أو المبادل الحراري ذو الأنابيب متحد المركز

Tubular or Concentric Tube HXR



شكل رقم (٢- ٣٦) مبادل حراري أنبوبي متوازي السريان



شكل (٢- ٣٧) مبادل حراري أنبوبي عكسي السريان

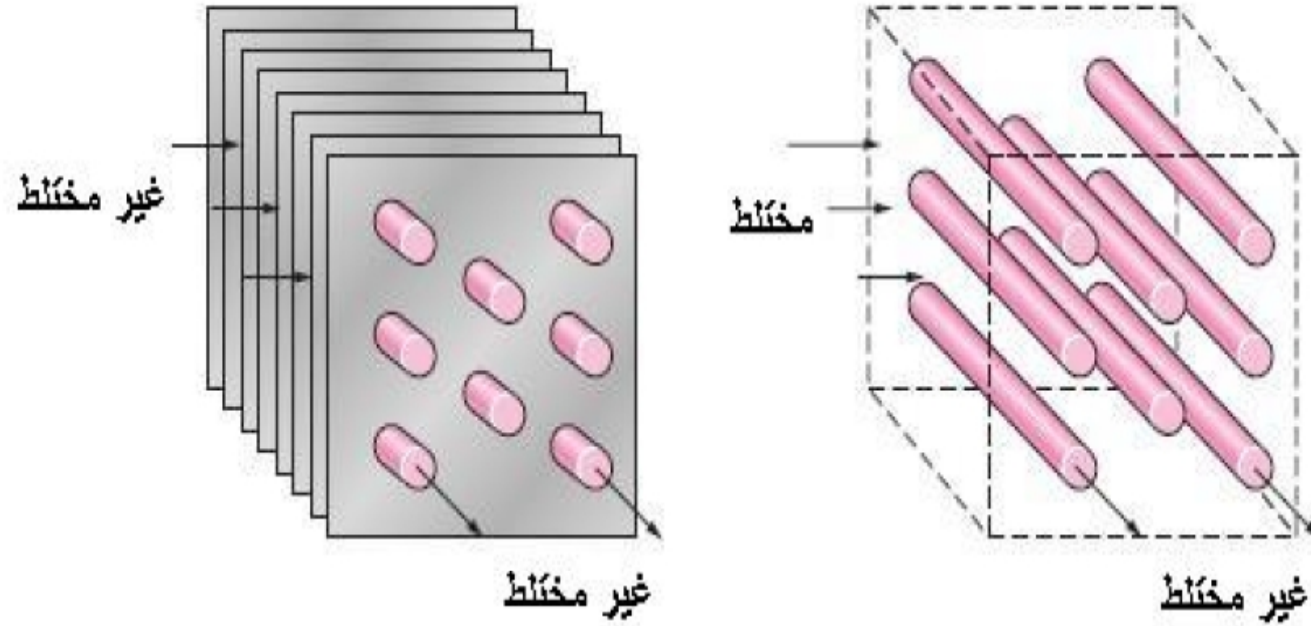
وكما يتضح من الشكلين (٢ - ٣٦) و (٢ - ٣٧) فإن هذا المبادل يتكون من أنبوبين بقطرين مختلفين ومركز متحد. يسري أحد المائعين في الأنبوب الصغير فيما يسري المائع الآخر في المساحة المتبقية بين الأنبوبين.

هناك نوعان من السريان يمكن استخدامهما في مثل هذا المبادل الحراري:

- مبادل حراري متوازي السريان Parallel Flow وفيه يدخل المائعان الحار والبارد من نفس النهاية في المبادل ويسريان في نفس الاتجاه حتى النهاية الأخرى، الشكل (٢ - ٣٦)
- مبادل حراري عكسي السريان Counter Flow وفيه يدخل المائعان الحار والبارد كل منهما في نهاية ويسريان في اتجاهين متعاكسين، (الشكل ٢ - ٣٧)

ثانياً:- المبادل الحراري المدمج Compact HXR

صمم هذا المبادل لتحقيق مساحة انتقال حرارة عالية جداً في وحدة الحجم. تسمى النسبة بين مساحة انتقال الحرارة للمبادل الحراري إلى حجم المبادل بكثافة المساحة area density . يسمى المبادل الحراري بمبادل حراري مدمج إذا كانت كثافة المساحة أكبر من $700 \frac{m^2}{m^3}$ ومن أمثلة هذا المبادل الحراري المكثفات والمبخرات في أنظمة التكييف والتبريد ورادياتر السيارة ورئة الإنسان. تمكننا هذه النوعية من المبادلات لتحقيق معدلات عالية لانتقال الحرارة بين مائعين في أحجام صغيرة ومحددة. نستطيع الحصول على المساحة العالية لانتقال الحرارة في مثل هذه المبادلات باستخدام الصفائح الرقيقة أو زعانف مهوجة corrugated fins في الحوائط الفاصلة بين المائعين.



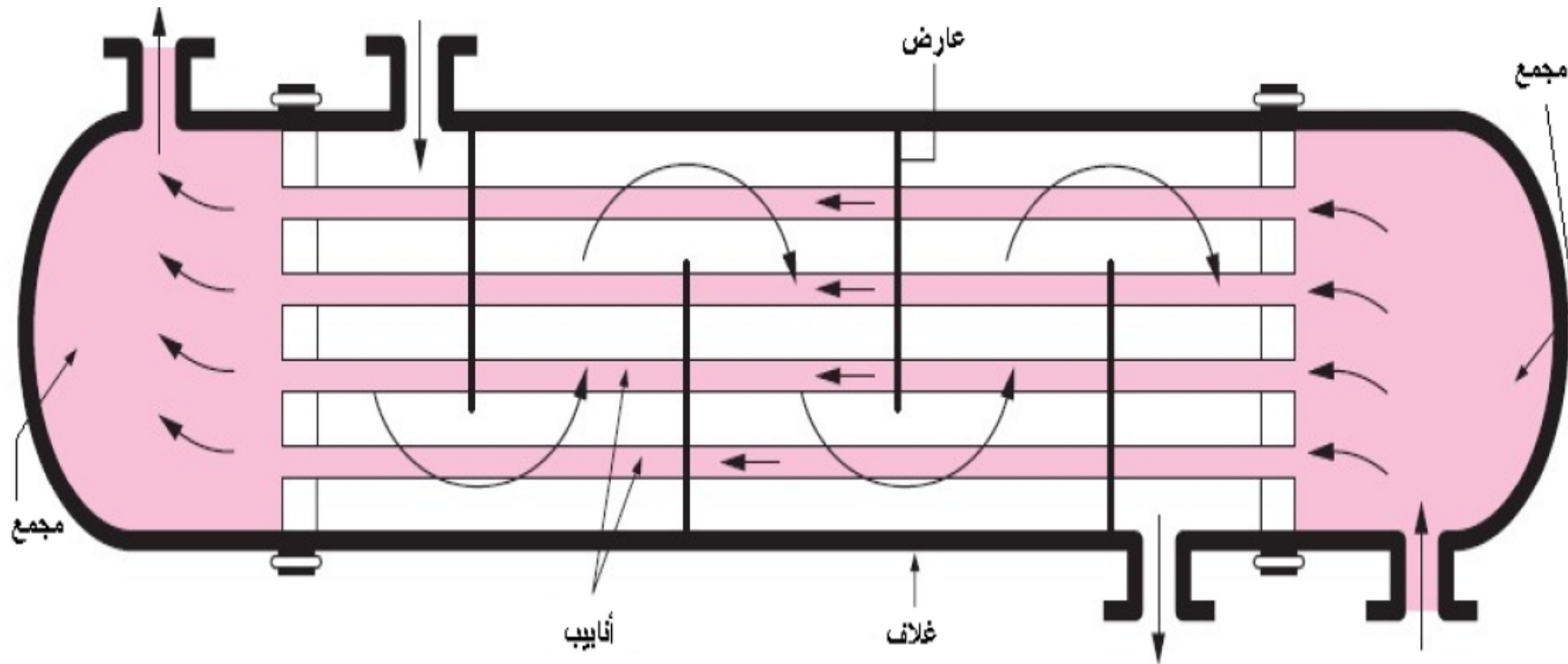
شكل (٢ - ٣٨) مبادل حراري مدمج (مختلط - غير مختلط) و(غير مختلط)

في المبادلات الحرارية المدمجة يسري المائعان في اتجاهين متعامدين perpendicular ويسمى هذا النوع من السريان بالسريان المتعارض cross flow . ويقسم السريان المتعارض إلى سريان متعارض مختلط وسريان متعارض غير مختلط (الشكل ٢ - ٣٨) اعتمادا على شكل السريان.

ثالثا المبادل الحراري ذو الغلاف والأنبوب Shell- and-Tube HXR

يعتبر هذا النوع من المبادلات الحرارية من أشهر المبادلات الحرارية المستخدمة في التطبيقات الهندسية. يحتوي هذا النوع من المبادلات الحرارية على عدد كبير من الأنابيب (في بعض الأحيان عدة مئات) محشوة في غلاف على أن تكون محاورها متوازية مع محور الغلاف. تنتقل الحرارة بين المائع الذي يسري

داخل المواسير والمائع الذي يسري خارج المواسير خلال الغلاف (الشكل ٢ - ٣٩). غالبا ما تستخدم عوارض baffles في الغلاف لإجبار المائع الذي يسري خلال الغلاف للسريان خلال الغلاف مما يسرع من عملية انتقال الحرارة والاحتفاظ بحيز متساو بين المواسير. بالرغم من اتساع استخدام مثل هذه المبادلات فإنها غير مناسبة الاستخدام في السيارات والطائرات وذلك لضخامة حجم ووزن هذه المبادلات.

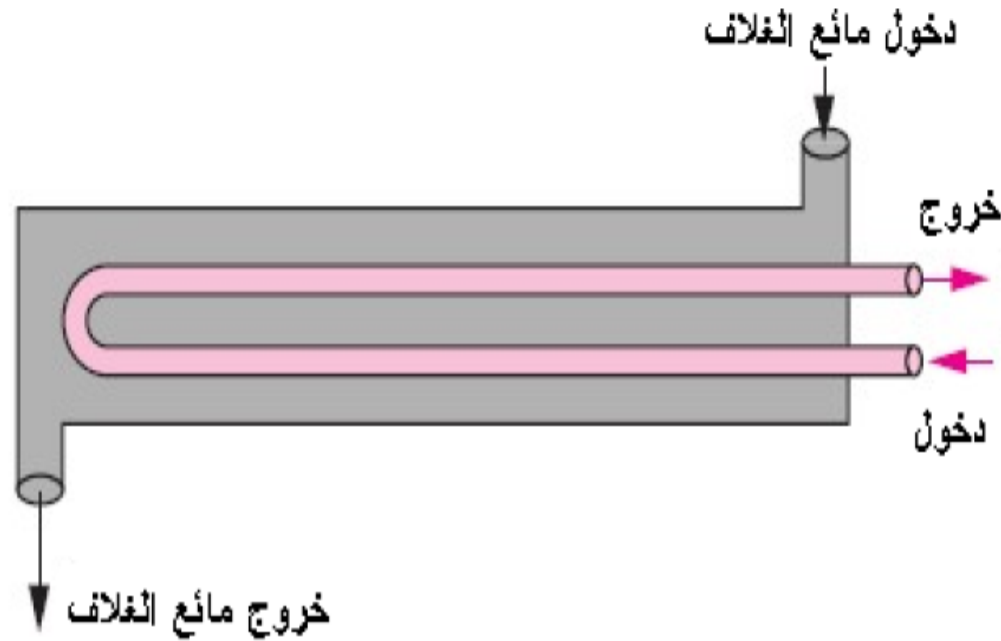


شكل ٢- ٣٩ مبادل حراري ذو غلاف وأنبوب

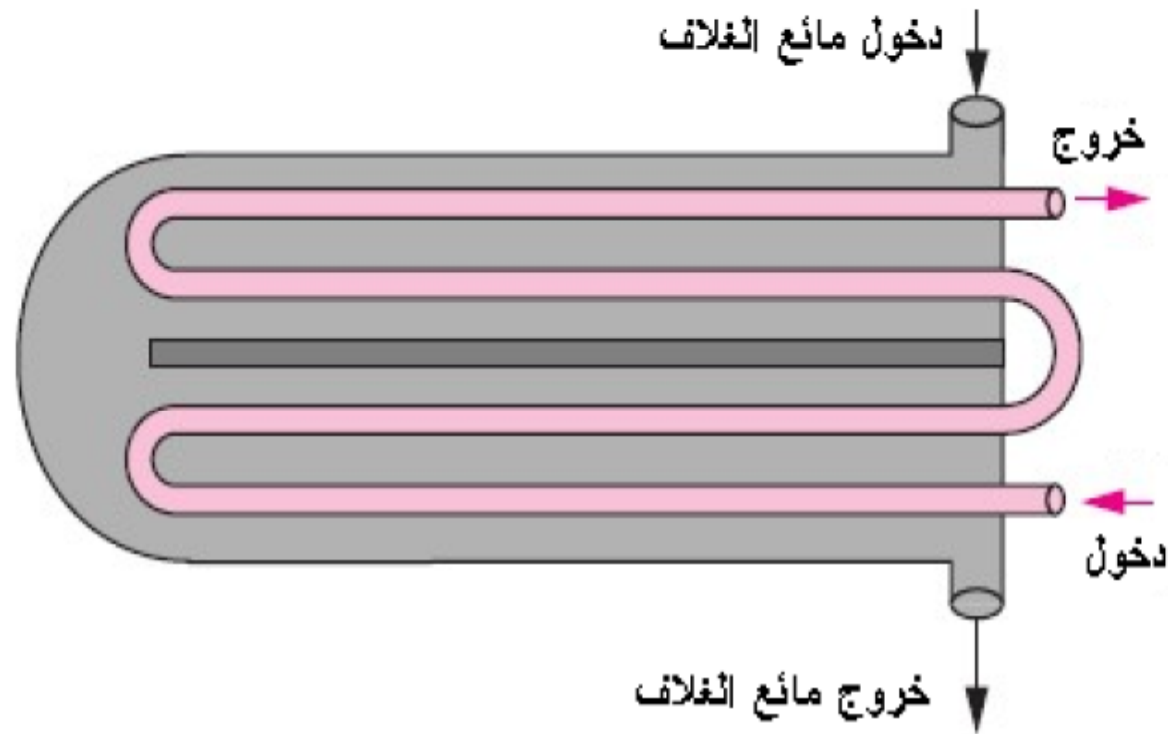
يجب ملاحظة أن الأنابيب في مثل هذه المبادلات تكون مفتوحة لمساحات سريان كبيرة تسمى مجمعات headers توجد في نهايات الغلاف حيث يتجمع مائع الأنابيب قبل دخول الأنابيب وبعد الخروج منها.

تصنف هذه المبادلات على أساس عدد الممرات في الغلاف والأنبوب. ففي حالة أن الأنابيب تدخل من ناحية في الغلاف وتخرج من نفس الناحية (U-turn) يسمى المبادل مبادلاً حرارياً ذا غلاف ممر واحد وأنابيب ذات ممرين one-shell pass and two-tube passes (الشكل ٢- ٤٠) وبالمثل يمكن تسمية المبادل الذي له ممران في الغلاف وأربعة ممرات للأنابيب (الشكل ٢- ٤١) بالمبادل الحراري ذي غلاف ممرين وأنابيب أربعة

ممرات two-shell passes and four-tube passes



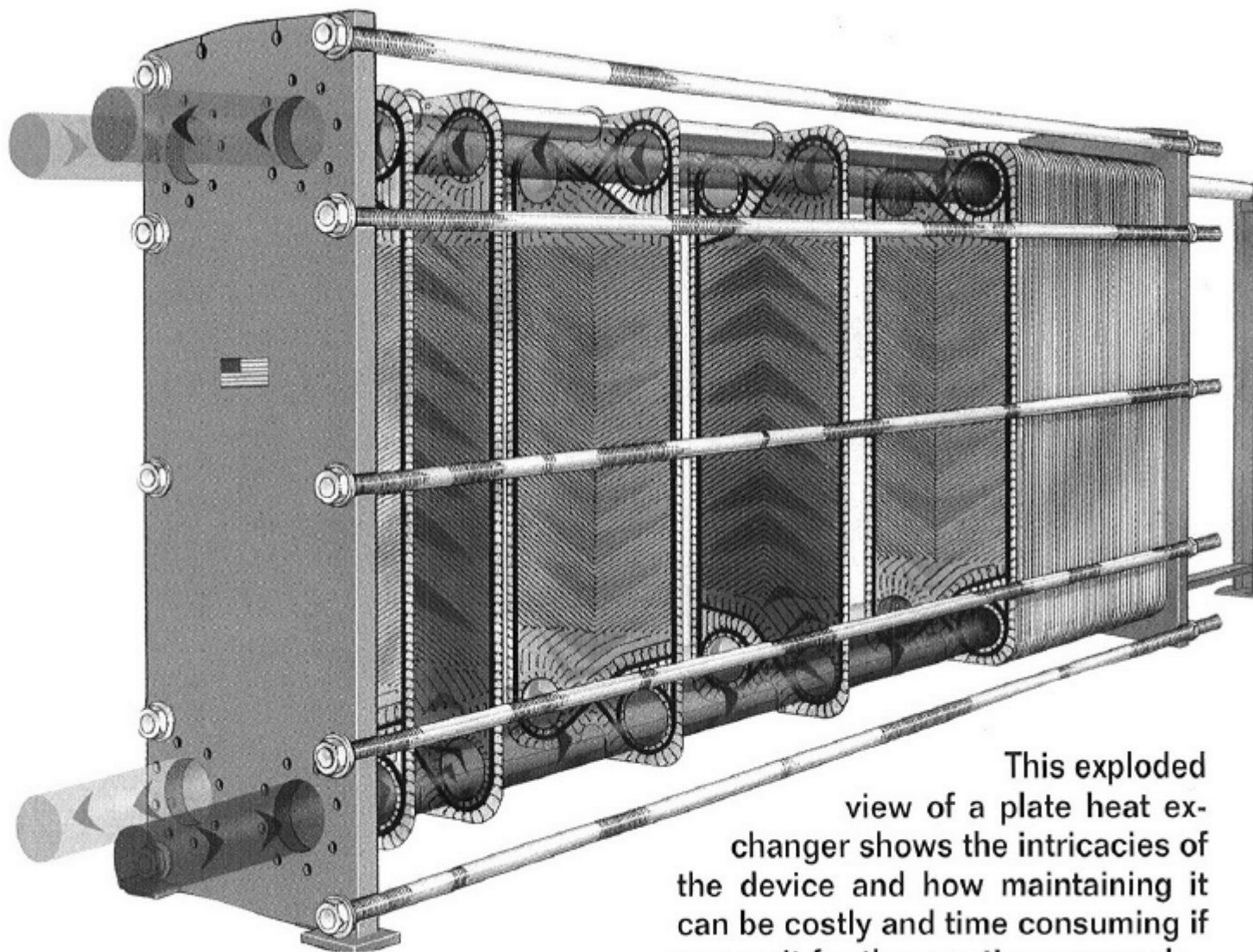
شكل ٢- ٤٠ مبادل حراري ذو غلاف وأنبوب - غلاف ممر واحد وأنابيب ذات ممرين



شكل ٢- ٤١ مبادل حراري ذو غلاف وأنبوب - غلاف ممرين وأنابيب أربعة ممرات

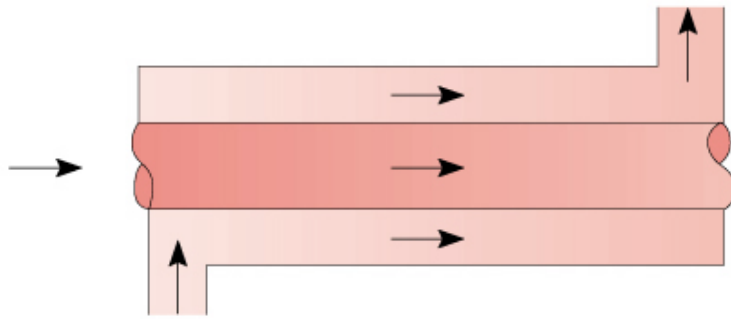
رابعاً المبادل الحراري اللوحى Plate HXR

وهو من المبادلات الحرارية التي وجدت استخدامات عدة في الآونة الأخيرة. ويتكون هذا المبادل من مجموعة ألواح تكون ممرات ذات سريان مموج ومسطح. المائع البارد والمائع الساخن يسريان في ممرات تبادلية بحيث إن أي تيار من المائع البارد يكون محاطا بتيارين من المائع الحار مما يؤدي لانتقال وتبادل حراري فعال. غالبا ما يستخدم هذا المبادل في التطبيقات التي يتم التبادل الحراري فيها بين سائلين.

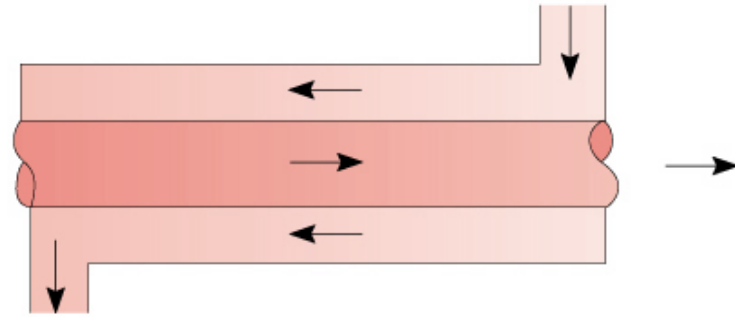


This exploded view of a plate heat exchanger shows the intricacies of the device and how maintaining it can be costly and time consuming if you wait for the reactive approach.

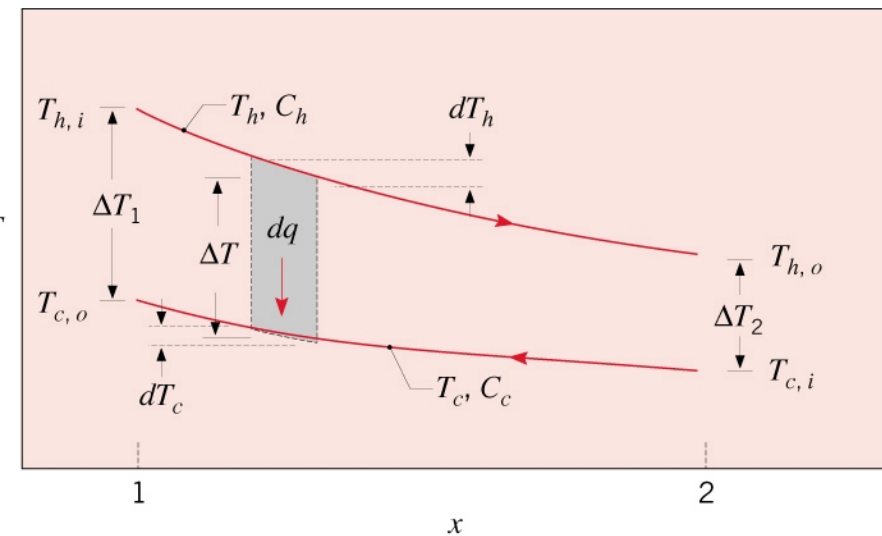
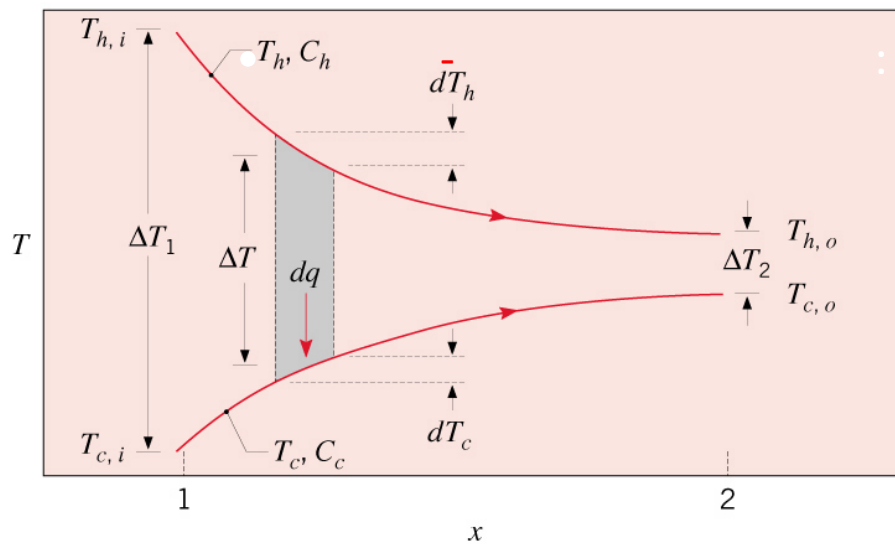
Concentric Tube Construction



Parallel Flow



Counterflow



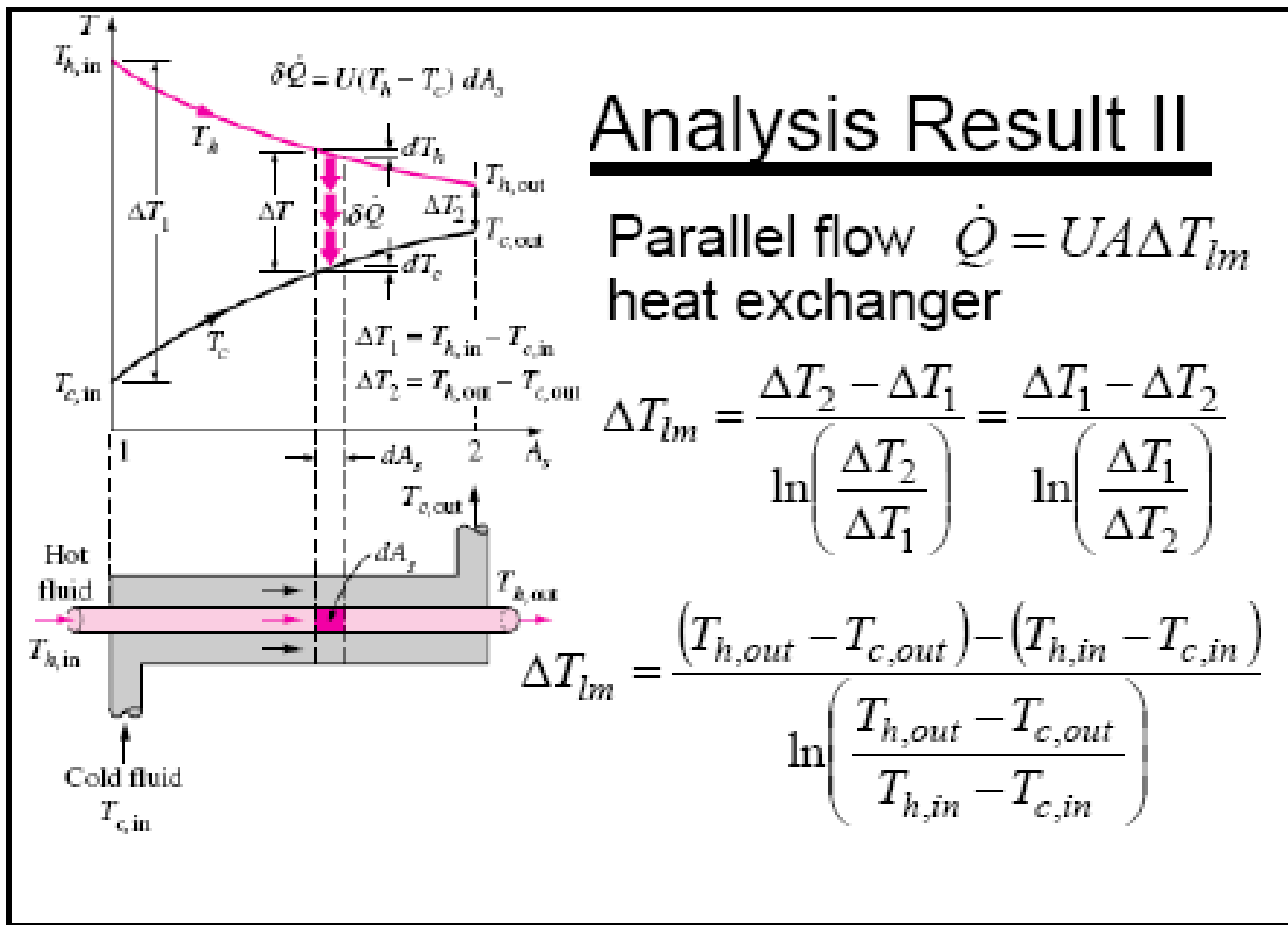
After obtaining C_h and C_c and solving for Q

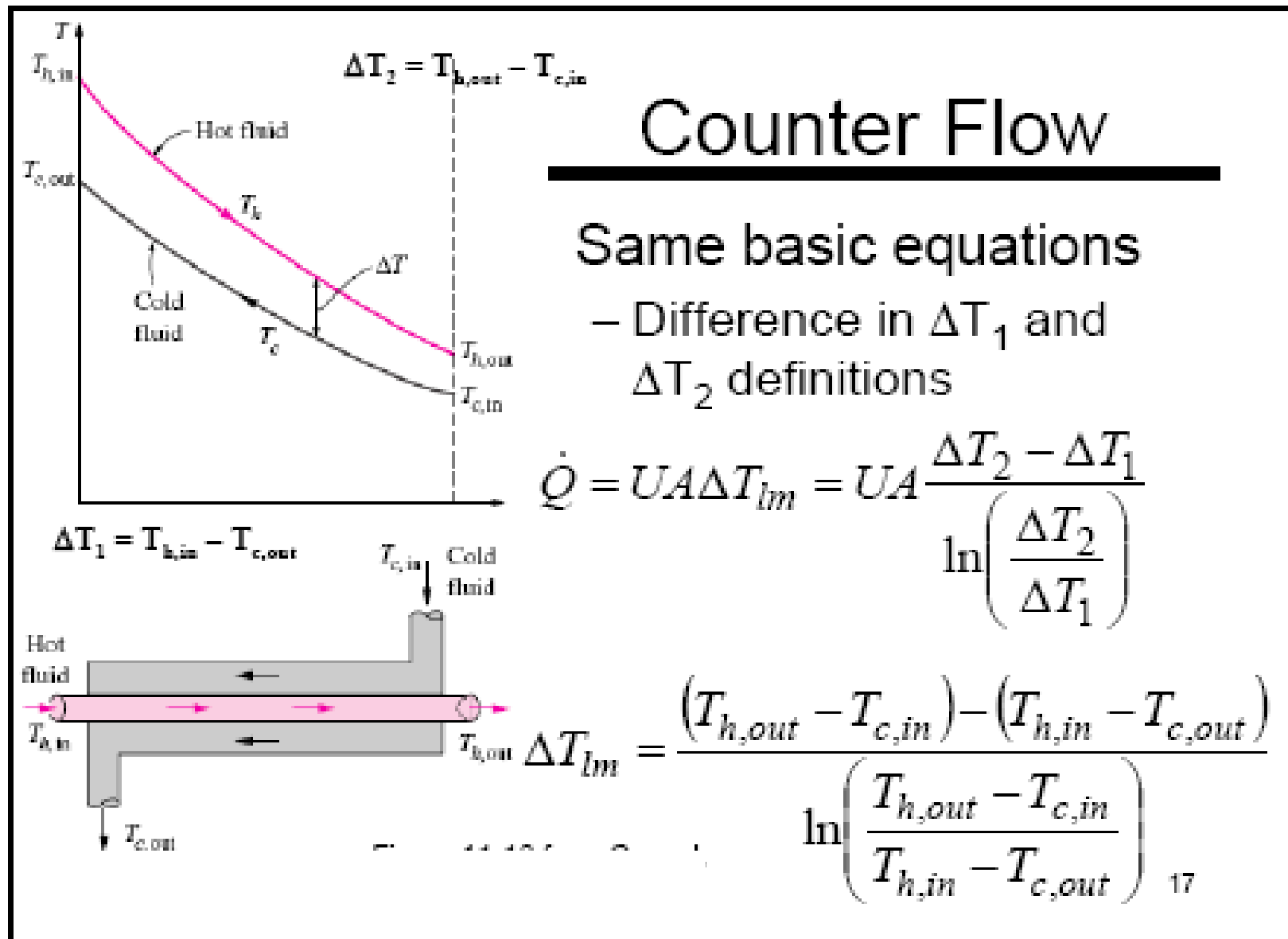
$$Q = UA \frac{(T_{h1} - T_{c2}) - (T_{h2} - T_{c1})}{\ln \left(\frac{T_{h1} - T_{c2}}{T_{h2} - T_{c1}} \right)}$$

or

$$Q = UA \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln(\Delta T_1 / \Delta T_2)}$$

where ΔT_1 is the temperature difference between the two fluids at one end of the HEX and ΔT_2 is the one at the other end of the HEX.





Example 1

- An counterflow heat exchanger with $U = 200 \text{ W/m}^2\cdot^\circ\text{C}$ is to be used to cool 1 kg/s of oil ($c_p = 2000 \text{ J/kg}\cdot^\circ\text{C}$) from 100°C to 30°C using 3 kg/s of water ($c_p = 4184 \text{ J/kg}\cdot^\circ\text{C}$) at 20°C . What area is required?
- **Given:** $T_{h,in} = 100^\circ\text{C}$, $T_{h,out} = 30^\circ\text{C}$, $T_{c,in} = 20^\circ\text{C}$, $U = 200 \text{ W/m}^2\cdot^\circ\text{C}$, $c_{p,c} = 4184 \text{ J/kg}\cdot^\circ\text{C}$, $c_{p,h} = 2000 \text{ J/kg}\cdot^\circ\text{C}$, $\dot{m}_h = 1 \text{ kg/s}$, and $\dot{m}_c = 3 \text{ kg/s}$. **Find:** A

Solution

• **Equations:**

$$\dot{Q} = UA\Delta T_{lm} = UA \frac{(T_{h,out} - T_{c,in}) - (T_{h,in} - T_{c,out})}{\ln\left(\frac{T_{h,out} - T_{c,in}}{T_{h,in} - T_{c,out}}\right)}$$

$$= \dot{m}_c c_{p_c} (T_{c,out} - T_{c,in}) = \dot{m}_h c_{p_h} (T_{h,in} - T_{h,out})$$

$$\dot{Q} = \dot{m}_h c_{p_h} (T_{h,in} - T_{h,out}) = \frac{1 \text{ kg}}{s} \frac{2000 \text{ J}}{\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}} (100^\circ\text{C} - 30^\circ\text{C}) = 140000 \frac{\text{J}}{s}$$

$$T_{c,out} = \frac{\dot{Q}}{\dot{m}_c c_{p_c}} + T_{c,in} = \frac{140000 \frac{\text{J}}{s}}{3 \text{ kg} \frac{4184 \text{ J}}{\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}}} + 31.2^\circ\text{C}$$

California State University

21

Solution II

$$\Delta T_{lm} = \frac{(T_{h,out} - T_{c,in}) - (T_{h,in} - T_{c,out})}{\ln\left(\frac{T_{h,out} - T_{c,in}}{T_{h,in} - T_{c,out}}\right)} =$$
$$\frac{(30^{\circ}C - 20^{\circ}C) - (100^{\circ}C - 31.2^{\circ}C)}{\ln\left(\frac{30^{\circ}C - 20^{\circ}C}{100^{\circ}C - 31.2^{\circ}C}\right)} = 30.5^{\circ}C$$
$$A = \frac{\dot{Q}}{U\Delta T_{lm}} = \frac{140000 \frac{J}{s}}{\frac{200 W}{m^2 \cdot ^{\circ}C} (30.5^{\circ}C)} = 22.9 m^2$$

22



تحليل المبادلات الحرارية Heat Exchangers Analysis

تستخدم المبادلات الحرارية في كثير من التطبيقات الهندسية والتقنية وغالبا ما يجد المهندس نفسه أمام اختيار مبادل حراري يكون قادرا على إعطاء فرق درجات حرارة معين لتيار من مائع معلوم معدل سريانه أو استتباط درجات الحرارة عند الخروج للمائع البارد والمائع الساخن.

هناك طريقتان لتحليل المبادلات الحرارية. إحدى هاتين الطريقتين هي ما يعرف بطريقة متوسط فرق درجات الحرارة اللوغاريتمي (LMTD) or log mean temperature difference وهي مناسبة جدا للعمل الأول.

أما الطريقة الثانية فهي ما يعرف بطريقة الفعالية وعدد الوحدات المنقولة the effectiveness and the number of transfer units or (ϵ -NTU)

أولاً :طريقة متوسط فرق درجات الحرارة اللوغريتمي (LMTD) log mean temperature difference or

إن الفرق في درجات الحرارة بين المائع البارد والمائع الحار يختلف على طول المبادل الحراري. عليه فإنه من المناسب اقتراح فرق في درجات الحرارة بين المائعين يسمى متوسط فرق درجات الحرارة ΔT_m . وعليه فإن معدل انتقال الحرارة بين المائعين $\dot{Q}$ يمكن أن يعطى بالمعادلة التالية:

$$\dot{Q} = U \times A \times \Delta T_m \quad (2-43)$$

حيث U هو معامل انتقال الحرارة الكلي

و A هي مساحة سطح المبادل الحراري

و ΔT_m متوسط فرق درجات الحرارة المناسب بين المائعين

إذا نظرنا إلى المبادل الحراري في الشكل التالي (شكل ٢-٤٢):

فإن معدل انتقال الحرارة من المائع الساخن $d\dot{Q}_h$ يمكن كتابته كالاتي:

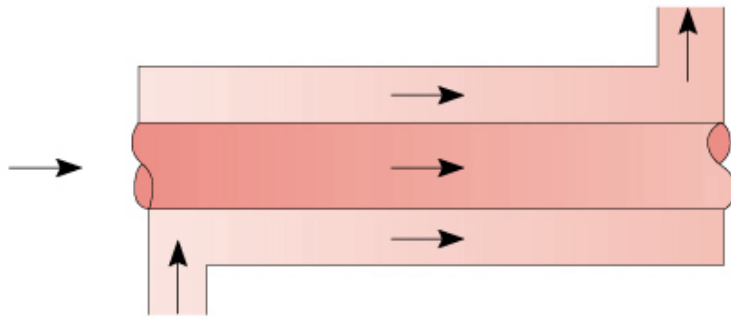
$$d\dot{Q}_h = \dot{m}_h \times C_{p_h} \times (T_{h_2} - T_{h_1}) \quad (2-44)$$

وبالمثل يمكن كتابة معدل انتقال الحرارة من المائع البارد $d\dot{Q}_c$ كالتالي:

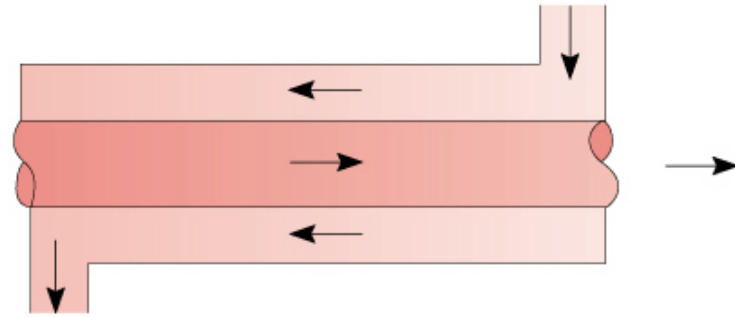
$$d\dot{Q}_c = \dot{m}_c \times C_{p_c} \times (T_{c_2} - T_{c_1}) \quad (2-45)$$

بمقارنة المعادلات (2-43) و (2-44) و (2-45) وبمعلومة أن معدل انتقال الحرارة بين المائع البارد والمائع الساخن متساو وهي نفس الكمية المعطاة بواسطة المعادلة (2-43) وبافتراض أن انتقال الحرارة كما ذكرنا سابقا مستقر ولا يوجد انتقال للحرارة في الاتجاه المحوري للمبادل الحراري وأن المبادل الحراري معزول تماما حيث لا يوجد تبادل حراري مع البيئة حوله وأن معامل انتقال الحرارة الكلي ثابت على طول

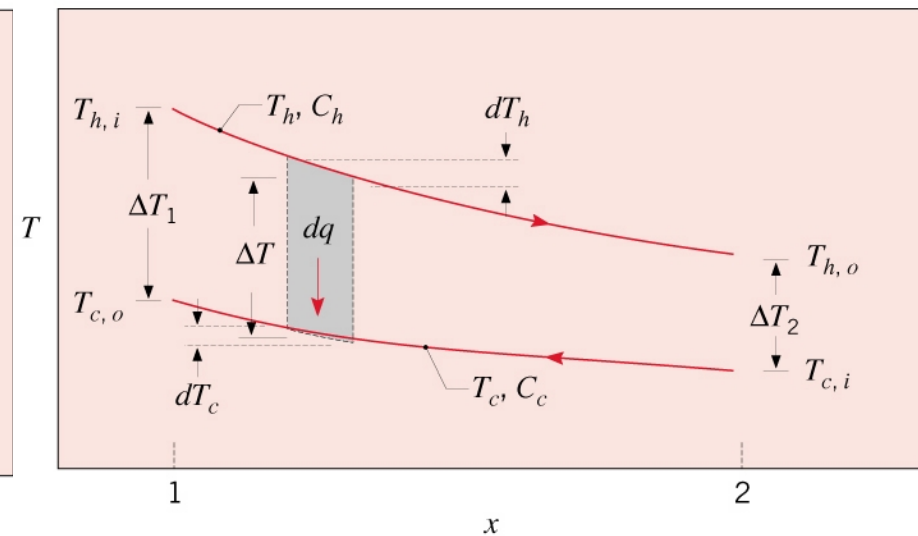
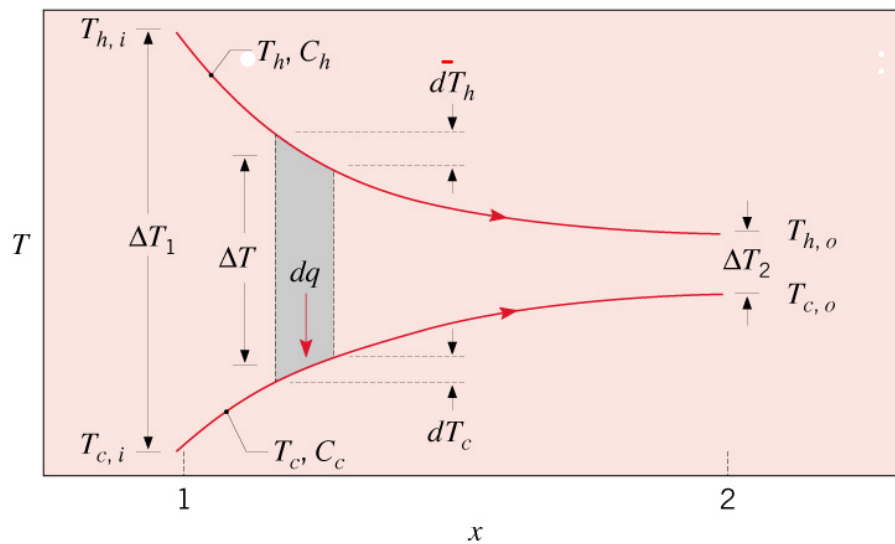
Concentric Tube Construction

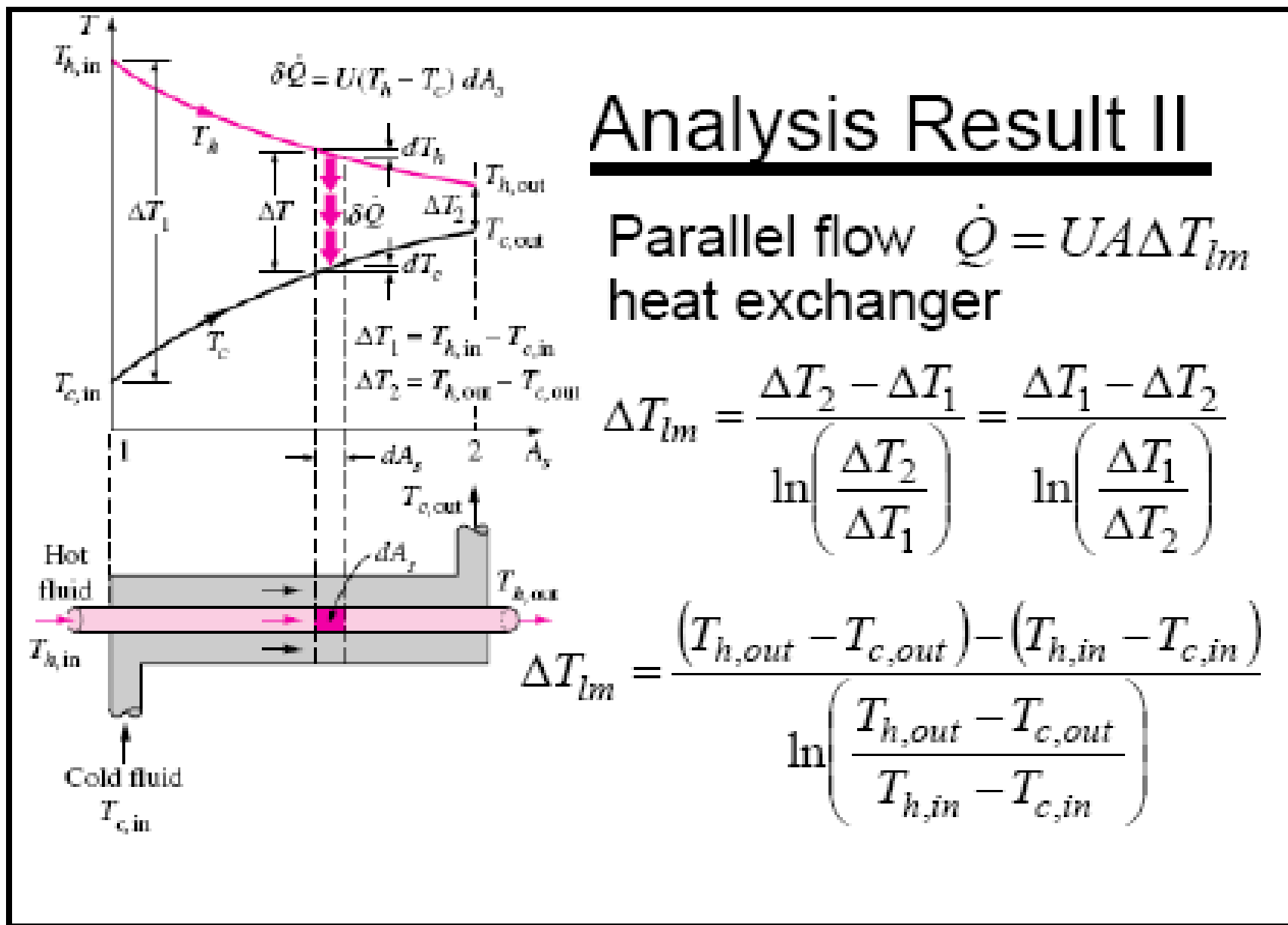


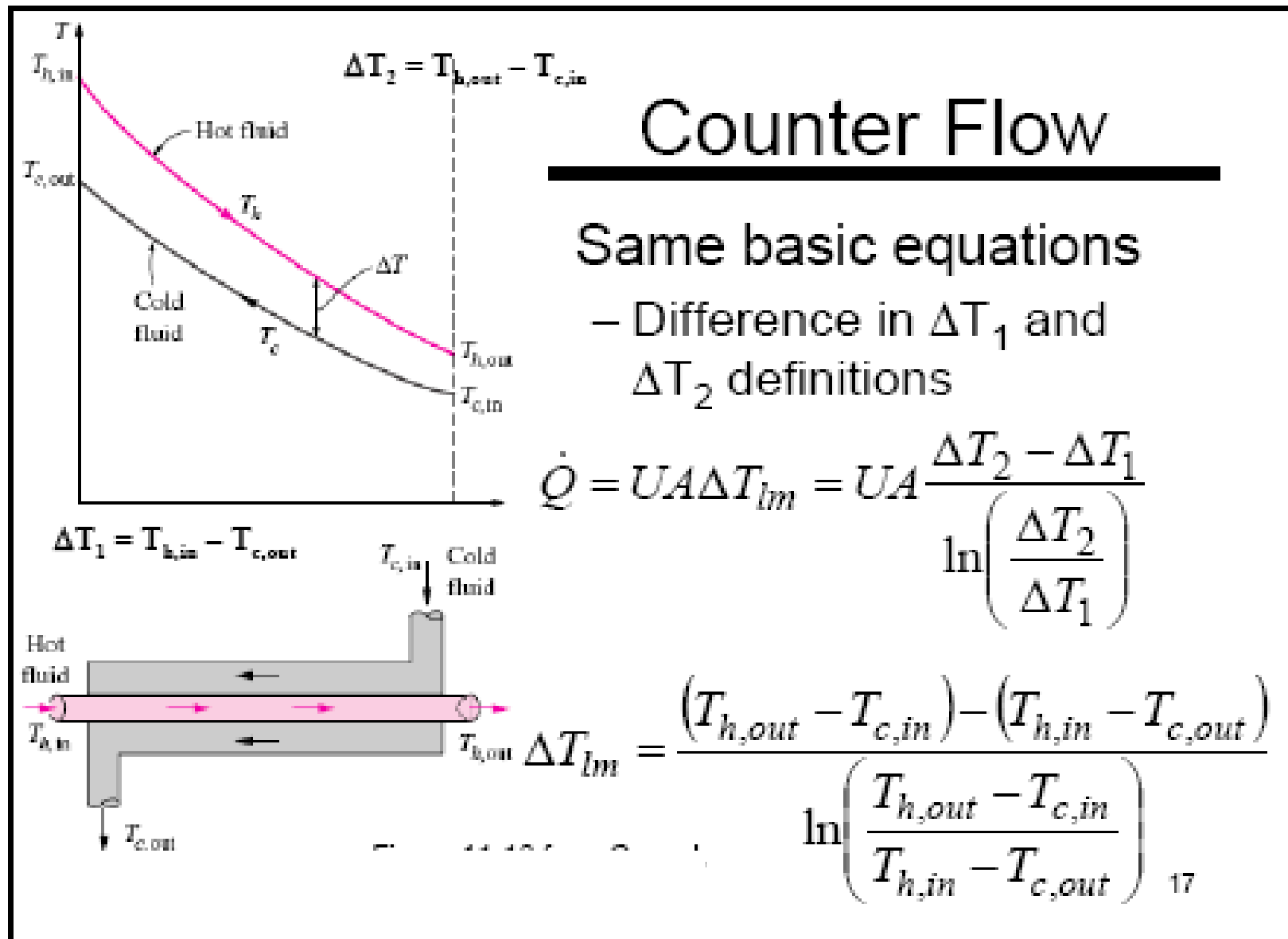
Parallel Flow



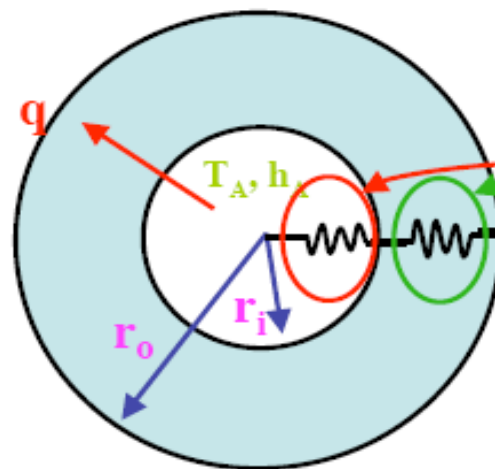
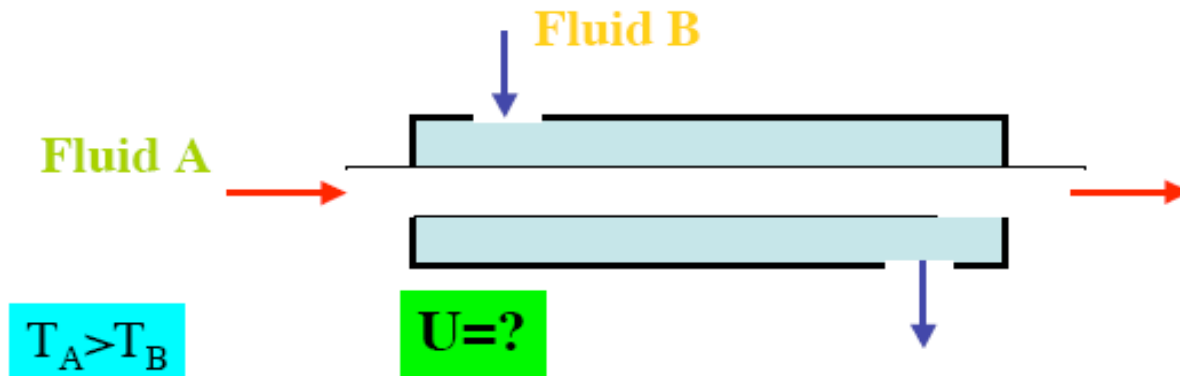
Counterflow







Overall Heat Transfer Coefficient



$$q = \frac{\Delta T}{\sum R_{th}} = \frac{T_A - T_B}{\frac{1}{h_i A_i} + \frac{\ln(r_o / r_i)}{2\pi k L} + \frac{1}{h_o A_o}}$$

$$q = UA\Delta T_{\text{overall}}$$

If $A=A_i$ $U=U_i$ Overall heat transfer coefficient based on inside area of the tube.

$$U_i = \frac{1}{\frac{1}{h_i} + A_i \frac{\ln(r_o / r_i)}{2\pi kL} + \frac{A_i}{h_o A_o}}$$

If $A=A_o$ $U=U_o$ Overall heat transfer coefficient based on outside area of the tube.

$$U_o = \frac{1}{\frac{A_o}{h_i A_i} + A_o \frac{\ln(r_o / r_i)}{2\pi kL} + \frac{1}{h_o}}$$

Note: Generally, the overall heat transfer coefficient is being calculate based on the *outside area*.

- Heat exchanger surfaces are subject to *fouling* by fluid impurities, rust formation, or other reactions between the fluid and the wall material. The subsequent deposition of a film or scale on the surface can greatly increase the resistance to heat transfer between the fluids.
- An additional thermal resistance, can be introduced: *The Fouling factor, R_f* .

مثال : المطلوب تسخين 1.2 kg/sec من الماء لغرض التكييف في فصل الشتاء من 20°C إلى 80°C بواسطة ماء جوفي ساخن (geothermal water) يدخل في المبادل الحراري الأنبوبي العكسي بدرجة حرارة 160°C . إذا كان معدل سريان الماء الجوفي 2 kg/sec وكان قطر الأنبوب الداخلي الذي يسري فيه ماء التكييف 1.5 cm وكان معامل انتقال الحرارة الكلي للمبادل الحراري $U = 640 \text{ W/m}^2\text{ }^\circ\text{C}$ ، احسب طول المبادل الحراري المطلوب لإتمام عملية تسخين ماء التكييف. (خذ الحرارة النوعية للماء والماء الجوفي 4.18 و $4.31 \text{ kJ/kg }^\circ\text{C}$ على التوالي).

معدل انتقال الحرارة خلال المبادل يمكن حسابه

$$\dot{Q} = \dot{m}_c \times C_p \times (T_{out} - T_{in})_{water} = 1.2 \times 4.18 \times (80 - 20) = 301.0 \text{ kW}$$

عليه يمكن حساب درجة حرارة الخروج للماء الجوي في المائع الساخن)

$$\dot{Q} = (\dot{m}_h \times C_p \times (T_{out} - T_{in}))_{hot\ water} \Rightarrow T_{out} = T_{in} - \left(\frac{\dot{Q}}{\dot{m} \times C_p} \right) = 160 - \frac{301}{2 \times 4.31} = 125.1 \text{ } ^\circ\text{C}$$

الآن نعلم درجات الحرارة للدخول والخروج للمائعين البارد والساخن ، عليه يمكن حساب متوسط فرق درجات الحرارة اللوغريثمي.

نحسب أولا الفرق في درجات الحرارة عند طرفي المبادل :

$$T_{h_1} - T_{c_2} = 160 - 80 = 80 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$T_{h_2} - T_{c_1} = 125.1 - 20 = 105 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\Delta T_m = \frac{(T_{h_1} - T_{c_2}) - (T_{h_2} - T_{c_1})}{\ln \frac{T_{h_1} - T_{c_2}}{T_{h_2} - T_{c_1}}} = 92.0^\circ C$$

يمكن حساب مساحة المبادل الحراري كالآتي:

$$\dot{Q} = U \times A \times \Delta T_m \Rightarrow A = \frac{\dot{Q}}{U \times \Delta T_m} = \frac{301000}{640 \times 92.0} = 5.11 m^2$$

ولهذه المساحة للمبادل الحراري يمكن حساب طول المبادل كالتالي:

$$A = \pi \times D \times L \Rightarrow L = \frac{A}{\pi \times D} = \frac{5.11}{\pi \times 0.015} = 108.4 m$$

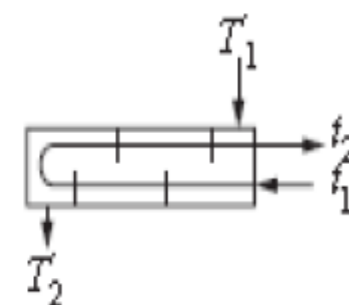
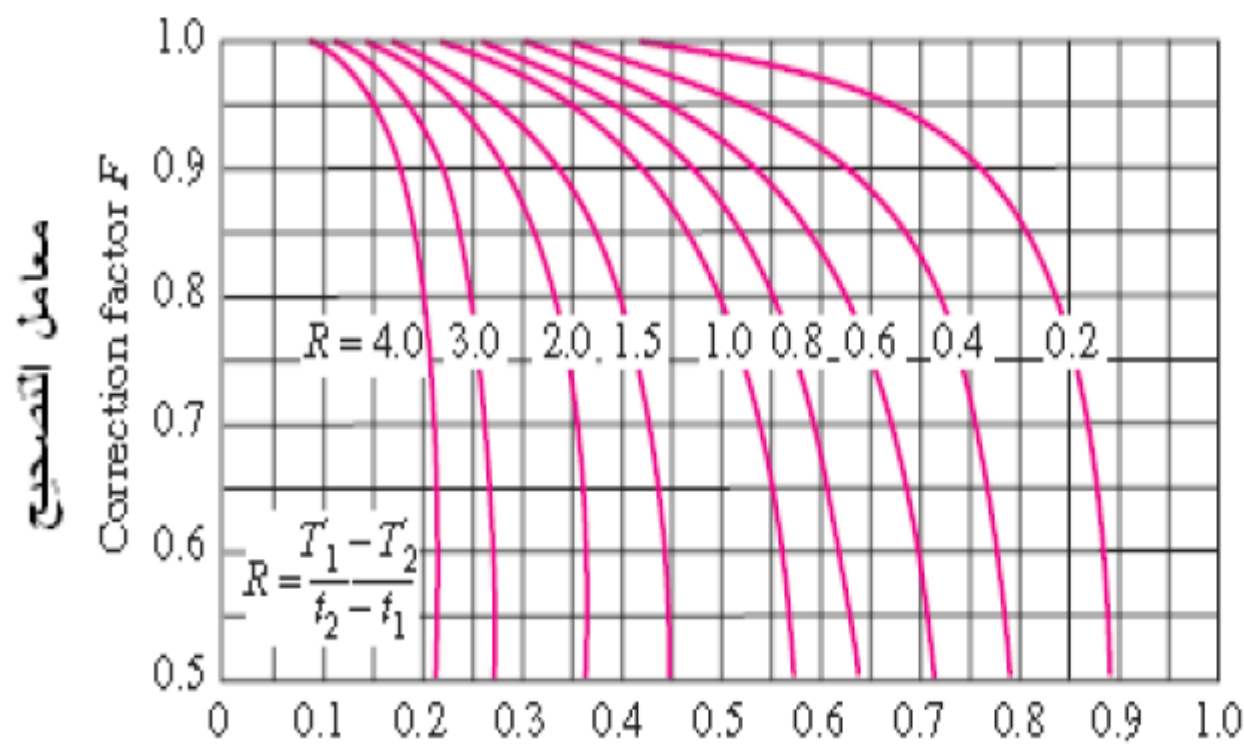
تحليل المبادلات الحرارية المستعرضة وذات الغلاف والأنبوب متعددة المرات باستخدام معامل التصحيح:

لا بد من ملاحظة أن الطريقة التي ذكرناها سابقا تطبق بتلك الكيفية على المبادلات الحرارية الأنبوبية متوازية السريان وعكسية السريان. أما في حالة المبادلات الحرارية ذات الغلاف والأنبوب والمستعرضة فإنه قد تم تطوير علاقات رياضية معقدة جدا لحساب معدل انتقال الحرارة في تلك المبادلات. لذلك فقد تم استخدام معامل تصحيح لفرق درجات الحرارة اللوغريتمي لمبادل حراري أنبوبي عكسي السريان لنفس درجات الحرارة للدخول والخروج للمائع الساخن والمائع البارد.

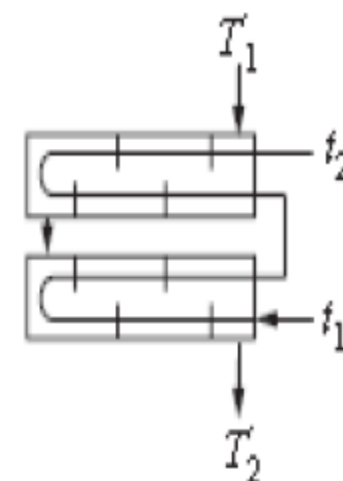
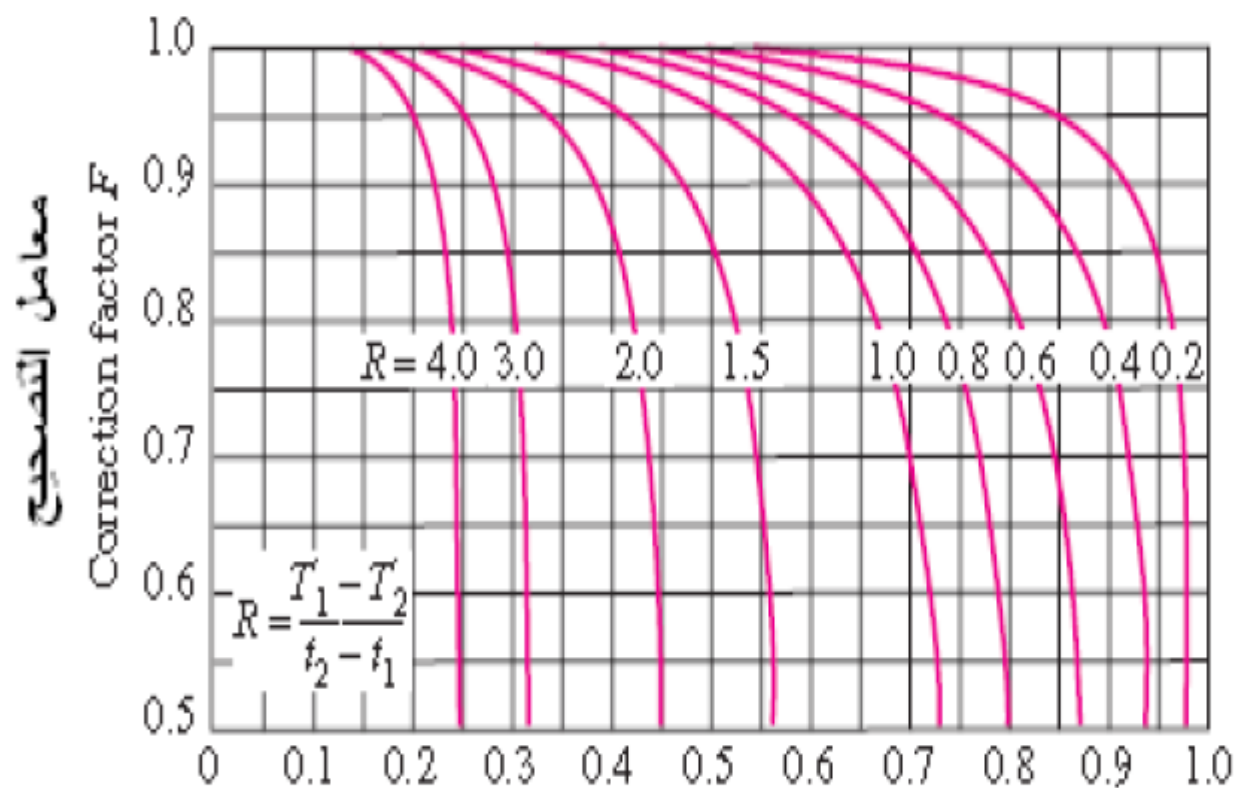
$$\Delta T_m = F \times \Delta T_{m,CFlow} \quad (2-48)$$

حيث F هي معامل التصحيح والذي يعتمد على الشكل الهندسي ودرجات الحرارة للدخول والخروج للمائعين البارد والساخن.

و $\Delta T_{m,CFlow}$ هو متوسط فرق درجات الحرارة اللوغريتمي في حالة أن المبادل هو مبادل حراري أنبوبي عكسي السريان.

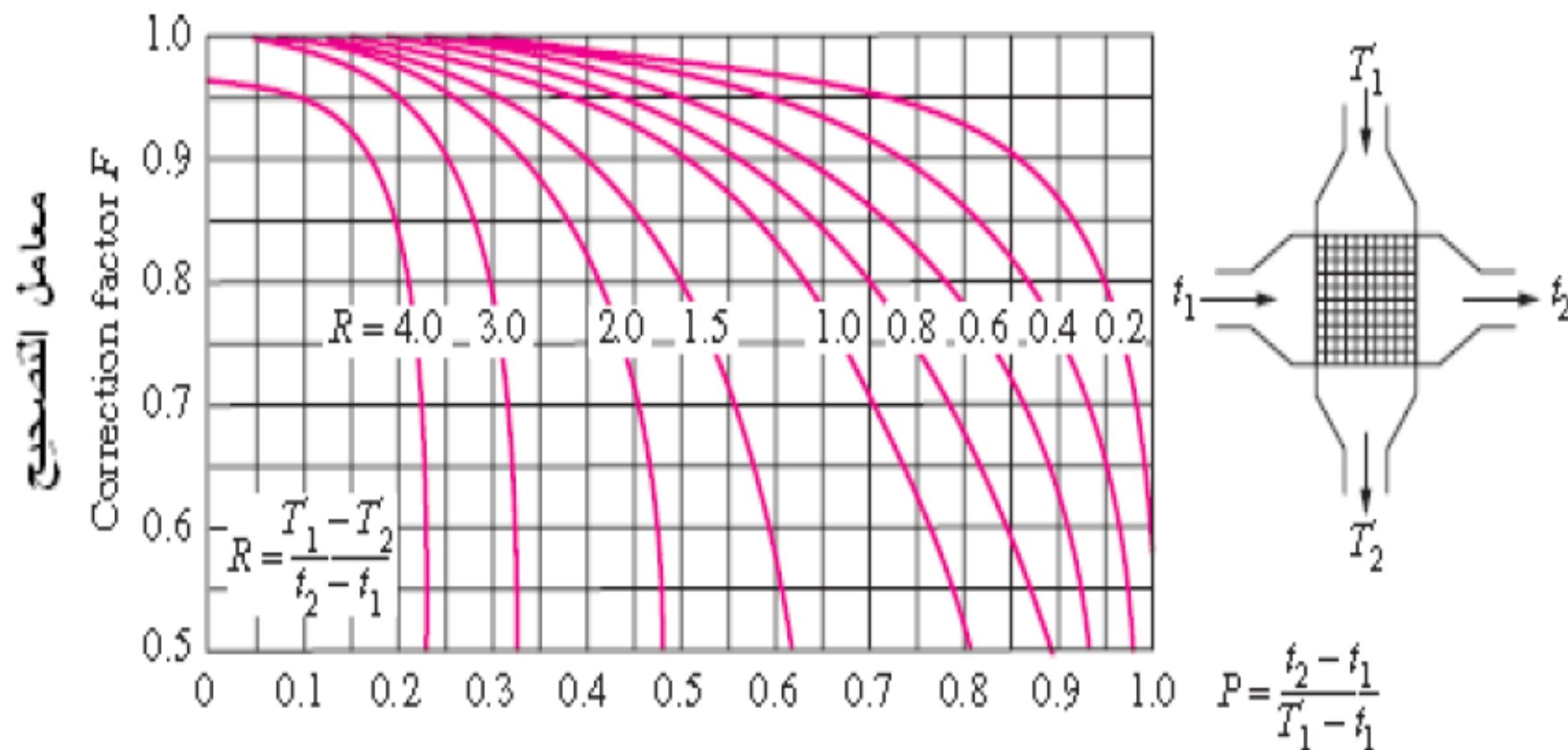


(a) One-shell pass and 2, 4, 6, etc. (any multiple of 2), tube passes

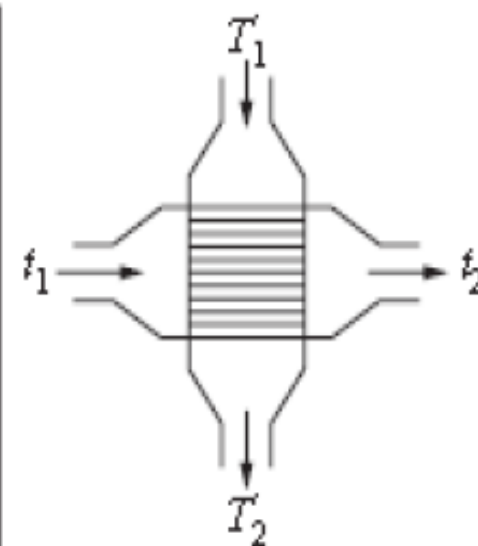
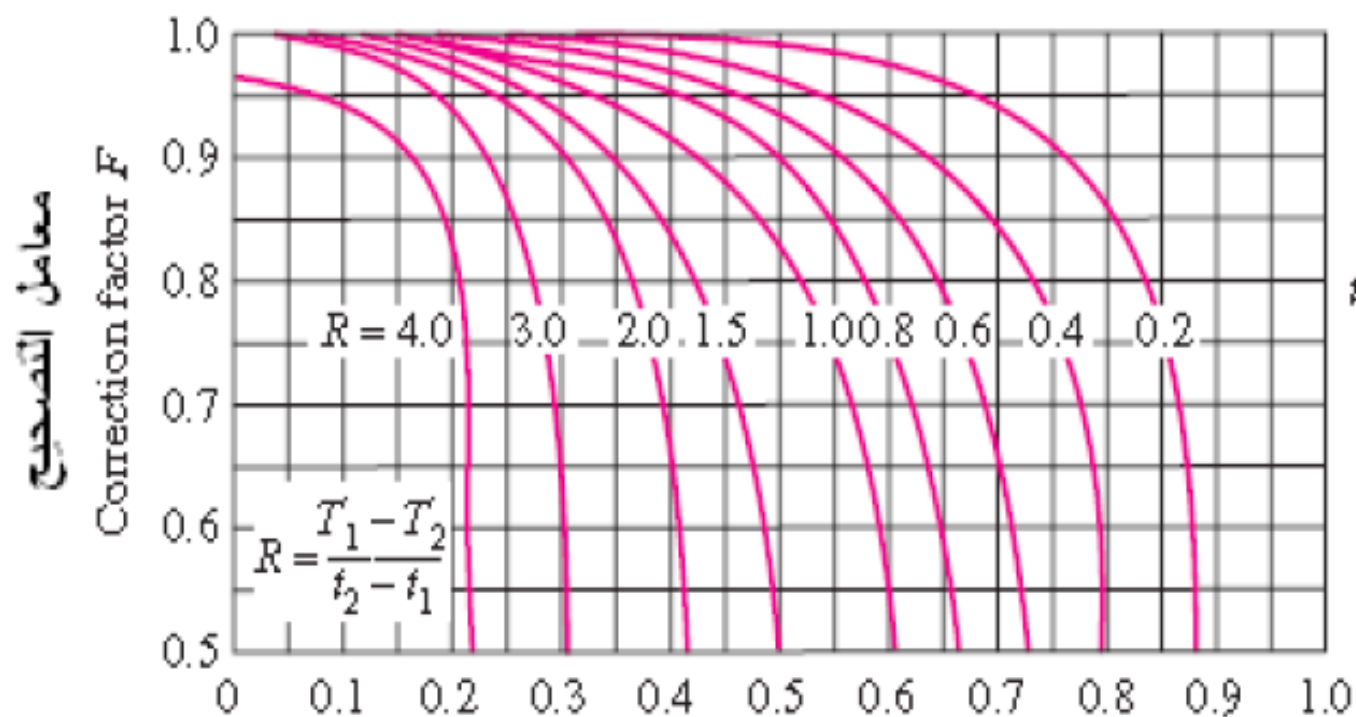


$$P = \frac{t_2 - t_1}{T_1 - t_1}$$

(b) Two-shell passes and 4, 8, 12, etc. (any multiple of 4), tube passes



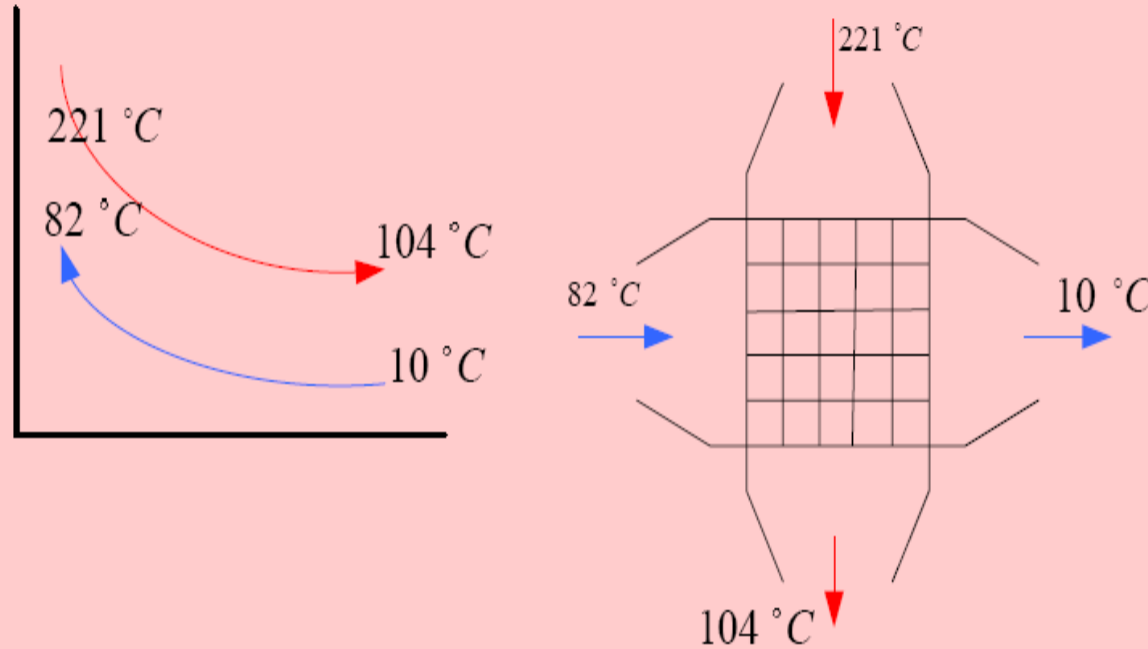
(c) Single-pass cross-flow with both fluids *unmixed*



$$P = \frac{t_2 - t_1}{T_1 - T_2}$$

(d) Single-pass cross-flow with one fluid *mixed* and the other *unmixed*

مثال: في مبادل حراري مستعرض غير مختلط يستخدم لتسخين الماء من 10°C إلى 82°C باستخدام غاز ساخن درجة حرارة دخوله 221°C ودرجة حرارة خروجه 104°C . إذا كان معامل انتقال الحرارة الكلي $113.5 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}}$. احسب مساحة سطح المبادل الحراري.



الحل : نضع المبادل الحراري المستعرض كمبادل حراري أنبوبي عكسي السريان ونحسب له ΔT_m .

$$T_{h_1} - T_{c_2} = 221 - 82 = 139 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$T_{h_2} - T_{c_1} = 104 - 10 = 94 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\Delta T_m = \frac{(T_{h_1} - T_{c_2}) - (T_{h_2} - T_{c_1})}{\ln \frac{T_{h_1} - T_{c_2}}{T_{h_2} - T_{c_1}}} = \frac{139 - 94}{\ln \frac{139}{94}} = 115.0 \text{ } ^\circ\text{C}$$

نحسب المتغيرات الهندسية المطلوبة في المنحنيات P و R

$$P = \frac{T_{c_2} - T_{c_1}}{T_{h_1} - T_{c_1}} = \frac{82 - 10}{221 - 10} = 0.34$$

$$R = \frac{T_{h_1} - T_{h_2}}{T_{c_2} - T_{c_1}} = \frac{221 - 104}{82 - 10} = 1.625$$

يمكن قراءة معامل التصحيح F لم توسط فرق درجات الحرارة اللوغاريتمي من المنحني الخاص بالمبادل الحراري المستعرض وغير المختلط

$$F = 0.93$$

$$\therefore \Delta T_m = 0.93 \times 115 = 106.95 \text{ } ^\circ\text{C}$$

نحسب معدل انتقال الحرارة من الحرارة المكتسبة للمائع البارد:

$$\dot{Q} = \dot{m}_c \times C_p \times (T_{out} - T_{in})_{water} = 0.04444 \times 4.20 \times (82 - 10) = 13.44 \text{ kW}$$

الآن يمكن حساب مساحة المبادل الحراري

$$A = \frac{\dot{Q}}{U \times \Delta T_m} = \frac{13.44 \times 1000}{113.5 \times 106.95} = 1.107 \text{ m}^2$$

طريقة تحليل المبادل الحراري بالفعالية وعدد الوحدات الحرارية المنقولة :

Effectiveness and Number of Transfer Units(ϵ -NTU) Method:

لقد رأينا أنه يمكننا تحليل المبادلات الحرارية باستخدام متوسط فرق درجات الحرارة اللوغاريتمي عند معرفة كل درجات الحرارة الداخلة والخارجة للمبادل. أما إذا كانت درجات الحرارة الخارجة مثلا غير معلومة فإن تحليل المبادل الحراري سيكون طويلا ومعقدا. عليه فإن طريقة الفعالية وعدد الوحدات المنقولة هي طريقة أخرى لتحليل المبادل الحراري في مثل هذه الحالات.

تعرف فعالية المبادل الحراري بأنها النسبة بين معدل الحرارة المنقولة فعلا بواسطة المبادل الحراري إلى أقصى معدل للحرارة يمكن لهذا المبادل الحراري أن ينقله.

معدل الحراري الفعلي المنقول بواسطة المبادل الحراري يمكن حسابه من "معدل الحرارة المكتسبة بواسطة المائع البارد أو المفقودة بواسطة المائع الساخن"

للمبادل الحراري عكسي أو متوازي السريان يمكن حساب معدل انتقال الحرارة الفعلي من المعادلات التالية:

$$\dot{Q}_c = \dot{Q}_h = \dot{m}_c \times C_c \times (T_{c_2} - T_{c_1}) = \dot{m}_h \times C_h \times (T_{h_1} - T_{h_2}) \quad (2-49)$$

ويحسب أعلى معدل للحرارة يمكن للمبادل أن ينقله من المعادلة التالية:

$$\dot{Q}_{max} = (\dot{m} \times C_p)_{min} \times (T_{h_1} - T_{c_1}) \quad (2-50)$$

بمعنى أن أقصى معدل حرارة يمكن للمبادل أن ينقله يحسب بضرب أدنى سعة حرارية $(\dot{m} \times C_p)_{min}$ (حاصل ضرب معدل السريان في الحرارة النوعية) في أقصى فرق في درجات الحرارة موجود في المبادل وهو الفرق بين درجة حرارة المائع الساخن عند الدخول ودرجة حرارة المائع البارد عند الدخول $T_{h_1} - T_{c_1}$. مثلاً لو افترضنا أن المائع البارد هو المائع الذي له أقل سعة حرارية عليه يمكن حساب فعالية المبادل الحراري من المعادلة التالية:

$$\varepsilon_c = \frac{\dot{Q}_{actual}}{\dot{Q}_{max}} = \frac{(\dot{m} \times C_p)_c \times (T_{c_2} - T_{c_1})}{(\dot{m} \times C_p)_c \times (T_{h_1} - T_{c_1})} \quad (2-51)$$

يمكن استنتاج أنه في حالة أن المائع الساخن هو المائع الذي له أقل سعة حرارية فإن الفعالية للمبادل يمكن حسابها من المعادلة التالية:

$$\varepsilon_h = \frac{\dot{Q}_{actual}}{\dot{Q}_{max}} = \frac{T_{h_1} - T_{h_2}}{T_{h_1} - T_{c_1}} \quad (2-52)$$

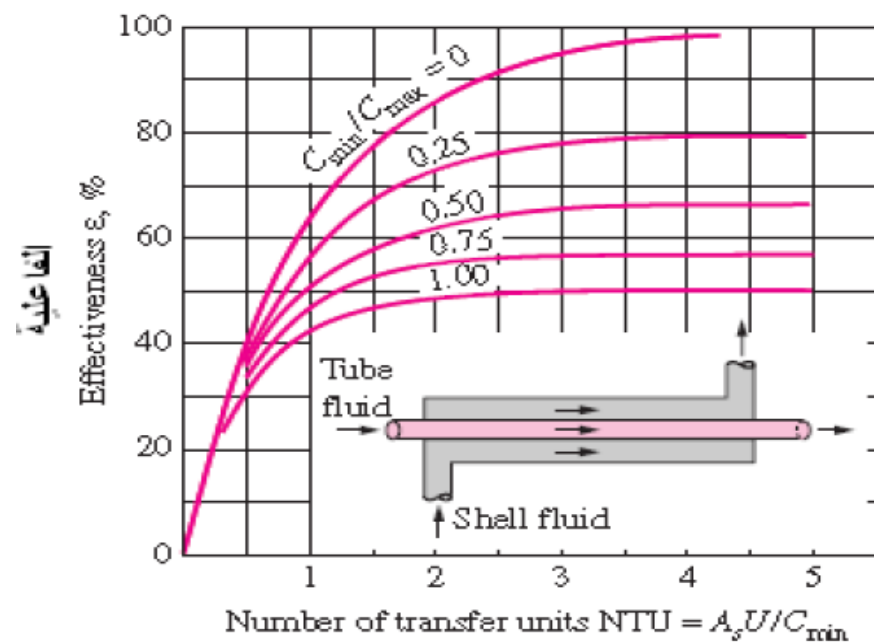
لقد وجد أن فعالية المبادل الحراري هي دالة فيما يعرف بعدد الوحدات المنقولة والنسبة بين أقل سعة حرارية إلى أعلى سعة حرارية. عدد الوحدات المنقولة هي كمية لا بعدية dimensionless أي حاصل ضرب معامل انتقال الحرارة الكلي في مساحة سطح المبادل الحراري مقسوما على أقل سعة حرارية للمائعين بمعنى أن

$$NTU = \frac{U \times A}{\left(m \times C_p\right)_{min}} \quad (2-53)$$

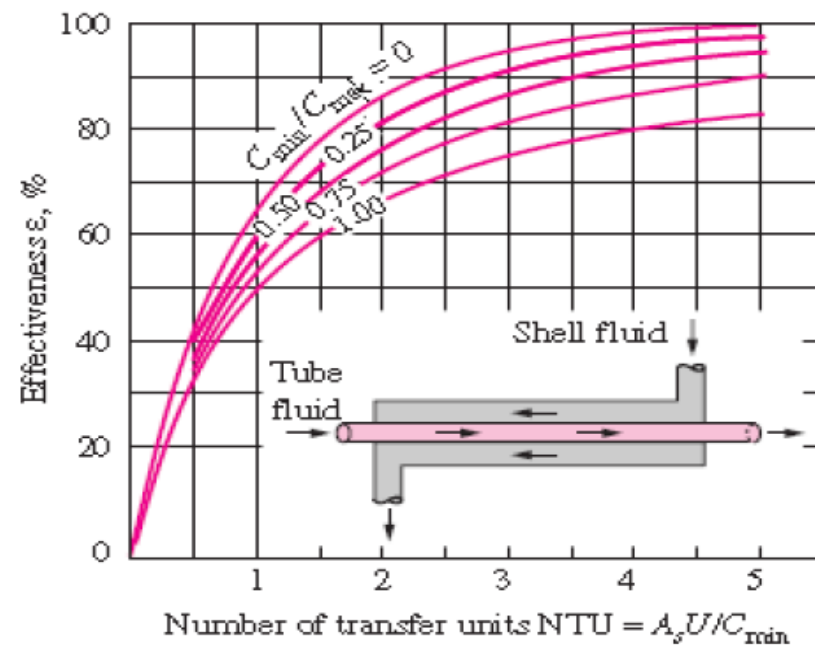
و النسبة بين أقل وأعلى سعة حرارية هي كالتالي:

$$C = \frac{\left(m \times C_p\right)_{min}}{\left(m \times C_p\right)_{max}} \quad (2-54)$$

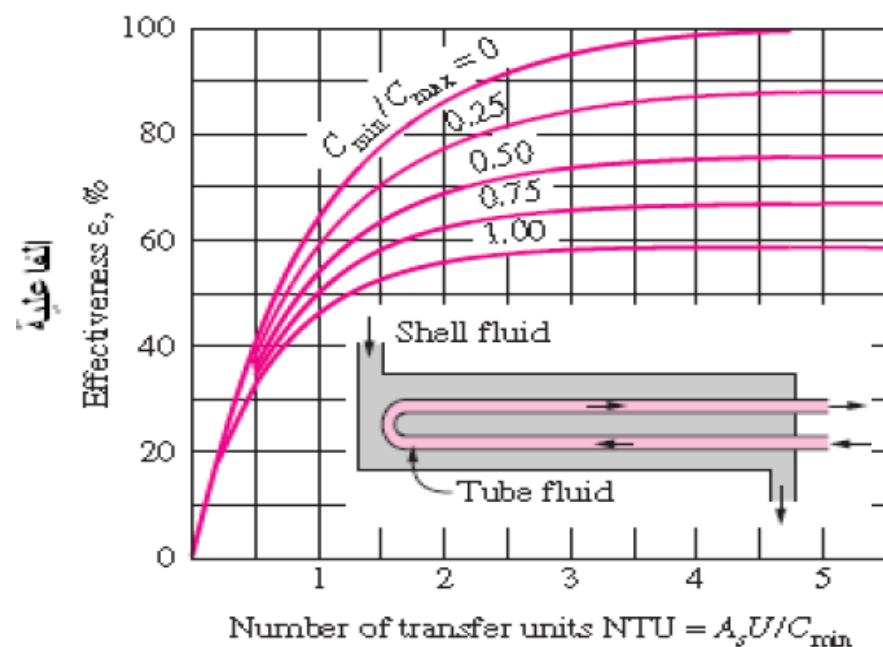
المعادلات المذكورة عاليه (2-52) و (2-53) و (2-54) أمكن وضعها في شكل منحنيات لقيم مختلفة لعدد الوحدات المنقولة NTU والنسبة بين السعة الحرارية الأقل إلى السعة الحرارية الأعلى C والفعالية ϵ وذلك لكل أنواع المبادلات الحرارية وباستخدام هذه المنحنيات أمكن تحليلها وبالتالي تصميم واختيار المبادل الحراري المناسب للتطبيق المناسب. (انظر المنحنيات في الشكل ٢- ٤٧)



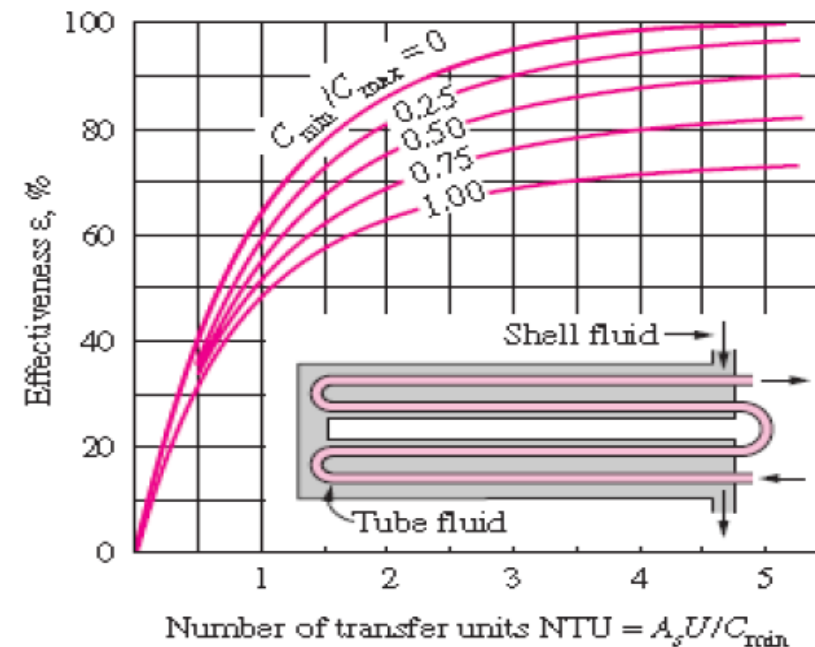
(a) Parallel-flow



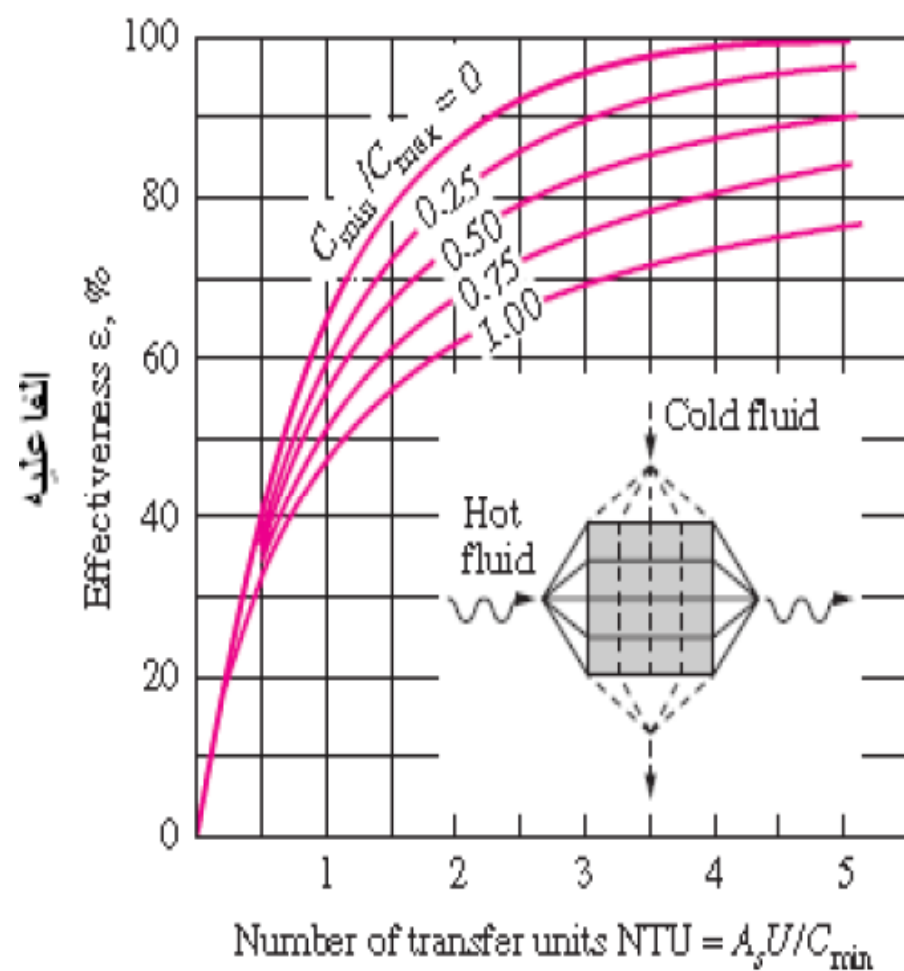
(b) Counter-flow



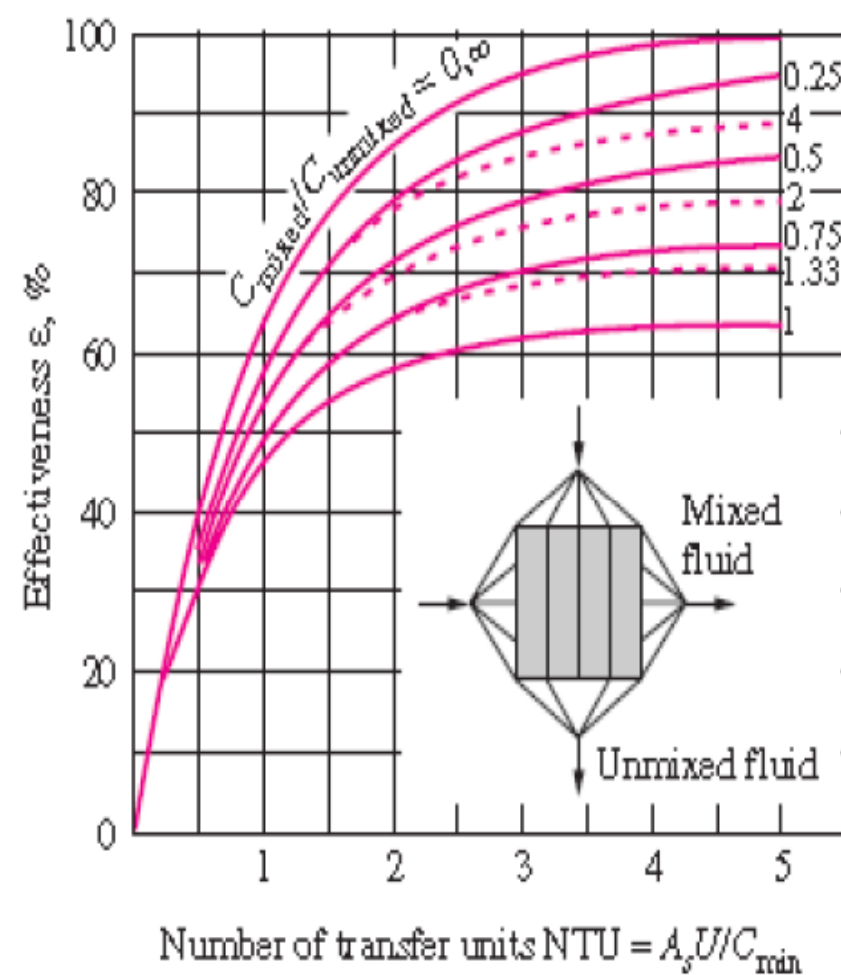
(c) One-shell pass and 2, 4, 6, ... tube passes



(d) Two-shell passes and 4, 8, 12, ... tube passes



(e) Cross-flow with both fluids unmixed

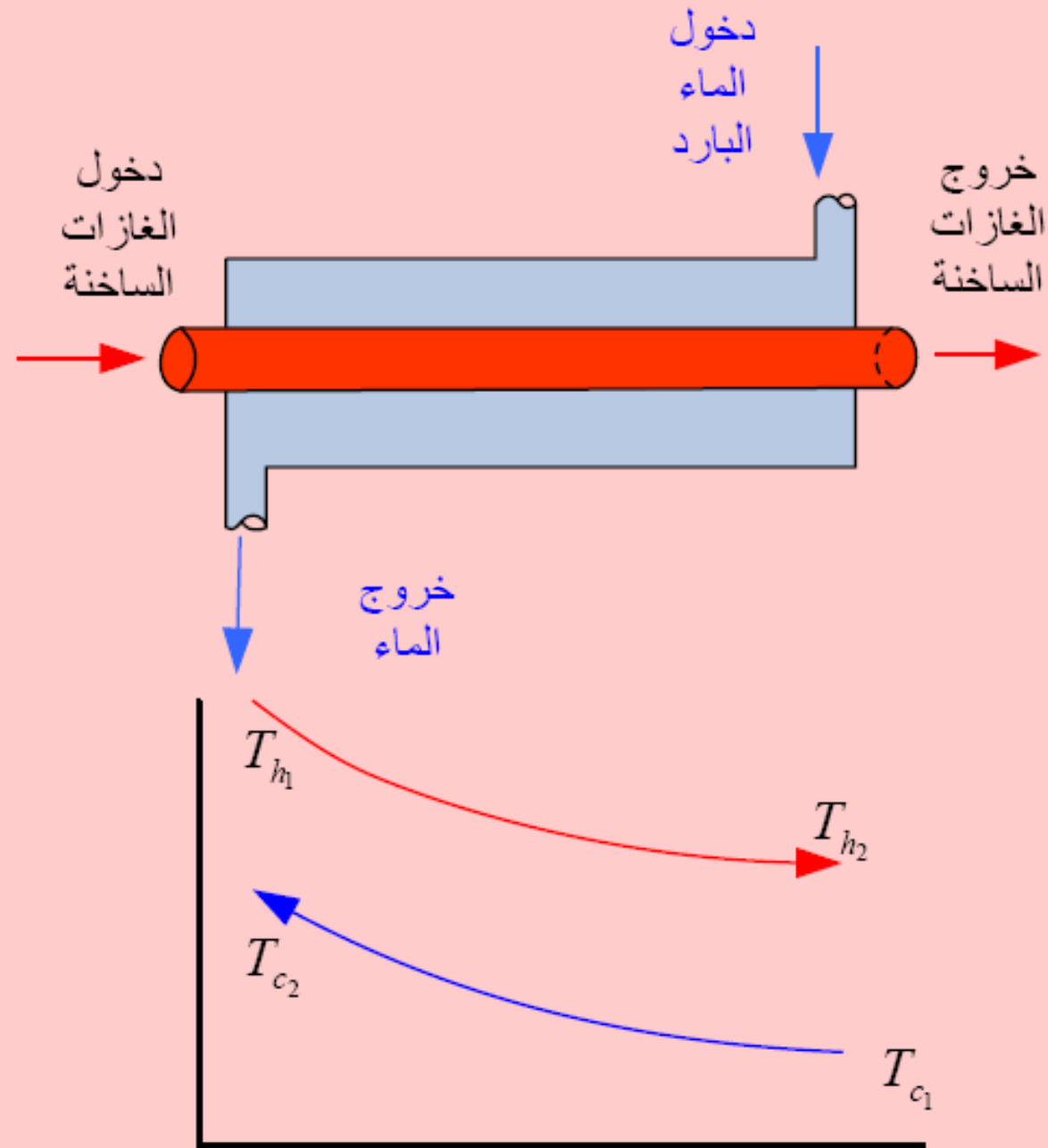


(f) Cross-flow with one fluid mixed and the other unmixed

Table 10-2. Summary of effectiveness equations.

Exchanger Type	Effectiveness	Figure Equation
Parallel-flow: single-pass	$\epsilon = \frac{1 - \exp[-NTU(1 + C)]}{1 + C}$	Fig. 10-10 eq. (10.27)
Counterflow: single-pass	$\epsilon = \frac{1 - \exp[-NTU(1 - C)]}{1 - C \exp[-NTU(1 - C)]}$	Fig. 10-11 eq. (10.28)
Shell-and-tube (one shell pass; 2, 4, 6, etc., tube passes)	$\epsilon_1 = 2 \left[1 + C + \frac{1 + \exp[-NTU(1 + C^2)^{1/2}]}{1 - \exp[-NTU(1 + C^2)^{1/2}]} (1 + C^2)^{1/2} \right]^{-1}$	Fig. 10-12 eq. (10.29)
Shell-and-tube (n shell passes; $2n, 4n, 6n$, etc., tube passes)	$\epsilon_n = \left[\left(\frac{1 - \epsilon_1 C}{1 - \epsilon_1} \right)^n - 1 \right] \left[\left(\frac{1 - \epsilon_1 C}{1 - \epsilon_1} \right)^n - C \right]^{-1}$	Fig. 10-13 for $n = 2$ eq. (10.30)
Crossflow (both streams unmixed)	$\epsilon = 1 - \exp \left\{ \left(\frac{1}{C} \right) (NTU)^{0.22} [\exp[-C(NTU)^{0.78}] - 1] \right\}$	Fig. 10-14 eq. (10.31)
Crossflow (both streams mixed)	$\epsilon = NTU \left[\frac{NTU}{1 - \exp(-NTU)} + \frac{(NTU)(C)}{1 - \exp[-(NTU)(C)]} - 1 \right]^{-1}$	No figure eq. (10.32)
Crossflow (stream C_{min} unmixed)	$\epsilon = \left(\frac{1}{C} \right) \{ 1 - \exp[-C \{ 1 - \exp(-NTU) \}] \}$	Fig. 10-15 (dashed curves) eq. (10.33)
Crossflow (stream C_{max} unmixed)	$\epsilon = 1 - \exp \left\{ - \left(\frac{1}{C} \right) [1 - \exp[-(NTU)(C)]] \right\}$	Fig. 10-15 (solid curves) eq. (10.34)
Parallel-flow: single-pass $C = 1$	$\epsilon = \frac{1 - \exp(-2NTU)}{2}$	No figure eq. (10.35)
Counterflow: single-pass $C = 1$	$\epsilon = \frac{NTU}{NTU + 1}$	No figure eq. (10.36)

مثال: مبادل حراري أنبوبي عكسي السريان (شكل ٢- ٤٦) ، استخدمت فيه الغازات الساخنة لتسخين تيار ماء يمر بمعدل سريان قدره $2.5 \frac{kg}{sec}$ من درجة حرارة $35^\circ C$ إلى درجة حرارة $85^\circ C$. إذا كانت درجة حرارة الغازات الساخنة عند الدخول $200^\circ C$ وعند الخروج $93^\circ C$ وحرارتها النوعية تساوي $1.09 \frac{kJ}{kg^\circ C}$ وكان معدل انتقال الحرارة الكلي يساوي $180 \frac{W}{m^2^\circ C}$ ، احسب مساحة المبادل الحراري مستخدما الطريقتين طريقة متوسط فرق درجات الحرارة اللوغاريتمي وطريقة الفعالية وعدد الوحدات المنقولة.



الحل:

(أ) طريقة متوسط فرق درجات الحرارة اللوغاريتمي:

نحسب ΔT_m

$$\Delta T_m = \frac{(T_{h_1} - T_{c_2}) - (T_{h_2} - T_{c_1})}{\ln \frac{T_{h_1} - T_{c_2}}{T_{h_2} - T_{c_1}}} = \frac{(200 - 85) - (93 - 35)}{\ln \frac{200 - 85}{93 - 35}} = \frac{115 - 58}{\ln \frac{115}{58}} = \frac{57}{0.6845} = 83.3 \text{ } ^\circ\text{C}$$

ولحساب معدل انتقال الحرارة من الحرارة المكتسبة للمائع البارد نستخدم القانون التالي:

$$Q = m_c \times C_p \times (T_{c_2} - T_{c_1}) = 2.5 \times 4.18 \times (85 - 35) = 522.5 \text{ kW}$$

ولكن

$$Q = U \times A \times \Delta T_m$$

$$\therefore A = \frac{Q}{U \times \Delta T_m} = \frac{522.5 \times 1000}{180 \times 83.3} = 34.85 \text{ m}^2$$

(ب) طريقة الفعالية وعدد الوحدات المنقولة:

أولا نحسب معدل سريان الغازات الساخنة:

بمعلومية أن الحرارة المفقودة من الغازات الساخنة تساوي الحرارة المكتسبة للمائع البارد

$$\therefore m_{hot\ gases} = \frac{522.5}{1.09 \times 10^7} = 4.48 \text{ kg/sec}$$

نحسب السعة الحرارية للمائع البارد والسعة الحرارية للمائع الساخن لنرى أي المائعين له سعة حرارية أقل

$$(m \times C_p)_{hot\ gases} = 4.48 \times 1.09 = 4.88$$

$$(m \times C_p)_{cold\ water} = 2.5 \times 4.18 = 10.45$$

إذن المائع الساخن هو المائع الذي له أقل سعة حرارية

يمكن حساب الفعالية من المعادلة (2-52)

$$\varepsilon_h = \frac{Q_{actual}}{Q_{max}} = \frac{T_{h1} - T_{h2}}{T_{h1} - T_{c1}} = \frac{200 - 93}{200 - 35} = \frac{107}{165} = 0.648$$

نحسب النسبة بين السعة الحرارية الأقل إلى السعة الحرارية الأكثر C

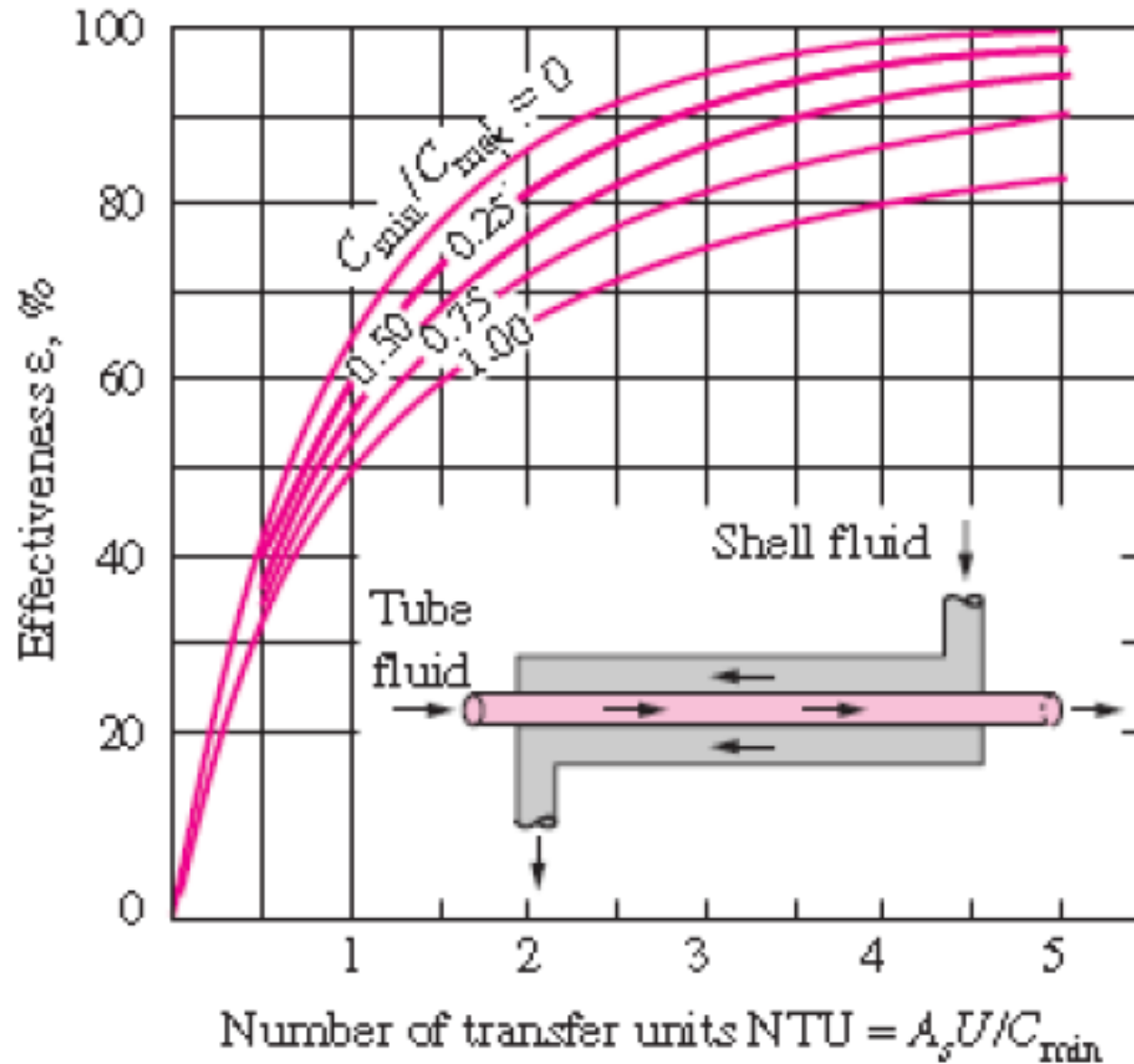
$$C = \frac{(m \times C_p)_{min}}{(m \times C_p)_{max}} = \frac{4.88}{10.45} = 0.467$$

من المنحنيات لهذا المبادل يمكن قراءة عدد الوحدات المنقولة NTU

$$NTU = 1.3$$

$$= \frac{U \times A}{(m \times C_p)_{min}} \Rightarrow A = \frac{NTU \times (m \times C_p)_{min}}{U} = \frac{1.3 \times 4.88 \times 1000}{180} = 35.24 \text{ m}^2$$

بمقارنة مساحة المبادل الحراري التي حسبناها بالطريقتين نجد أننا قد حصلنا على نفس النتيجة تقريبا



(b) Counter-flow

Table 10-2. Summary of effectiveness equations.

Exchanger Type	Effectiveness	Figure Equation
Parallel-flow: single-pass	$\epsilon = \frac{1 - \exp[-NTU(1 + C)]}{1 + C}$	Fig. 10-10 eq. (10.27)
Counterflow: single-pass	$\epsilon = \frac{1 - \exp[-NTU(1 - C)]}{1 - C \exp[-NTU(1 - C)]}$	Fig. 10-11 eq. (10.28)
Shell-and-tube (one shell pass; 2, 4, 6, etc., tube passes)	$\epsilon_1 = 2 \left[1 + C + \frac{1 + \exp[-NTU(1 + C^2)^{1/2}]}{1 - \exp[-NTU(1 + C^2)^{1/2}]} (1 + C^2)^{1/2} \right]^{-1}$	Fig. 10-12 eq. (10.29)
Shell-and-tube (n shell passes; $2n, 4n, 6n$, etc., tube passes)	$\epsilon_n = \left[\left(\frac{1 - \epsilon_1 C}{1 - \epsilon_1} \right)^n - 1 \right] \left[\left(\frac{1 - \epsilon_1 C}{1 - \epsilon_1} \right)^n - C \right]^{-1}$	Fig. 10-13 for $n = 2$ eq. (10.30)
Crossflow (both streams unmixed)	$\epsilon = 1 - \exp \left\{ \left(\frac{1}{C} \right) (NTU)^{0.22} [\exp[-C(NTU)^{0.78}] - 1] \right\}$	Fig. 10-14 eq. (10.31)
Crossflow (both streams mixed)	$\epsilon = NTU \left[\frac{NTU}{1 - \exp(-NTU)} + \frac{(NTU)(C)}{1 - \exp[-(NTU)(C)]} - 1 \right]^{-1}$	No figure eq. (10.32)
Crossflow (stream C_{min} unmixed)	$\epsilon = \left(\frac{1}{C} \right) \{ 1 - \exp[-C \{ 1 - \exp(-NTU) \}] \}$	Fig. 10-15 (dashed curves) eq. (10.33)
Crossflow (stream C_{max} unmixed)	$\epsilon = 1 - \exp \left\{ - \left(\frac{1}{C} \right) [1 - \exp[-(NTU)(C)]] \right\}$	Fig. 10-15 (solid curves) eq. (10.34)
Parallel-flow: single-pass $C = 1$	$\epsilon = \frac{1 - \exp(-2NTU)}{2}$	No figure eq. (10.35)
Counterflow: single-pass $C = 1$	$\epsilon = \frac{NTU}{NTU + 1}$	No figure eq. (10.36)

انتقال الحرارة بالإشعاع Radiation

مقدمة:

إذا وضع طرف قضيب معدني في لهب فإن الحرارة تصل لليد المسككة به من الطرف الآخر. وإذا وضعت يدك فوق اللهب فإن الحرارة تصل إلى يدك. وعند وضع اليد على أحد جانبي اللهب فإن الشعور بوصول الحرارة إلى اليد لا يزال قائماً. في الحالة الأولى الحرارة انتقلت بالتوصيل كما نعرف خلال مادة القضيب. وفي الحالة الثانية فإن الحرارة تنتقل عن طريق تيارات الحمل المتجهة إلى أعلى. أما في الحالة الأخيرة فنقول أن الحرارة انتقلت بالإشعاع. وأسطح جميع الأجسام تشع طاقة حرارية تسمى بطاقة الإشعاع

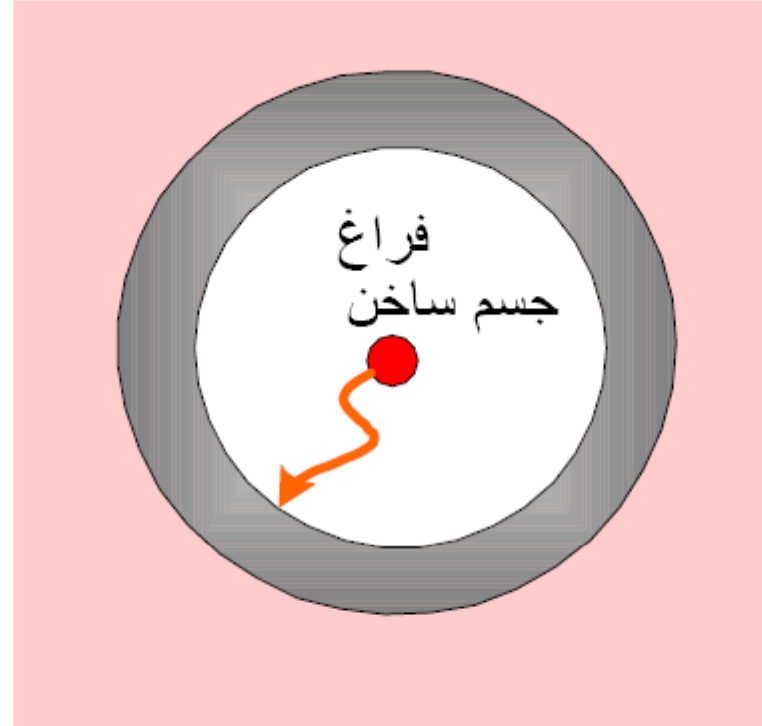
وتحمل هذه الطاقة بواسطة الموجات الكهرومغناطيسية. إن أشعة الراديو والأشعة تحت الحمراء والأشعة فوق البنفسجية والأشعة السينية كلها موجات كهرومغناطيسية تحمل طاقة حرارية وتختلف عن بعضها في طول الموجات. هذه الموجات تنتقل في خطوط مستقيمة وبسرعة الضوء ولا تحتاج إلى وسيط للانتقال فيه. أي أنها على عكس الطرق الأخرى لانتقال الحرارة لا تحتاج لوسط مادي للانتقال فيه وإنما تستطيع الحرارة الانتقال بواسطة الإشعاع خلال الفراغ. وتشع كل الأجسام حولنا حرارة طالما أن درجة حرارتها أكبر من الصفر المطلق. فالجدران، والأجهزة، والناس كلها تشع حرارة من حولنا.

الإشعاع الحراري من الجسم الأسود: Blackbody Radiation

تعتمد طاقة الإشعاع المبتعث من أي سطح على نوع مادة السطح، وطبيعته ودرجة حرارته. وبالتالي فإن الأجسام المختلفة تبتعث حرارة للمتر المربع الواحد مختلفة عندما تكون هذه الأجسام عند درجة حرارة واحدة. عليه فإنه ذو فائدة كبيرة أن نعرف الجسم الأمثل الذي يبعث ويمتص كل الإشعاع الحراري بالجسم الأسود "Black Body" مجازاً.

هنا لابد من الإشارة إلى أن الجسم الأسود للإشعاع الحراري ليس بالضرورة أن يكون لونه أسود ولكنه يعني أنه يمتص كل الضوء الواقع عليه. فمثلاً الجليد هو أبيض للعين ولكنه أسود للإشعاع الحراري. بالرغم من أنه ليس هناك جسم أسود مئة بالمئة إلا أن هناك بعض الأمثلة التي تقرب عملية (تعريف) الجسم الأسود. مثال ذلك:

- جسم صغير يشع طاقة حرارة وسط فراغ معين، انظر شكل (٢ - ٣٠).



الشكل (٢ - ٣٠) الجسم الساخن في فراغ معين يفقد الحرارة بالإشعاع فقط

في هذه الحالة فإن الطاقة الحرارية التي تقع على السطح سوف تمتص مرات عديدة، وفي النهاية تمتص كل الحرارة. عليه فإن السطح حول الجسم الصغير يمكن أن يكون جسماً أسوداً.

قانون ستيفان بولتزمان Stefan-Boltzman's Law

وجد ستيفان بولتزمان بالتجربة أن الطاقة المنبعثة من الجسم الأسود لكل متر مربع كالاتي .

$$E_b = \sigma \times T^4 \frac{W}{m^2} \quad (2-36)$$

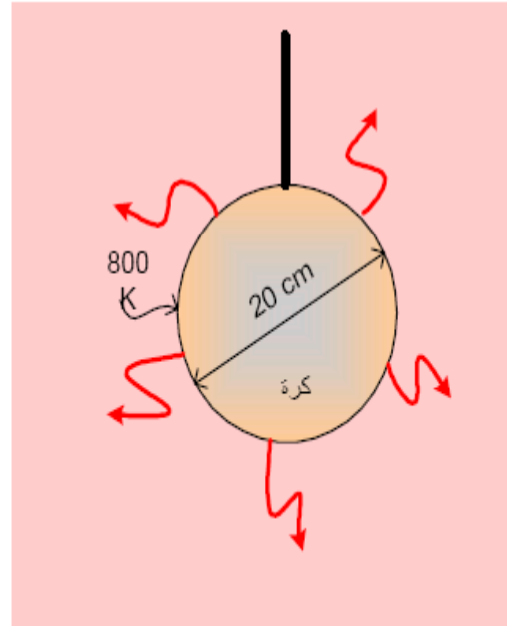
حيث σ هي ثابت ستي فإن بولتزمان

$$\sigma = 5.669 \times 10^{-8} \frac{W}{m^2 \cdot K^4}$$

ودرجة الحرارة T هي درجة الحرارة المطلقة للسطح و E_b هي القدرة الابتعاثية للجسم الأسود.

مثال (٢ - ١٤):

الشكل (٢ - ٣٢) يوضح كرة قطرها 20 cm ودرجة حرارتها 800 K. إذا كانت الكرة تمثل جسماً أسوداً فاحسب القدرة الابتعاثية الكلية للجسم الأسود وكمية الإشعاع المبتعث من الكرة في 5 min.



شكل (٢ - ٣٢) رسم للمثال (٢ - ١٤)

الحل:

بما أن الكرة تمثل جسماً أسوداً فإنه يمكن استخدام قانون ستيفان بولتزمان لحساب الحرارة المنبعثة بالإشعاع من الكرة:

$$E_b = \sigma \times T^4 = (5.669 \times 10^{-8})(800)^4 = 23224 \text{ W/m}^2$$

يمكن حساب كمية الإشعاع الكلية من سطح الكرة وذلك بضرب E_b في مساحة سطح الكرة وفي الفترة الزمنية المذكورة.

نحسب مساحة سطح الكرة:

$$A = 4\pi \times r^2 = \pi D^2 = \pi \times (0.2)^2 = 0.1257 \text{ m}^2$$

إذن يمكن حساب كمية الإشعاع الكلية من سطح الكرة في خمس دقائق:

$$Q_{rad} = E_b \times A \times \Delta t = 23224 \frac{\text{W}}{\text{m}^2} \times 0.1257 \text{ m}^2 \times 300 \text{ sec} = 875.8 \text{ kJ}$$

الانبعاثية: (ϵ) Emissivity

كما كان واضحا من المثال السابق أن أقصى معدل للإشعاع المبعث من سطح درجة حرارته المطلقة T_s يعطى بواسطة قانون ستي فإن بولتزمان كالتالي:

$$q_{emit\ max} = \sigma \times A \times T_s^4 \text{ W} \quad (2-37)$$

وهو الإشعاع المبعث من الجسم الأسود ($\epsilon=1$).

إن الإشعاع المبعث من أي جسم عند درجة حرارة T_s يعطى بواسطة المعادلة

$$q = \epsilon \times \sigma \times A \times T_s^4 \text{ W} \quad (2-38)$$

حيث ε هي الابعثائية للجسم. والابعثائية والتي تتراوح قيمتها بين الصفر والواحد الصحيح ،
 $(0 \leq \varepsilon \leq 1)$ هي مقدرة الجسم لمحاكاة الجسم الأسود ($\varepsilon = 1$) في ابعثات الحرارة وتعرف الابعثائية بأنها
 النسبة بين ما يبعثه السطح (أي سطح) من حرارة إلى الإشعاع المبعث بواسطة الجسم الأسود عند نفس
 درجة الحرارة. الجدول (٢ - ٣) يوضح قيماً للابعثائية لبعض المواد.
 كما ذكرنا فإن الابعثائية هي النسبة بين الحرارة التي يبعثها الجسم إلى الإشعاع المبعث بواسطة
 الجسم الأسود عند نفس درجة الحرارة: أي أن

$$\varepsilon = \frac{E}{E_b} = \frac{E}{\sigma \times T^4}$$

حيث E هي الإشعاع المبعث بواسطة الجسم الحقيقي غير الأسود.

وبالتالي فإن كمية الإشعاع الكلي المبعث بواسطة جسم حقيقي مساحة سطحه A هي:

$$E = \varepsilon \times A \times \sigma \times T^4 W$$

عندما يكون هناك سطح له ابتعاثية ε ودرجة حرارة مطلقة T_s ومساحة سطح A وهذا السطح يحتويه سطح آخر ضخم (أسود) عند درجة حرارة T_{sur} فإن محصلة معدل انتقال الحرارة بالإشعاع بين السطحين تعطى بالمعادلة التالية:

$$Q_{rad} = \varepsilon \times \sigma \times A \times (T_s^4 - T_{sur}^4) W \quad (2-39)$$

مثال (٢ - ١٥):

الجدران والسقف المحيطة به. هنالك شخص واقف في غرفة درجة حرارتها 22 C في كل الأوقات. متوسط درجة حرارة أسطح الجدران والسقف والأرضية 10 C شتاء و 25 C صيفا. احسب معدل انتقال الحرارة بالإشعاع بين هذا الشخص والبيئة المحيطة به. خذ درجة حرارة الشخص 30 C ومساحة سطح الشخص 1.4 m^2 وابتعاثية جسم الإنسان تساوي 0.95 .

الحل:

أسطح الجدران والسقف والأرضية تحتوي الشخص بصورة كاملة وبالتالي يمكن اعتبار أن هذه السطوح جسم أسود وبالتالي يمكن حساب معدل انتقال الحرارة بالإشعاع بين الشخص وهذه السطوح بالمعادلة التالية:

$$Q_{\text{rad}} = \varepsilon \times \sigma \times A \times (T_s^4 - T_{\text{surr}}^4) \text{ W}$$

إذن معدل الإشعاع في فصل الشتاء:

$$Q_{\text{rad,win}} = 0.95 \times 5.67 \times 10^{-8} \times 1.4 \times (303^4 - 283^4) = 152 \text{ W}$$

إذن معدل الإشعاع في فصل الصيف:

$$Q_{\text{rad,summer}} = 0.95 \times 5.67 \times 10^{-8} \times 1.4 \times (303^4 - 298^4) = 40.9 \text{ W}$$

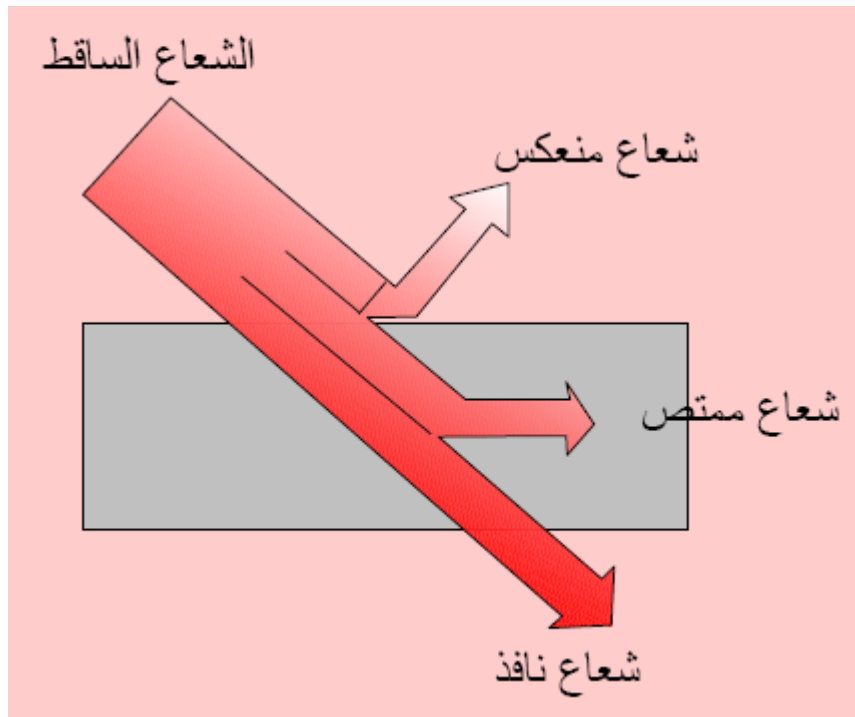
المادة	الابتعاثية ϵ	المادة	الابتعاثية ϵ
شرائح الألمنيوم	0.07	طلاء أبيض	0.90
نحاس مصقول	0.03	إسفلت	0.85-0.93
ذهب مصقول	0.03	طوب أحمر	0.93-0.96
فضة مصقول	0.02	خشب	0.82-0.92
حديد صلب مصقول	0.17	الماء	0.96
طلاء أسود	0.98	الجسم البشري	0.95

جدول (٢ - ٣) الابتعاثية لبعض المواد

الامتصاصية، الانعكاسية والنفاذية: Absorptivity, Reflectivity & Transmissivity

بالإشارة إلى شكل (٢ - ٣٣)، فإن الإشعاع الحراري الذي يقع على أي جسم يمكن له أن:

- ١- يمتص بواسطة الجسم
- ٢- ينعكس من على الجسم
- ٣- ينفذ من خلال الجسم



يسمى الجزء الممتص بواسطة الجسم بالامتصاصية "Absorptivity" ويرمز له بـ α والجزء المنعكس بالانعكاسية "Reflectivity" ويرمز له بـ ρ والجزء النافذ بالنفاذية "Transmissivity" ويرمز له بـ τ عليه فإن مجموع هذه الأجزاء المكونة للإشعاع الحراري تساوي الواحد الصحيح أي أن:

$$\alpha + \rho + \tau = 1 \quad (2-40)$$

وفي الأجسام المعتمدة فإن $\tau = 0$ وبالتالي

$$\alpha + \rho = 1$$

وحيث إن الجسم الأسود يمتص كل الإشعاع الساقط $\rho = 0$ وبالتالي

$$\alpha = 1$$

تعرف الامتصاصية α بأنها النسبة بين الإشعاع الممتص بواسطة الجسم إلى الإشعاع الساقط. وكذلك تعرف الانعكاسية ρ بأنها النسبة بين الإشعاع المنعكس إلى الإشعاع الساقط. والنفاذية τ هي النسبة بين الإشعاع النافذ إلى الإشعاع الساقط.

معامل الشكل : The View Factor

يعتمد الإشعاع بين أي سطحين على وضع هذه الأسطح بالنسبة لبعضها البعض orientation وخواصها ودرجات حرارتها. يعرف معامل الشكل shape factor بأنه المعامل الذي يعطى الجزء من كمية الإشعاع الحراري الذي يغادر السطح (أ) ليستقر على السطح (ب). ويرمز له بالرمز $F_{1 \rightarrow 2}$ ليعني الجزء من الإشعاع الذي يغادر السطح (1) ليستقر على السطح (2). و $F_{2 \rightarrow 1}$ ليعني الجزء من الإشعاع الذي يغادر السطح (2) ليستقر على السطح (1). وبالاستعانة بشكل (٢ - ٣٤) يمكن ملاحظة أن:

$$F_{i \rightarrow i} = 0 \quad (2-41)$$

في حالة السطوح الأفقية والسطوح المحدبة convex. أما في حالة السطوح المقعرة concave (أي تلك السطوح التي "تري" نفسها) فإن معامل الشكل لا يساوي صفراً.

كما يمكن بالاستعانة بشكل (٢ - ٣٥) ملاحظة أن:

$$F_{i \rightarrow j} = 1 \quad (2-42)$$

سطح افقی مستوی

$$F_{1-2}=0$$



سطح محدب

$$F_{1-2}=0$$



سطح مقعر

$$F_{1-2} \neq 0$$



Consider two black surfaces of arbitrary shape maintained at uniform temperatures T_1 and T_2 , as shown in Figure 12–18. Recognizing that radiation leaves a black surface at a rate of $E_b = \sigma T^4$ per unit surface area and that the view factor $F_{1 \rightarrow 2}$ represents the fraction of radiation leaving surface 1 that strikes surface 2, the *net* rate of radiation heat transfer from surface 1 to surface 2 can be expressed as

$$\begin{aligned}\dot{Q}_{1 \rightarrow 2} &= \left(\begin{array}{l} \text{Radiation leaving} \\ \text{the entire surface 1} \\ \text{that strikes surface 2} \end{array} \right) - \left(\begin{array}{l} \text{Radiation leaving} \\ \text{the entire surface 2} \\ \text{that strikes surface 1} \end{array} \right) \\ &= A_1 E_{b1} F_{1 \rightarrow 2} - A_2 E_{b2} F_{2 \rightarrow 1} \quad (\text{W})\end{aligned}\quad (12-18)$$

Applying the reciprocity relation $A_1 F_{1 \rightarrow 2} = A_2 F_{2 \rightarrow 1}$ yields

$$\dot{Q}_{1 \rightarrow 2} = A_1 F_{1 \rightarrow 2} \sigma (T_1^4 - T_2^4) \quad (\text{W}) \quad (12-19)$$

Example 1

Two parallel black plates 0.5 by 1.0 m are spaced 0.5 m apart. One plate is maintained at 1000°C and the other at 500°C. What is the net radiant heat exchange between the two plates?

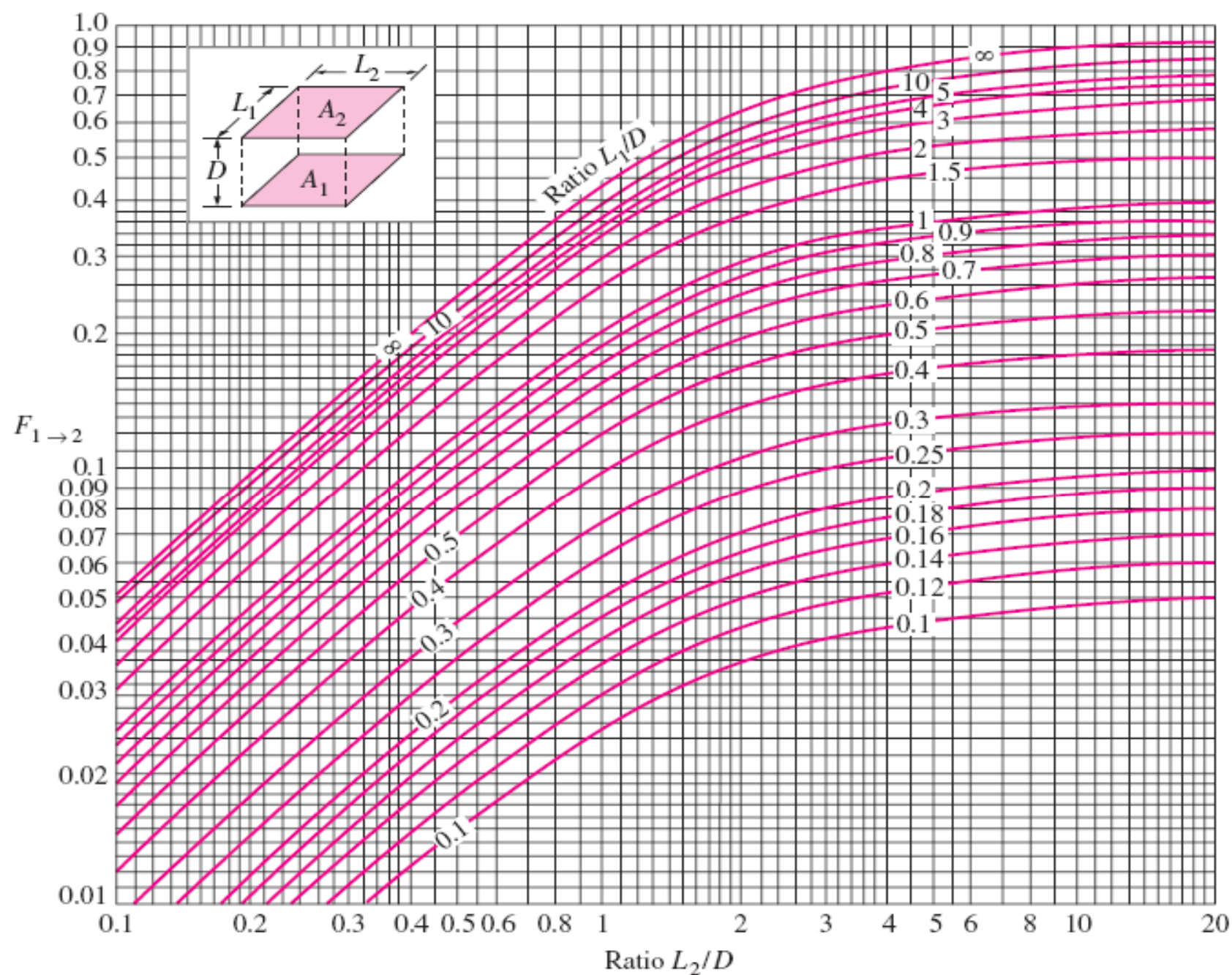
Solution

The ratios for use with Fig. 8-12 are

$$L1/D = \frac{Y}{D} = \frac{0.5}{0.5} = 1.0 \quad \frac{X}{D} = \frac{1.0}{0.5} = 2.0 = L2/D$$

so that $F_{12} = 0.285$. The heat transfer is calculated from

$$\begin{aligned} q &= A_1 F_{12} (E_{b1} - E_{b2}) = \sigma A_1 F_{12} (T_1^4 - T_2^4) \\ &= (5.669 \times 10^{-8})(0.5)(0.285)(1273^4 - 773^4) \\ &= 18.33 \text{ kW} \quad [62,540 \text{ Btu/h}] \end{aligned}$$



ما هي الطاقة الشمسية؟

الطاقة الشمسية هي المصدر الرئيسي للطاقة علي سطح كوكبنا وهي مصدر كل الطاقات التي نعرفها والتي لم نعرفها بعد ، فحرارة الشمس هي السبب الرئيسي لتكوين الوقود الحفري كالفحم والبتروول والغاز الطبيعي ، والشمس هي المسبب الرئيسي لحركة الرياح علي سطح كوكب الأرض ، وهي السبب في تبخر مياه البحار والمحيطات لتسقط لنا الأمطار بعد ذلك وهي السبب في الحفاظ علي حرارة الأرض مناسبة لنعيش فيها. وهي طاقة نظيفة ومتجددة ومجانية (فلا أحد يستطيع ان يشتري الشمس ويحببها عن الباقيين) والطاقة الشمسية تصل لنا في صورتين فقط الصورة الأولى هي طاقة حرارية بالأشعاع والصورة الثانية هي طاقة ضوئية والطاقة الشمسية في الأساس هي تلك الطاقة الناتجة عن تفاعلات اندماجية عملاقة تحدث باستمرار علي سطح الشمس يتحول فيها الهيدروجين الي هيليوم وينطلق منها كمية هائلة من الطاقة.



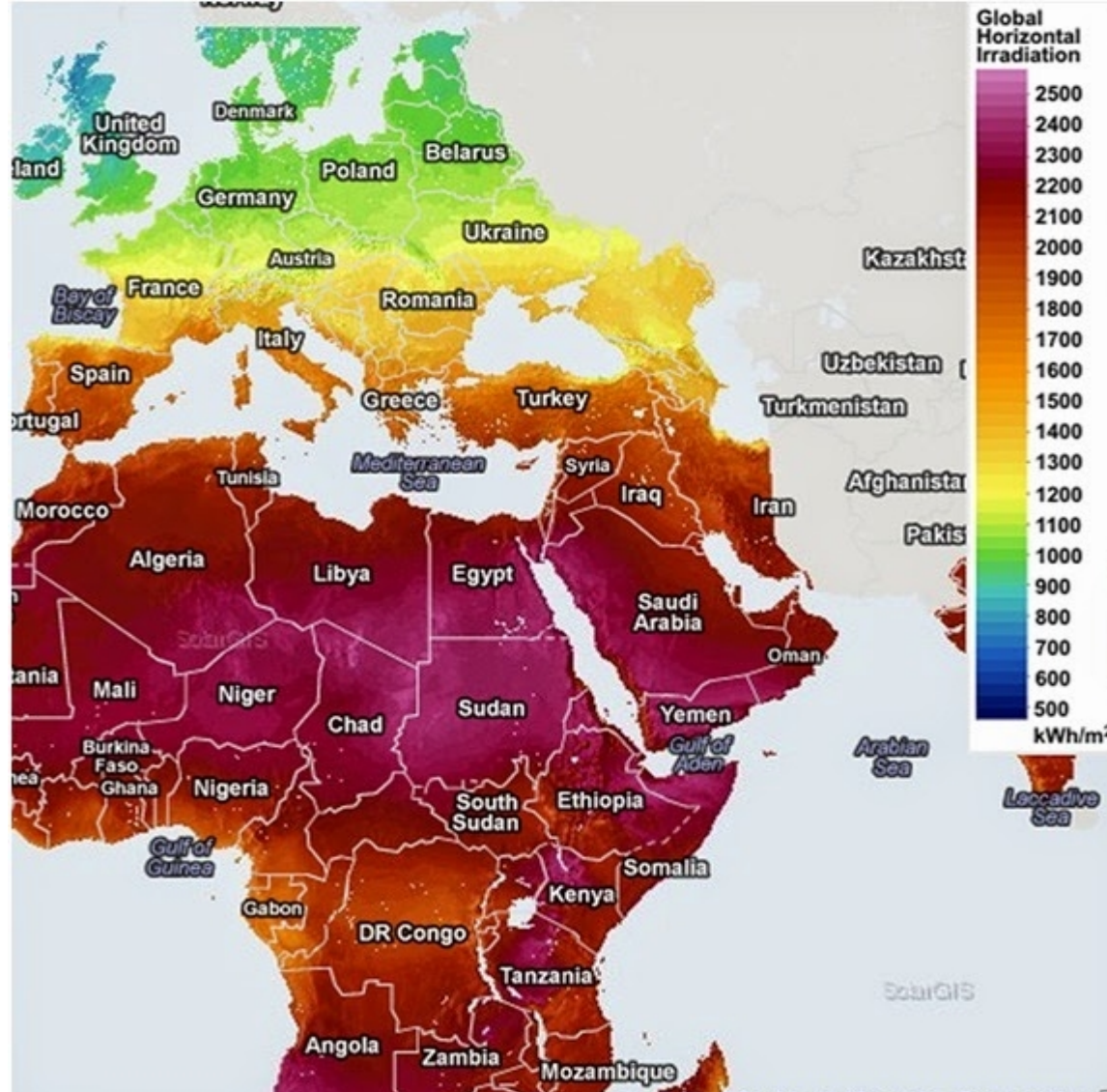
كيف تنتقل الطاقة الشمسية إلينا؟

تحصل الأرض علي الطاقة الشمسية عن طريق الاشعاع الشمسي .
وهذه الطاقة الاشعاعية تأتي إلينا بواسطة جسيمات متناهية الصغر
وعديمة الوزن تسمى الفوتونات. والفوتونات تتصرف كالموجات
الكهرومغناطيسية حيث ان لها نفس الخصائص من (طول موجي و
تردد و طاقة) .

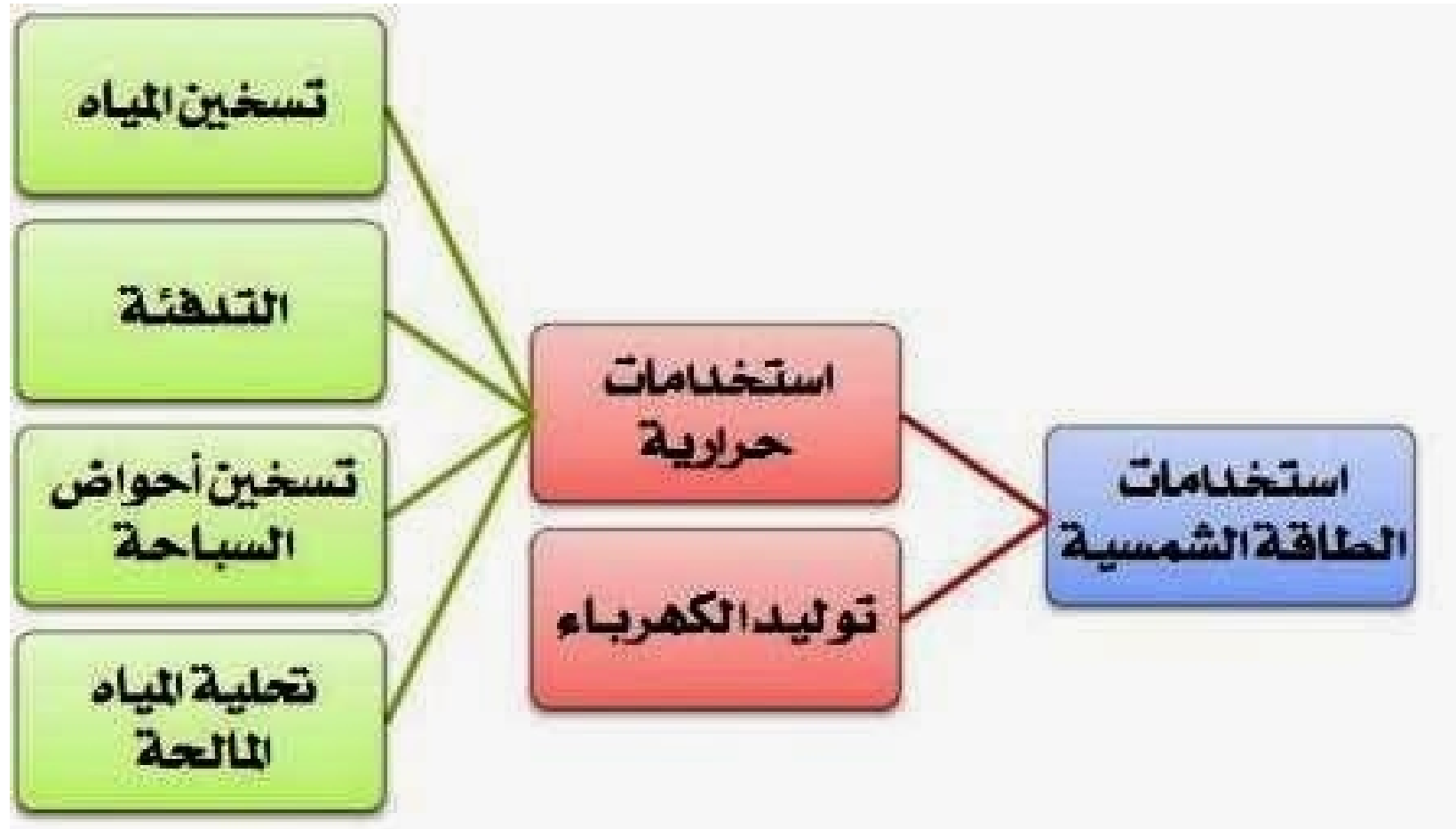
كل طاقة الفوتونات تعتبر طاقة كهرومغناطيسية تحتل جميع الأطوال
الموجية والترددات الممكنة. والشكل بالأسفل يوضح الاشعاعات
المختلفة الصادرة من الشمس عن طريق الفوتونات. . ويمكن تقسيمها
إلي موجات الراديو والميكرو و اف واشعة تحت الحمراء وموجات
مرئية واشعة فوق البنفسجية واشعة أكس وأشعة جاما.

هل يسقط كل هذا القدر من الاشعاع الشمسي علي سطح الأرض ؟
الاجابة بوضوح لا وفي الحقيقة لو أن الاشعاع الشمسي يصل الينا
كاملا لكان من الصعب ان تكون هناك حياة علي سطح كوكبنا.
فالأرض لها خطي دفاع :
الأول هو الغلاف الكهرومغناطيسي المحيط بالأرض والناجم عن دوران
الأرض حول محورها وهو يقوم بتشتيت الأشعة الكونية عالية الطاقة.
خط الدفاع الثاني وهو الغلاف الجوي المحيط بالأرض حيث ان طبقة
الأوزون وبخار الماء الموجود في الهواء الجوي يقومان بامتصاص
الطاقة الشمسية للموجات فوق بنفسجية.
والشكل بالاسفل يوضح بالمنحني الاحمر الطاقة الشمسية أو الاشعاع
الشمسي في الفضاء والمنحني باللون الأخضر يوضح الطاقة الشمسية او
الاشعاع الشمسي بعد وصوله الي سطح الأرض بعد مروره بخطوط
الدفاع.

كما هو واضح فالشريط علي اليمين يمثل بالالوان كمية الطاقة الشمسية التي يحصل عليها كل متر مربع من الأرض علي مدار علم كلى. من الواضح ان العالم العربي هو أحد أغني المناطق بالطاقة الشمسية فكل متر مربع من الأرض يجني ما بين ٢٢٠٠ الى ٢٥٠٠ كيلو وات ساعة في السنة. وهذا الرقم طبعاً يفهمه المتخصصون وهو ليس رقماً هيناً علي الإطلاق فنحن بهذا الشكل يمكننا وببساطة تلبية كل احتياجاتنا من الطاقة لو أردنا بالطاقة الشمسية المباشرة.



إذا تحدثنا عن استخدامات الطاقة الشمسية سنجد أن الشمس تمدنا بنوعين من الطاقة لا ثالث لهما وهما الطاقة الضوئية "فوتونات الضوء" والطاقة الحرارية



أما بالحديث عن الطاقة الشمسية الضوئية: فأنها تستخدم حالياً للحصول علي الطاقة الكهربائية بطريقة مباشرة بواسطة استخدام ما يعرف بالألواح الشمسية الفولتوضوئية "Photovoltaic solar panels" وهذا هو أكثر استخدامات الطاقة الشمسية شهرة في السنوات الأخيرة حيث ان العديد من الشركات العالمية استطاعت انتاج ألواح شمسية تعمل بكفاءة عالية مقارنة بما كان في الماضي فأصبح استخدام الطاقة الشمسية في توليد الكهرباء أكثر جدوي والذي ساعد علي هذا الانتشار ايضاً هو التطور الكبير الذي حدث في عالم البطاريات وتخزين الطاقة الكهربائية فأصبح العديد من الدول والمؤسسات والأشخاص يفكرون في الطاقة الشمسية كبديل نظيف وآمن للحصول علي الطاقة الكهربائية

ايجابيات الطاقة الشمسية:

- الطاقة الشمسية بالطبع سترفع من قيمة منزلك او المبنى او المشروع الذي ستقوم بتركيب نظام الطاقة الشمسية عليه.
- بالنسبة للعالم العربي الطاقة الشمسية تعتبر مصدر متوفر جدا وزو جدوي عالية.
- الطاقة الشمسية هي افضل الحلول في المناطق النائية التي لا تصلها خطوط الكهرباء العمومية.
- الطاقة الكهربائية لا تصدر اي تلوث كما انها لا تصدر ضوضاء كما في حالة المولدات.

- لا يستطيع أحد ان يحتكر الشمس لصالحه في يوم من الأيام.
- في تطبيقات الفضاء الطاقة الشمسية هي مصدر الطاقة الكهربائية.
- علي الرغم من ان تكلفة انشاء انظمة الطاقة الشمسية ليست رخيصة الثمن الا انها تجعلك لا تدفع فاتورة كهرباء مقابل استهلاكك.
- يمكن تركيب انظمة الطاقة الشمسية فوق الأسطح او حتي علي ظهر اماكن ركن السيارات كحل لعدم توفر مساحة لتركيبها.
- معظم الألواح الشمسية والسخانات الشمسية تأتي بضمان يصل الي ٢٥ سنة فعمرها الافتراضي كبير.



سلبيات الطاقة الشمسية:

- أحد أكبر عيوب او سلبيات انظمة الطاقة الشمسية هو تكلفتها المبدئية المرتفعة فتكلفة انشائها كبيرة نسبيا.
- الطاقة الشمسية لا يمكن توليدها الي اثناء ساعات سطوع الشمس وبذلك فان نصف اليوم تقريبا لا تقوم بانتاج الطاقة فيه.
- الضباب والسحب يقلل من كفاءة انظمة الطاقة الشمسية.
- الواح الطاقة الشمسية بحاجة الي ان تكون نظيفة باستمرار وخالية من الاتربة والعوالق حتي تستطيع ان تعمل بكفاءة.
- المناطق غزيرة المطر تكون كفاءة انظمة الطاقة الشمسية فيها قليلة جدا.

سخانات الطاقة الشمسية

ما هي سخانات الطاقة الشمسية؟

سخانات الطاقة الشمسية هي أحد أهم تطبيقات استخدام الطاقة الشمسية، والسخان الشمسي يقوم باستغلال الطاقة الشمسية الساقطة عليه لتسخين المياه بشكل مباشر وليس لتوليد الكهرباء كما في حالة [الألواح الشمسية](#).

وهذه المياه الساخنة يمكن استغلالها لأغراض الاستحمام أو لتدفئة حمامات السباحة أو [التدفئة بالطاقة الشمسية](#) أو حتي التبريد بالطاقة الشمسية، كما ان [محطات الطاقة الشمسية الحرارية](#) أيضا تستخدم تسخين المياه لتوليد الكهرباء.

سخانات الطاقة الشمسية موجودة منذ أكثر من مائة عام ولكن في العقدين الأخيرين تطورت تكنولوجيا السخانات الشمسية بشكل كبير وملحوظ ومعظم التطور الحاصل كان في المجمعات الشمسية فالمجمعات الشمسية الآن يمكنها استغلال ما يزيد عن ٥٠% من الطاقة الشمسية الساقطة عليها. ولو قارنتها [بالواح الطاقة الشمسية الفولتوضوئية](#) فهي لا تستطيع تحويل أكثر من ٢١% من الطاقة الشمسية الساقطة عليها الي كهرباء وذلك في أجود انواع الواح الطاقة الشمسية.

مميزات استخدام سخانات الطاقة الشمسية :

- كما ذكرنا فإن مجمعات الطاقة الشمسية الآن تستطيع ان تستغل ما يزيد عن ٥٠% من الطاقة الشمسية الساقطة عليها وهذا رقم ممتاز.
- كلما كان المكان شدة الأشعاع الشمسي والحرارة فيه مرتفعة أكثر نستطيع الحصول علي طاقة أكبر دون قيود كما في حالة الواح الطاقة الشمسية لتوليد الكهرباء التي تقل كفاءتها كلما ارتفعت درجة الحرارة.
- ستلاحظ ان استخدامك سخانات الطاقة الشمسية بدلا من الكهربائية سيوفر ما لا يقل عن ٥٠% من فاتورة الكهرباء الشهرية لديك.
- الأنواع الصغيرة منها علي قدر استهلاك منزلي ليست باهظة الثمن ويمكنك توفير ما انفقته للحصول عليها في حوالي ٥ سنوات.
- عمرها الافتراضي كبير ولكنها تحتاج صيانة تقريبا كل ٣ سنوات.

معلومات أساسية عن سخانات الطاقة الشمسية :

- أنظمة تسخين المياه بالطاقة الشمسية تحتوي علي مجمعات شمسية لتسخين المياه وخزانات لتخزين المياه الساخنة.
- خزانات المياه يجب ان تكون ذات عزل جيد.
- أنظمة التسخين بالطاقة الشمسية لها نوعين رئيسيين :
 - : وهو يحتوي علي مضخة لتدوير المياه. Active
 - : وهو لا يحتوي علي مضخة. Passive
- يمكن أن يعمل السخان الشمسي بالتكامل مع السخان الكهربائي.

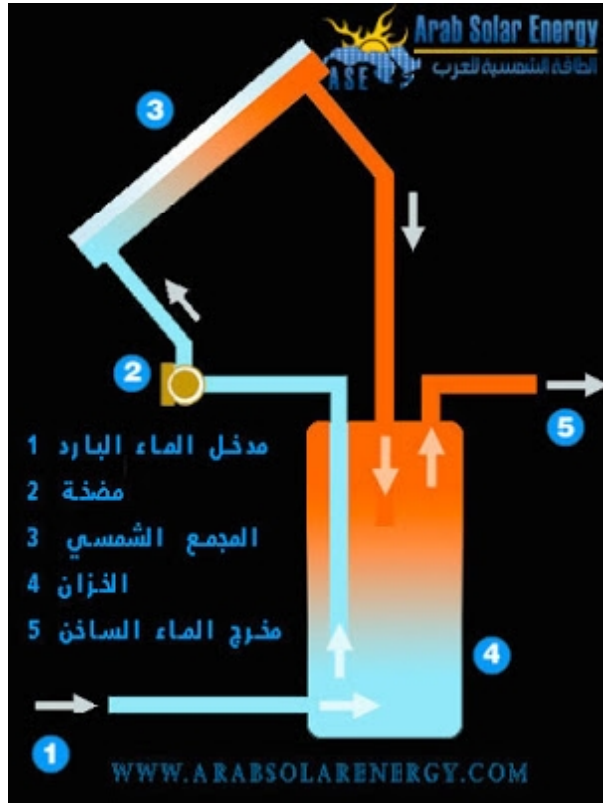
انظمة تسخين المياه بالطاقة الشمسية :
كما ذكرنا هناك نوعين رئيسيين من أنظمة التسخين
بالطاقة الشمسية Active و passive

النوع الأول : Active

وما يميزه هو وجود مضخة من ضمن مكونات النظام
وينقسم الي نوعين رئيسيين :

١ - Direct :

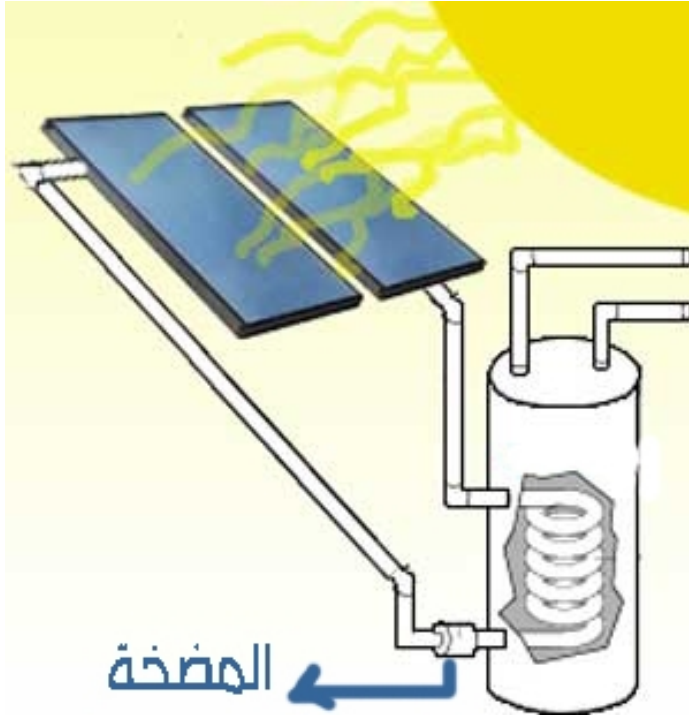
وفي هذا النظام تقوم المضخة بتدوير المياه ذاتها الداخلة
الي النظام أي انه ليس هناك اي مائع وسيط كما سنري
في النوع الآخر.
ويستخدم هذا النظام في حالة ضغط الماء المنخفض
وايضا في الاماكن التي لا يتوقع فيها وصول الماء الي
درجة التجمد.



Indirect -2

في هذه الحالة وكما هو واضح بالصورة تقوم المضخة بتدوير سائل آخر ما بين المجمع الشمسي وملف نحاسي داخل موجود داخل خزان المياه حيث يحدث تبادل حراري بين المائع الموجود داخل الملف النحاسي وبين الماء الموجود داخل التانك.

ويستخدم غالبا هذا النظام في الأماكن التي يتوقع فيها ان تصل درجة حرارة الماء الي درجة التجمد ويكون السائل الوسيط ذو درجة تجمد أقل من درجة تجمد الماء.

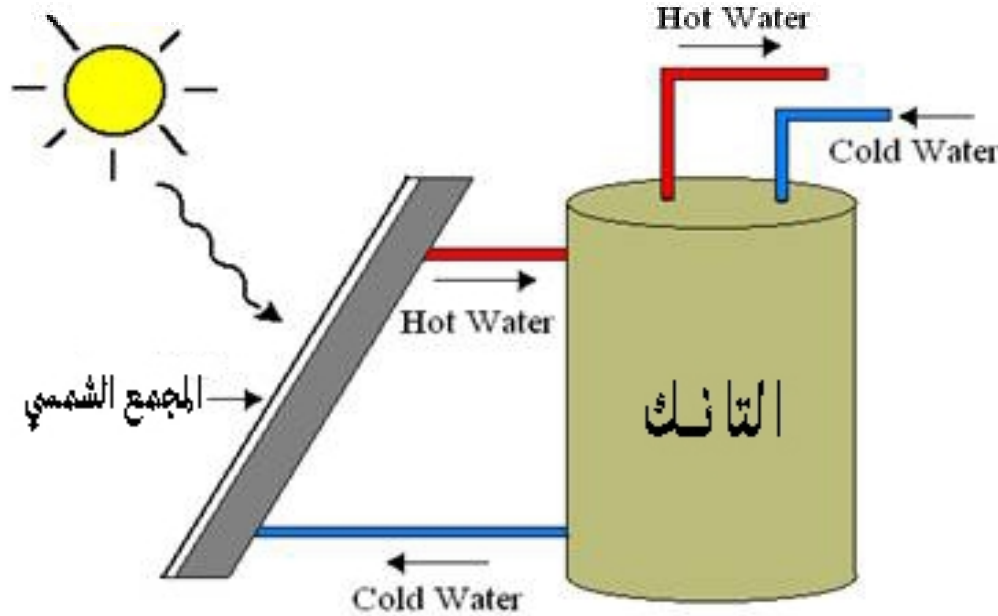


النوع الثاني : Passive

هذا النوع لا يوجد فيه مضخات لتدوير المائع ولذلك يعتبر اقل كفاءة من النوع الأول ولكنه قليل الأعطال ولا يحتاج الي صيانة كثيرا كما ان عمره الافتراضي أطول وسعره أقل بشكل ملحوظ، ويوجد منه نوعين رئيسيين :

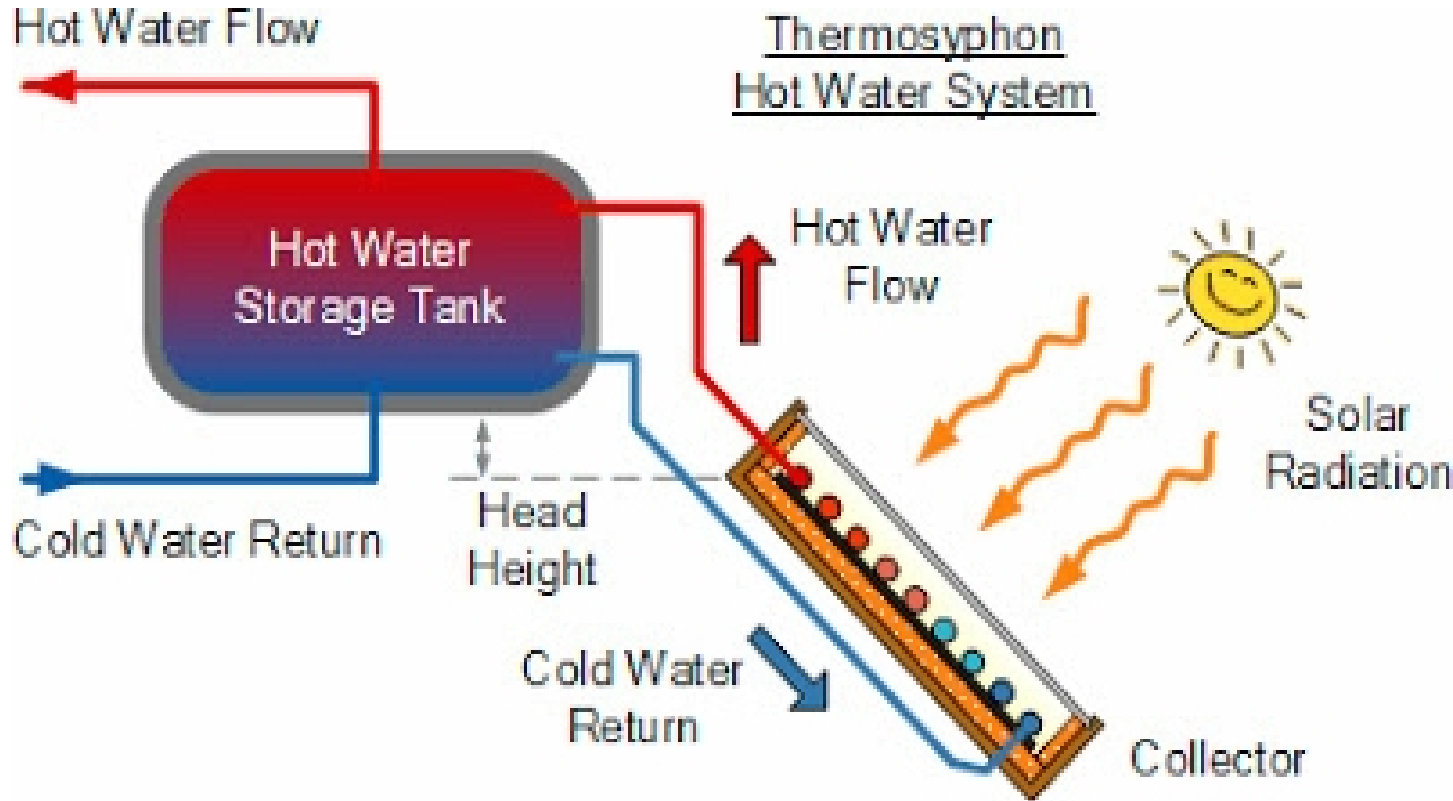
١ - Integral collector-storage passive systems :

كما هو واضح بالصورة يدخل الماء البارد الي التانك ومنه الي المجمع الشمسي ثم يخرج الماء ساخن من المجمع الشمسي الي التانك معتمدا علي التوزيع الطبيعي حيث يصعد الماء الساخن لاعلي ويظل الماء البارد بالأسفل. وهذا النظام ايضا يستخدم في الأماكن التي يتوقع فيها ان تصل درجة حرارة الماء الي درجة التجمد..



Thermosyphon systems 2-

ما هو واضح في هذا النوع يجب ان يكون التانك في مستوي أعلي من مستوي المجمع الشمسي حتي يستطيع الماء الأقل حرارة والموجود في الجزء الأسفل من الخزان بالنزول الي المجمع الشمسي وكلما اكتسب حرارة أرتفع الي أعلي لأن كثافته تصبح أقل ثم يصعد في الجزء الأعلى من الخزان وهكذا تحدث عملية التدوير.

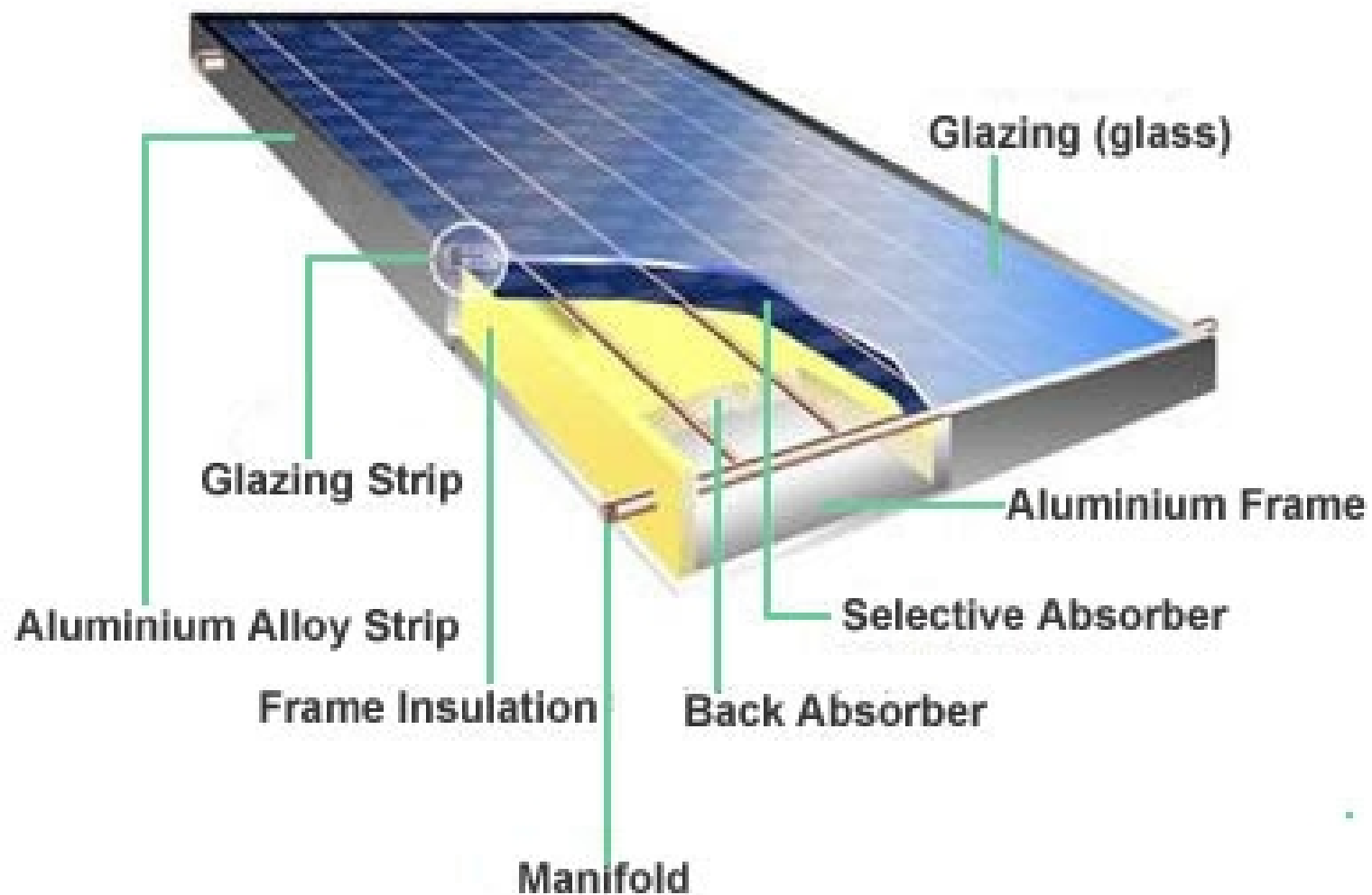


المجمعات الشمسية :

المجمع الشمسي هو الجزء الرئيسي في أنظمة تسخين المياه بالطاقة الشمسية حيث انه هو المسؤول عن نقل حرارة الشمس الي المياه. ويوجد ثلاثة انواع من المجمعات الشمسية المنتشرة والمستخدمه في الانظمة السكنية لتسخين المياه بالطاقة الشمسية وهي :

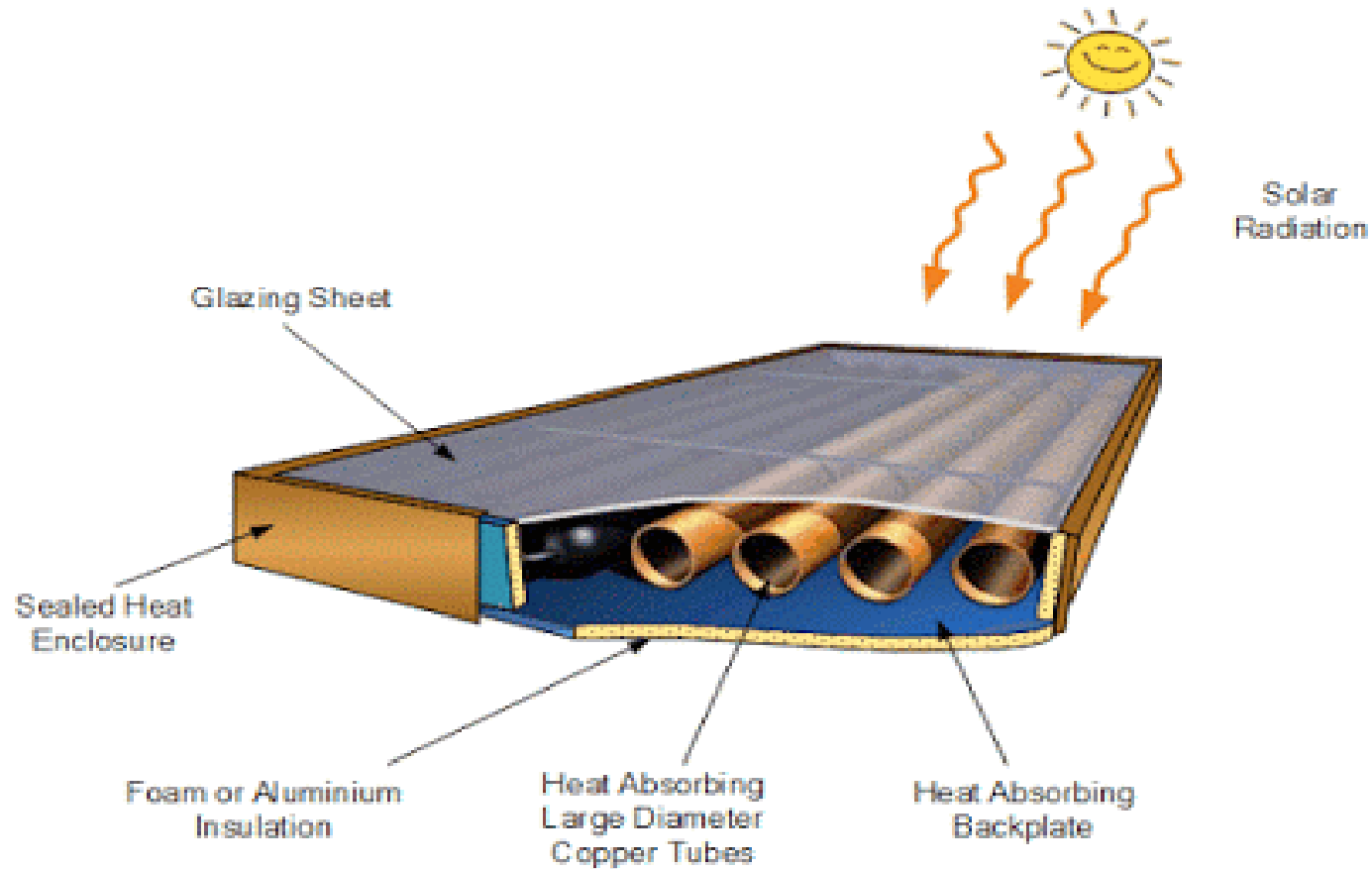
Flat-plate collector -1

يقوم هذا النوع من المجمعات الشمسية بتسخين المياه الي درجات حرارة متوسطة في حدود ٦٠ درجة مئوية، ويتضح من شكلها انها تكون مكونة من مجموعة مواسير متوازية موجودة داخل علبه محكمة الغلق من الألومنيوم ومغطاة بلوح من الزجاج وتكون معزولة جيدا حتي انها مضادة للأمطار ويوجد طبقة داكنة ماصة للحرارة أسفل المواسير كما يوجد طبقة عازلة بالاسفل لمنع تدرب الحرارة.



Integral collector-storage systems - 2

في هذه الحالة يكون قطر الانابيب النحاسية أكبر من الحالة السابقة وتكون متصلة مباشرة بالتاك



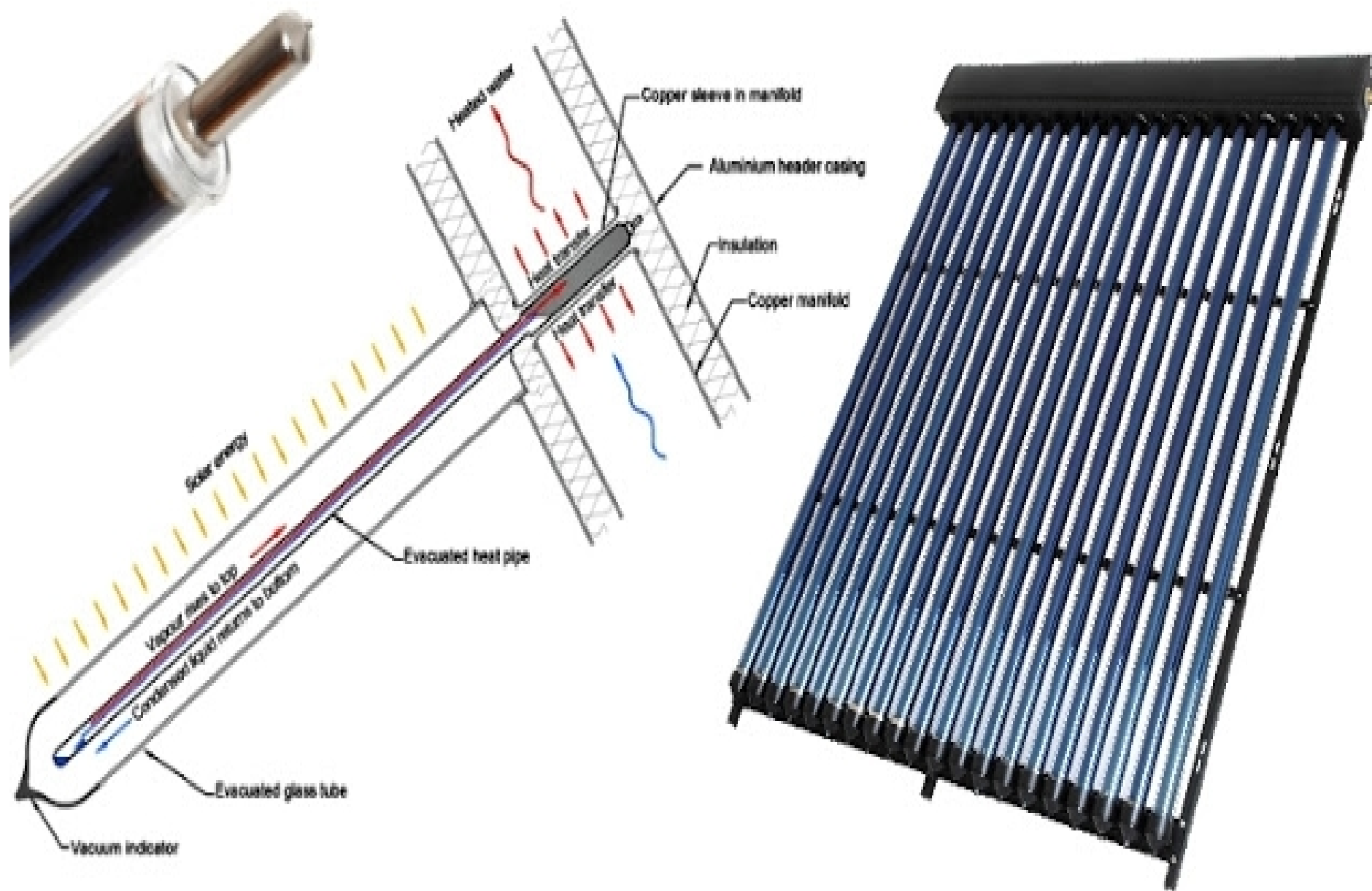
Evacuated-tube solar collectors - 3

او ما يسمى بتكنولوجيا الأنابيب المفرغة وهو ما يعتبر ثورة حقيقية في عالم تسخين المياه بالطاقة الشمسية حيث تتكامل العلوم سويا للوصول الي أعلي كفاءة فهذا المجمع الشمسي من نوع الأنابيب المفرغة يستطيع ان يحول أكثر من ٨٠% من الطاقة الشمسية الساقطة عليه الي طاقة حرارية منقولة الي المياه ليصل بالمياه الي درجات حرارة تزيد عن ١٠٠ درجة مئوية في حالة أحكمنا الضغط داخل الخزان.

ويوجد منه العديد من الانواع والأشكال ولكن الفكرة العامة هي انه يتكون من مجموعة متراسة من الانابيب الزجاجية والمطلية بمواد تساعد علي امتصاص اشعة الشمس الساقطة عليها ولا تعكس الا جزء ضئيل لا يذكر منها، وبداخلها انبوب أصغر من مادة ماصة للحرارة وبينهما خلخلة (أي انه لا يوجد هواء في المنطقة بين انبوب الزجاج الخارجي والانبوب الداخلي والمراد تسخين المائع بداخله) هذا الفراغ يقلل بدرجة كبيرة كمية الحرارة المفقودة.

في الصورة بالأعلي وفي هذا النوع يحدث تبادل حراري بين المائع الموجود داخل الانبوب الداخلي وبين الماء المراد تسخينه عن طريق الانتفاخة النحاسية الموضحة بالشكل.

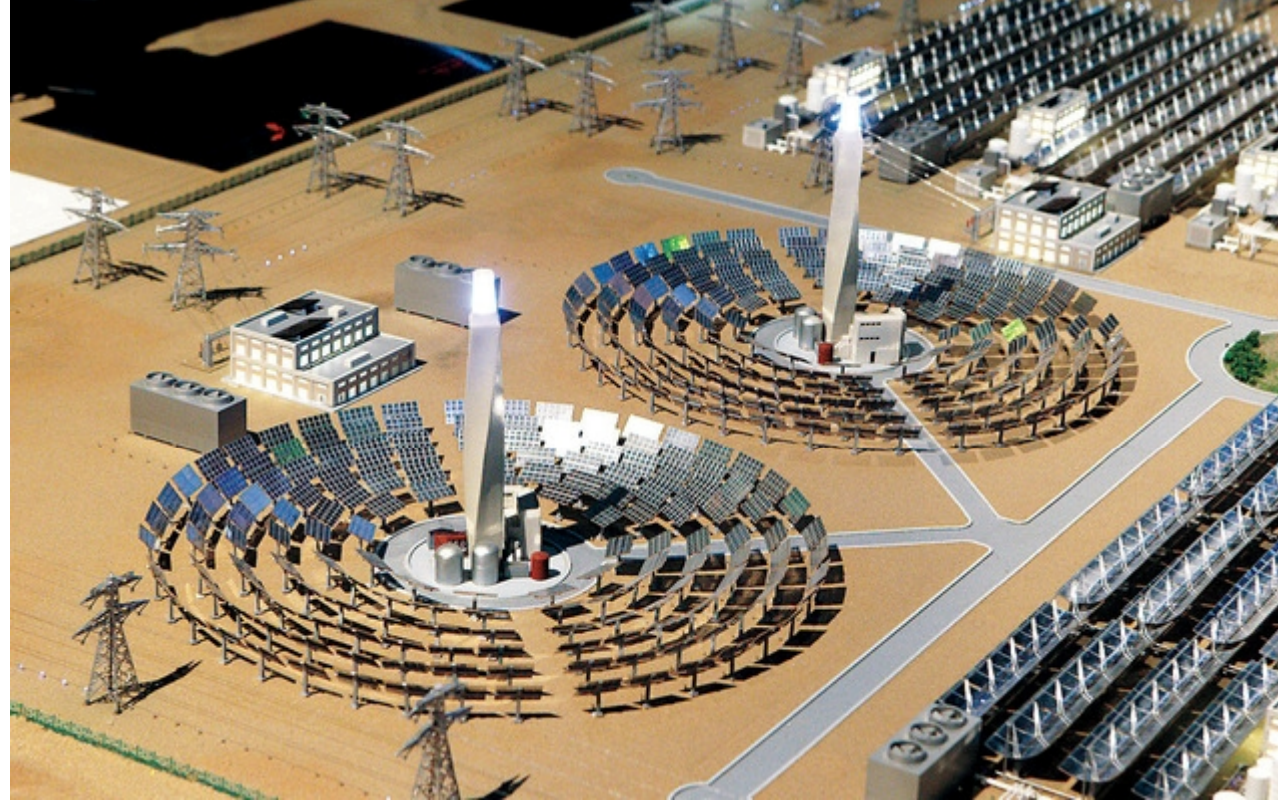
ويوجد انواع أخرى ويتم تسخين فيها الماء بشكل مباشر دون حدوث تبادل حراري وأعتقد اننا بحاجة الي عمل موضوع خاص عن تكنولوجيا الانابيب المفرغة لتسخين المياه بالطاقة الشمسية.







محطات الطاقة الشمسية الحرارية ... أنواعها وكيف تعمل!!



محطات الطاقة الشمسية الحرارية هي محطات تقوم باستغلال الحرارة الناتجة من الاشعاع الشمسي والساقطة علي الأرض في توليد الكهرباء. وفي موضوعنا سنحاول ان نتحدث باختصار عن فكرة عمل هذه المحطات وانواعها ومكوناتها الرئيسية..

محطات الطاقة الشمسية الحرارية تسمى ايضا محطات الطاقة الشمسية المركزة

Concentrated Solar Power "CSP"

محطات الطاقة الشمسية الحرارية تقوم باستغلال الحرارة لتبخير المياه واستغلال طاقة بخار الماء هذا لأدارة توربينات تقوم بدورها بتوليد الكهرباء. عرف الانسان قوة الطاقة البخارية في الثورة الصناعية في اوروبا وعرف قدرة البخار الرهيبة في توليد الكهرباء عن طريق امراره علي توربينات تقوم بتحويل طاقة الحركة الرهيبة الناتجة عنه الي طاقة كهربية. ولكن ظل الانسان يبحث دائما علي طرق افضل تساعد في الحصول علي البخار (أي تحويل الماء الي بخار محمص) والبخار المحمص هو بخار ماء جاف بدرجة حرارة عالية وضغط عالي. فبدأ الانسان في استخدام الوقود الحفري كوسيلة لتسخين الماء والحصول علي البخار، حتي محطات الطاقة النووية والذرية هدفها الرئيسي الحصول علي طاقة حرارية رهيبة نستطيع ان نحول بها الماء الي بخار بسرعة أكبر. وكذلك محطات الطاقة الشمسية الحرارية تعمل ايضا لتبخير المياه والحصول علي بخار محمص يستطيع ادارة توربينات تقوم بدورها بتحويل الطاقة الحركية الي كهرباء

أنواع محطات الطاقة الشمسية الحرارية أو المركزة.

١- محطات تعمل بنظام القطع المكافئ.



تعتمد في آلية تشغيلها على نظم المجمعات الشمسية المكونة من مرايا خاصة على شكل قطع مكافئ تقوم بتجميع وتركيز أشعة الشمس على أنبوب مركزي ينقل الحرارة إلى مواقع تسخين تعمل على توليد البخار الذي يتولى تشغيل التوربينات التقليدية لتوليد الكهرباء في نهاية المطاف. وأكبر محطات الطاقة الشمسية الحرارية من هذا النوع هي محطة شمس ١ في ابوظبي

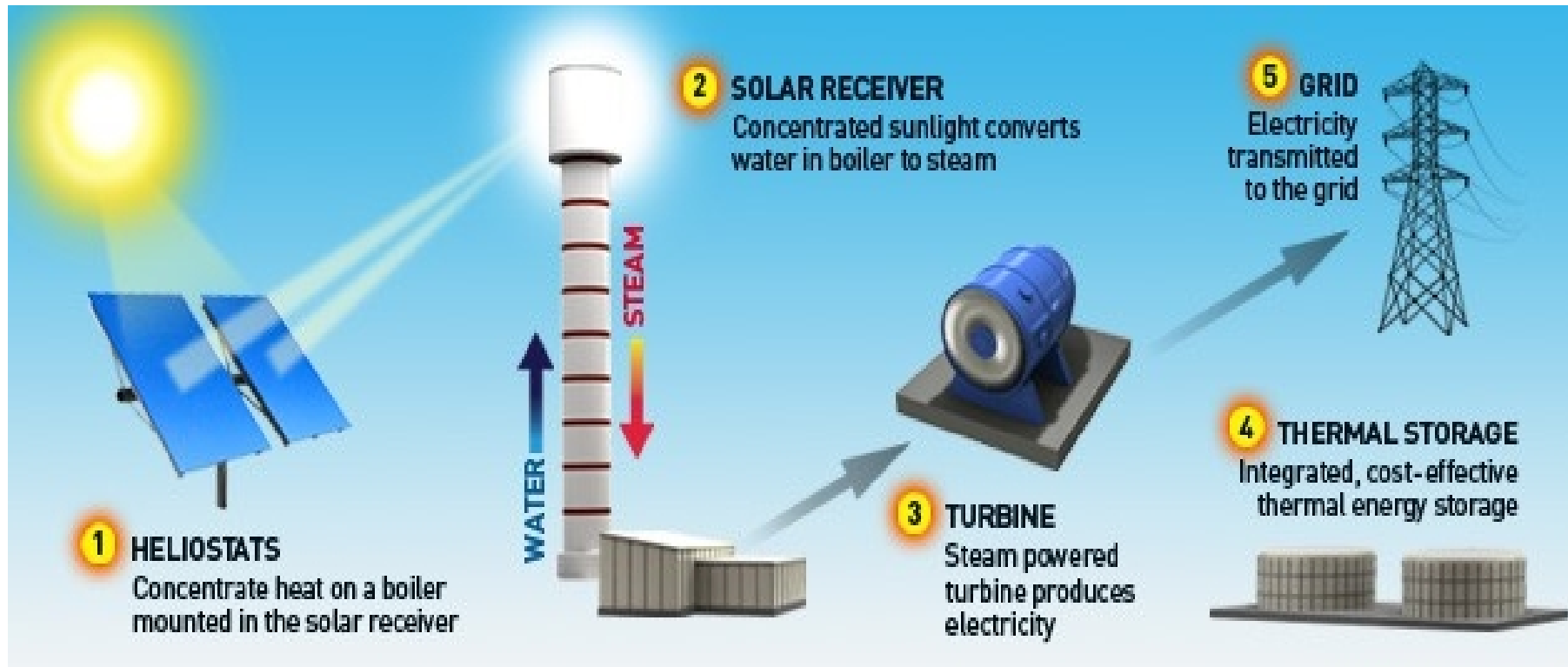
محطة شمس ١ هي أضخم مشاريع الطاقة الشمسية المركزة في الامارات والعالم.
قال سلطان الجابر رئيس شركة "مصدر" التي تشرف على مشاريع إمارة أبوظبي للطاقة المتجددة
إن القدرة الإنتاجية لمحطة "شمس ١" تبلغ ١٠٠ ميغاوات وهي بالتالي "أكبر محطة للطاقة الشمسية
المركزة قيد الخدمة في العالم".



٢- محطات الطاقة الشمسية الحرارية ذات الأبراج المجمع.

هذا النوع من محطات الطاقة الشمسية الحرارية يتميز من ناحية التصميم بالبرج المرتفع الذي يكون محاط من جميع الاتجاهات بمرايا عاكسة للضوء. كما انه يتميز من ناحية التشغيل ان التحكم به يكون عن طريق برنامج حاسوبي يجعل كل من هذه المرايا يتتبع الشمس ويعكسها علي قمة هذا البرج وعمل المرايا تكون كل منها منفصل في حركته عن الأخرى اعتمادا علي زاوية سقوط اشعة الشمس عليها وكذلك بعدها عن البرج.



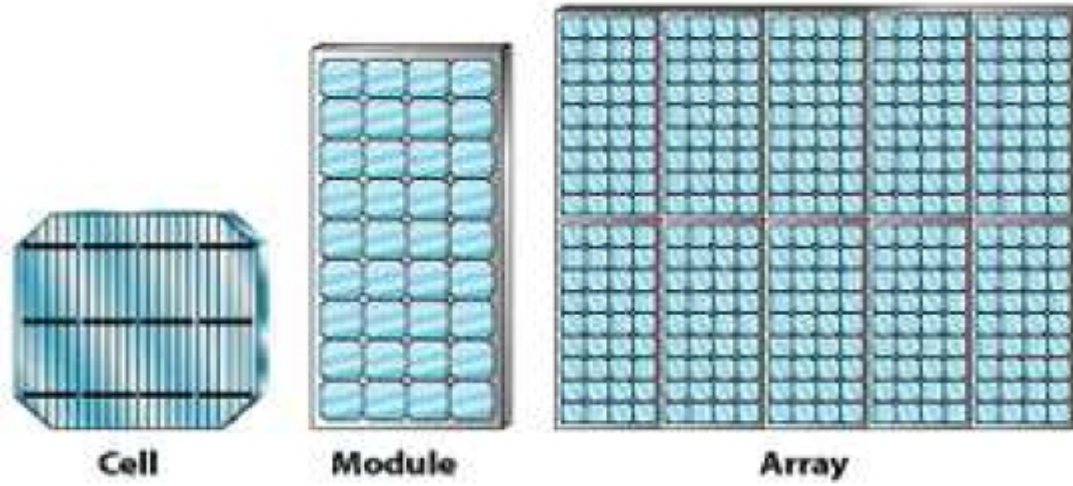


تخزين الطاقة الحرارية موجود في معظم محطات الطاقة الشمسية الحرارية الآن تهتم بان تقوم بتخزين الطاقة الحرارية Thermal Storage Tanks. وذلك لأستغلال الطاقة الحرارية أثناء فترات غياب الشمس وحتى تجعل المحطة جاهزة للبدأ في العمل في نهار اليوم الثاني دون الحاجة للبدأ من الصفر.

تبدأ العملية حينما تصطدم أشعة الشمس بآلاف المرايا والتي تسمى heliostats وهذه المرايا قابلة للحركة بشكل اتوماتيكي لتتبع اشعة الشمس وتقوم بتسليطها علي خزان مياه والموضح في الصورة بأسم Solar Receiver ويمكن ايضا ان نسميه . Boiler هذا الخزان يكون مثبت علي قمة برج يمكن ان يصل ارتفاعه الي ١٥٠ متر، فيتحول الماء الي بخار محمص بضغط مرتفع وحرارة عالية. ويقوم البخار الناتج بإدارة توربينات تقوم بدورها بتحويل طاقة البخار الي كهرباء أو حتي استغلال البخار الناتج بشكل مبلشر في أغراض صناعية. وأكبر هذه المحطات في العالم محطة Ivanpah بصحراء Mojave بكاليفورنيا. في هذه المحطة يوجد أكثر من ٣٠٠,٠٠٠ مراية آلية التحكم لتتبع اشعة الشمس وعكسها علي خزانت مثبتة علي قمة ثلاثة أبراج بارتفاع ٤٥٧ قدم أي ما يقرب من ١٤٠ متر. وقوم هذه المحطة بتوليد ٣٩٢ ميجا وات من القدرة الكهربائية،



الالواح



الشمسية لتوليد الكهرباء او ما يسمى ب PV solar panels او Module هي عبارة عن مجموعة من الخلايا الشمسية PV cells المتصلة مع بعضها في اطار واحد وموصلة بينها وبين بعضها توصيل متوالي او متوازي. أما اذا تم تجميع مجموعة من الالواح الشمسية في اطار اكبر ففي هذه الحالة نسميها مصفوفة الواح شمسية او Solar Array كما هو موضح بالصورة.

وأختصار PV هو اختصار كلمة PhotoVoltaic اي الكهروضوئية. وهذا المصطلح يعبر عن طريقة عمل الخلايا الموجودة داخل الالواح الشمسية حيث انها تقوم بتحويل الضوء الساقط عليها الي فرق جهد يؤدي لمرور تيار كهربى في الاسلاك.

أنواع الألواح الشمسية الكهروضوئية :

بالطبع وكما قلنا مسبقا فان الألواح الشمسية الكهروضوئية PV solar panels هي تعتبر أهم مكون من مكونات أنظمة الطاقة الشمسية لتوليد الكهرباء. لذلك فان العميل الذي يبحث عن تركيب نظام الألواح الشمسية لتوليد الكهرباء يجب ان يعلم جيدا ان معرفة كيفية اختيار نوع الألواح الشمسية المناسب له هو أول ما يجب عليه معرفته وهو اكثر امر يجب ان يتأني فيه جيدا.

فان اختيار الألواح الشمسية الاكثر كفاءة او الاغلي ثمنا ليس دائما هو الحل الأمثل فهناك عدة معايير يجب ان تضعها في حساباتك وهي التكلفة و كمية الطاقة الكهربائية التي تحتاجها و المساحة المتوفرة لديك وكذلك الموقع الجغرافي ثم تبدأ في اختيار افضل الألواح الشمسية التي توفر لظروفك الكفاءة المطلوبة بأقل تكلفة.

تكنولوجيا الألواح الشمسية المنتشرة الآن تعتمد غالبا علي كريستالات السيليكون وهذه التقنية بدأت منذ ما يقرب من 50 عام وأول استخدام لها كان في الأقمار الصناعية والآن أعلي كفاءة يمكن الحصول عليها في افضل انواع الألواح الشمسية هي 21% .

وفي الحديث عن انواع الواح الطاقة الشمسية لتوليد الكهرباء فهناك متوفر في الاسواق ثلاثة انواع رئيسية وهي monocrystalline silicon solar panels و polycrystalline silicon solar panels و thin film solar panels سنتحدث عن مميزات وعيوب كلا منها باختصار :

monocrystalline silicon solar panels -1



أو ما يعرف بالالواح الأحادية وتستطيع ان تميزها بمظهرها المتناسق الذي يدل علي نقاء كريسيتالات السليكون المصنوعة منها الخلايا الشمسية المكونة لها. والخلايا المكونة للالواح الشمسية الاحادية عبارة عن سبائك سليكون تم تقطيعها الي شرائح. وتستطيع ان تري ان أحرف الخلايا ليست متلاصقة وهذا ما يعطي الالواح الشمسية الاحادية مظهرها المميز كما هو واضح بالصورة.

الالواح الشمسية لتوليد الكهرباء من هذا النوع هي اغلي الانواع في ثمنها حيث انها مصنوعة من كريسيتالات السليكون النقية كما انها تعطي اعلي كفاءة والتي تتراوح ما بين 15 - 21 %
طبعا هذه الكفاءة العالية تجعلك تحتاج الي كمية اقل من الألواح كما انها تعمل بكفاءة اكبر من غيرها في حالة الضوء الخافت.
تاتي بضمان 20 سنة او أكثر وهذا يعني ارتفاع عمرها الافتراضي ومن عيوبها ارتفاع ثمنها .

polycrystalline silicon solar panels -2



او ما يعرف بالالواح الشمسية متعددة الكريستالات وبالطبع الفرق بينها وبين الأحادية واضح جدا من حيث الشكل لو قمت بمقارنة الصورتين. تكون فيها الخلايا الشمسية عبارة عن مربعات متراصة كما هو واضح. تتميز بانخفاض ثمنها مقارنة بالالواح الشمسية الأحادية.

كفائتها تتراوح ما بين 13-17%

عمرها الافتراضي كبير ايضا وتأتي بضمان 20 سنة او اكثر

وطبعا من الواضح ان انخفاض الكفاءة عن نظيرتها الاحادية يجعلك

تحتاج الي مساحة اكبر للحصول علي نفس كمية الكهرباء.

كما ان لها عيب لا يهم الكثيرين ولكنه احيانا ما يأخذ في الاعتبار وهو ان

مظهرها ليس جماليا كما في حالة المظهر الازرق الانسيابي الجميل

للألواح الشمسية الاحادية.

thin film solar panels -3



هذا النوع من الألواح الشمسية رقيق وانسيابي كما هو واضح بالصورة
ويأخذ شكل السطح الذي يتم تثبيته عليه وله عدة أنواع اعتمادا علي
نوع السبيكة المصنوع منها ولسنا بصدد ذكر هذه الانواع. ولكن معظم
التطويرات والأبحاث التي تجري حاليا تقوم علي التطوير في هذه النوع
بالتحديد نظرا لأنه اسهل في التصنيع وكذلك له انسيابية ووزنه وسمكه
قليل.

تتميز بانسيابيتها الذي يجعلها صالحة للعديد من التطبيقات.
مظهرها متناسق ويعطي مظهر جميل
أرخص الانواع ثمنا وفي حالة الكميات الكبيرة تقل التكلفة جدا
لا تتأثر كثيرا بالتغيرات المناخية والغيوم.

ولكن من عيوبها انها اقل الانواع كفاءة فكفائتها قد لا تزيد عن 10%
وذلك بالطبع سيجعلك تحتاج لتغطية مساحة اكبر لتلبية احتياجك
للكهرباء وهذا يجعلها غير ذات فاعلية في حالة المساحات المحدودة

وخاصة للاستخدامات السكنية.
وعمرها الافتراضي اقل من نظيرتها الاحادية والمتعددة.

بالطبع ليست هذه كل الأنواع فهناك انواع تتفرع من هذه الأنواع قيد التطوير قد تقرأ عنها كثيرا ولكننا نتحدث الآن عما هو موجود ومتاح بالفعل للمستهلك الآن.

معايير اختيار ألواح الطاقة الشمسية الجيدة

الصين هي أكبر الدول المبتكرة لهذا المجال علي مستوى العالم. وفي الحقيقة لا توجد شركة مصنعة لألواح الطاقة الشمسية عمرها يزيد عن 10 سنوات لذلك فإن خبرة الشركة ليس معيار ذو أهمية كبيرة وأنت تختار ألواح الطاقة الشمسية كما أن معظم الشركات لا تنتج كل الأجزاء بمفردها ولكن تشتري أجزاء من شركات أخرى وتقوم بتجميعها. يمكنك ان تقرأ في " أفضل الشركات المنتجة لألواح الطاقة الشمسية " لذلك فإن الكتالوج الخاص بالألواح الشمسية وورقة البيانات والضمان يعتبروا هم المعايير الرئيسية التي تستطيع من خلالها تقييم جودة المنتج الذي انت بصدد شراؤه. بالطبع بعد ان تحدد نوع ألواح الطاقة الشمسية التي ستحتاجها سواء كان متعدد الكريستالات او أحادي

ولكن السؤال هنا كيف تستطيع التقييم بناءا علي
البيانات المتوفرة مع المنتج؟

أولا: سماحة القدرة المنتجة من الألواح
الشمسية : **production power tolerance**



ND-R245A5

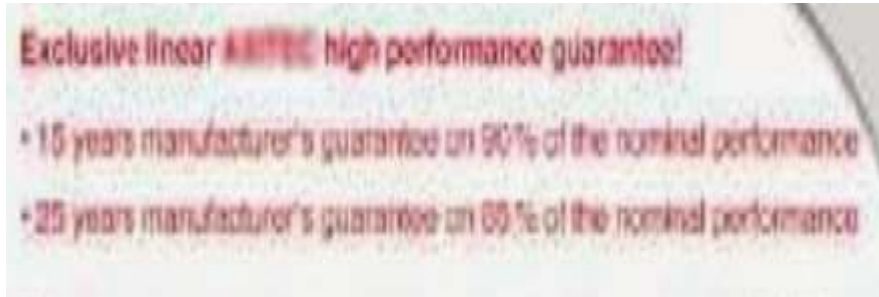
- High-performance photovoltaic modules made of polycrystalline (156.5 mm)² silicon solar cells with module efficiencies of 14.9%.
- 3 busbar technology for enhancing the power output.
- Anti-reflex coating to increase light absorption.
- Production controlled positive power tolerance from 0 to +5 %. Only modules will be delivered that have the specified power or more for high energy yield.
- Delivery of modules in 5-watt intervals.
- Improved temperature coefficient to reduce power losses at higher temperatures.
- High power performance even at lower irradiances.

ببساطة فمثلا لو قلت لك أن لدينا لوح شمسي من شركة sharp "وهذه الشركة من أفضل الشركات في المجال" قدرة هذا اللوح الانتاجية هي 245 واط, فهل هذا يعني أن كل الألواح الشمسية الذي أخرجها خط الانتاج الموجود بالشركة بهذه القدرة الكهربائية متطابقة تماما؟ بالطبع لا فقد تكون طاقتها الانتاجية أكبر من القيمة المكتوبة قليلا أو أقل قليلا وهنا يأتي دور السماحية.

فمثلا لو ان اللوح الشمسي قدرته 245 واط والسماحية له ± 5 فهذا يعني ان قيمته الانتاجية تتراوح بين 240 الي 250 وهناك شركات لا تعطي سماحية بالقيمة السالبة مما يعني انها تضمن ان قيمة القدرة لا تقل عن القدرة الاسمية بل انها قد تزيد. وبالتأكيد ستجد هذه المعلومة في ورقة بيانات لوح الطاقة الشمسية (solar panel datasheet)

ثانيا: ضمان الألواح الشمسية: Warranty

ياتي في الصفحة الأولى ما يوصف لنا جودة الألواح الشمسية وهو كم سنوات الضمان التي سوف يتم تغطيتها للصناعة والأداء.
معظم الشركات المصنعة تقدم ضمان 10 سنوات علي عيوب الصناعة
وضمان 25 سنة للأداء.



ومهم جدا ايضا ان تجد كلمة "linear" كما هو موجود في الصورة
بالأعلي. ولكن ما اهمية هذه الكلمة؟
سنشرحها بمثال:

لو ان لدينا لوحين شمسيين

اللوح الأول للطاقة الشمسية صيغة الضمان الخاصة به تقول : نحن
نقدم ضمان 10 سنوات ضد عيوب الصناعة و ضمان انتاج طاقة بنسبة
90% للسنوات العشر الاولى و ضمان انتاج الطاقة بنسبة 80% لمدة 25
سنة من العمر الافتراضي للوح الشمسي.

اللوح الثاني للطاقة الشمسية صيغة الضمان الخاصة به تقول : نحن
نقدم ضمان منتج لمدة 10 سنوات ونقدم ايضا ضمان أداء خطي 90%
للسنوات العشر الأولى ونسبة 80% لمدة 25 عاما.

فما هو الاختلاف بين المثالين؟

الشركة المصنعة للوح الشمسي الاول تضمن انه سيقوم بتغيير اللوح في حالة عيب الصناعة (نفس ضمان أي منتج) كما انه يضمن اذا قمت باختبار اللوح الشمسي الخاص بك بعد 10 سنوات من التشغيل (او التسليم) سوف تجد ان الأداء لم ينخفض أكثر من 10% واذا قمت بقياسه بعد 25 سنة فسوف تجد أن الأداء لم ينخفض أكثر من 20%. وهذا الضمان يعني أنه من الممكن أن تقل كفاءة خرج اللوح الشمسي الي 90% في السنة الأولى وتظل تعمل لمدة 9 سنوات ب 90% من طاقتها الاسمية التي تعاقدت عليها. وهذا التدهور المبكر شائع جدا. ثم في السنة العاشرة يمكن ان تقل كفاءة خرج اللوح الشمسي الي 80%. أما الشركة المصنعة للألواح الشمسية الثانية فأنها تقدم ضمان أداء خطي

"Linear" وهذا يعني أن إنتاج الطاقة الشمسية من اللوح الشمسي سوف تقل بنسبة لا تتعدى 1% سنويا ومن ثم سوف تزداد الاستفادة وسوف تعمل بصورة أكثر كفاءة وتنتج المزيد من الطاقة لمدة 25 عاما. ونظرا لظاهرة التدهور المبكر الشائعة فأن بعض الشركات المصنعة تضمن الأداء للسنة الأولى فيقول مثلا: أن إنتاج الطاقة سوف لا تقل أكثر من 3-5% لمدة سنة واحدة من تاريخ التسليم.

ثالثا : شهادات تصديق الواح الطاقة الشمسية Certifications :

يجب ان تبحث عن شهادات تصديق IEC 61215 و IEC 61730 فستشير اليهم ورقة بيانات اللوح والشركات المصنعة وايضا اذا طلبت شهادات التصديق من المورد فسيقوم بتقديمها اليك. فيجب أن تنظر الي ان الوحدة المعتمدة لأحدث إصدارات مقبولة لهذه المعايير.



Management system TÜV-certified
DIN ISO 9001:2008, Reg.-No. 12 100 34403



Qualified IEC 61215
Safety tested IEC 61730
Periodic inspection

وشهادة IEC 61215 تصف متطلبات الجودة لالواح الطاقة الشمسية والاختبارات التي ينبغي تنفيذها من أجل تحديد الخصائص الميكانيكية والكهربية التي ترد في كتالوج اللوح الشمسي وهي ضرورية لظروف تشغيل المنتج.

أما شهادة IEC 61730 فهي تعرف متطلبات السلامة وتتكون من جزأين. ويحدد الجزء الأول مدي موافقة الواح الطاقة الشمسية لجوانب السلامة العامة مثل المسافة بين الأجزاء الموصلة الي الاطار وغيرها والجزء الثاني يصف الاختبارات الخاصة بالالواح الشمسية.

فيجب ان يكون للوح الشمسي موافقة من الدرجة الأولى Class A للمواصفات القياسية IEC 61730 لتطبيق معيار الوصول غير المحدود unlimited access والجهد الخطر hazardous Voltage والنظم ذات الأخرجات الخطرة hazardous output والجهد الأعلى من 120 فولت تيار مستمر.

رابعاً: درجة الحرارة المتوسطة للتشغيل NOCT (Nominal Operating Cell Temperature

يتم قياس القيم الكهربائية الاسمية المعروضة في ورقة بيانات اللوح الشمسي عند 25 درجة مئوية. ولكن عندما تكون في الموقع فان الواح الطاقة الشمسية سوف تعمل عند درجات حرارة أعلى كثيراً حيث سينبغي قياس الأداء في ظروف مختلفة عن ظروف الاختبار القياسية وقياس درجة الحرارة التي سيصل اليها اللوح الشمسي في وضع الدائرة المفتوحة.

فإذا كانت NOCT في حدود (30 - 40 درجة مئوية) فان لوح الطاقة الشمسية هو أكثر استقراراً وأكثر كفاءة في المناطق ذات الحرارة المعتدلة أغلب الوقت والألواح الشمسية الدارجة تحت قيم 47 - 48 NOCT هي أكثر كفاءة من الألواح ذات قيم أعلى من 55 والتي قد تكون الأسوأ الا اذا كانت مثبتة في صحراء حارة مثلاً.

خامسا : المعاملا , الحرارة , لالواح الطاقة الشمسية (solar panel temperature coefficients)

في ورقة بيانات الواح الطاقة الشمسية سوف تجد الخصائص الحرارية ستجد فيها معاملات درجة الحرارة. أي الانحراف في خصائص لوح الطاقة الشمسية الكهروضوئية من الجهد والتيار والقدرة الكهربائية مع زيادة درجة الحرارة.

وكما تري فالمعاملات الخاصة بالجهد والطاقة ذات قيم سلبية مما يعني ان الجهد في الواح الطاقة الشمسية والطاقة المنتجة تقل بارتفاع درجة حرارة الالواح الشمسية وستلاحظ ان معامل التيار ايجابي اي ان التيار الناتج يزداد مع الارتفاع في درجة الحرارة.

وما يهمك هنا هو أنخفاض الطاقة بزيادة درجة الحرارة فأنت تريد ان تعرف كم ستفقد من الطاقة عندما ترتفع درجة حرارة الخلية الشمسية فوق 25 درجة مئوية.

فمثلا :

لو كان معامل درجة الحرارة في الألواح الشمسية 0.48% فهذا يعني ان الطاقة القصوي تنخفض بنسبة 0.48 في المائة لكل درجة تزيد عن 25 درجة مئوية. ففي الصيف مثلا قد تكون درجة حرارة الواح الطاقة الشمسية في فترات الظهيرة 45 درجة مئوية وفي هذه الحالة فأن كمية الطاقة الكهربائية المنتجة ستقل بنسبة يمكن حسابها كالاتي:

45 (درجة الحرارة الفعلية الآن مثلا) - 25 (درجة الحرارة القياسية) = 20

درجة مئوية زيادة عن درجة الحرارة القياسية

ثم تقوم بضرب هذه الدرجات الزيادة في معامل درجة الحرارة $0.48 * 20$

= 9.6 (تقريبا 10)

أي ان الطاقة المنتجة في هذه الحالة ستقل بنسبة 10%
وعلي العكس فمثلا لو كنا في فصل الخريف او الربيع او حتي الشتاء
وكانت درجة حرارة اللوح الشمسي أقل من 25 درجة مئوية فان كمية
الكهرباء التي تنتجها سوف تزيد في الواقع أعلي من الحد الأقصى
لمستوي تصنيفها.

لذلك يجب ان تبحث عن الواح الطاقة الشمسية التي يكون معامل درجة
الحرارة فيها منخفض قدر الامكان.
والواح الطاقة الشمسية الشائعة تكون بمعامل حرارة يتراوح من 0.45 و
0.5 % . وسوف يكون من الأفضل لك لو وجدت لوح شمسي معامل
الحرارة فيه 0.4% أو أقل خاصة وأننا في بلادنا العربية درجات الحرارة
لدينا مرتفعة ومعامل الحرارة هذا هو احد أهم العوامل التي يجب ان
نضعها في الاعتبار اثناء شرائنا لألواح الطاقة الشمسية.

المواد الأولية و بنية الألواح:

الآن كيف يستغل هذا الإشعاع الشمسي؟

ذكرنا أن الطاقة الكهربائية والحرارية هي أهم تطبيقات هذه الأنظمة... ندخل الآن في بعض المفاهيم التي تقرب للأذهان كيفية العمل ... لذلك نعيد شرح الخلية الشمسية والتي هي الركيزة الأساسية للعمل.

إن الخلية الشمسية هي وصلة ثنائية (دايود... diode) من أشباه الموصلات بحيث إن الضوء الساقط على سطحها يستطيع أن ينفذ إلى منطقة الاتصال (P-n junction) حيث تتجول الأشعة الساقطة على الخلية الشمسية إلى طاقة كهربائية خلية شمسية مصنوعة من مادة شبه موصلة اسمها السليكون ورمزها الكيميائي (Si)

وتعرف المادة شبه الموصلة كالآتي:

المادة شبه الموصلة هي عناصر رباعية التكافؤ (يحتوي غلاف الذرة الخارجي على أربعة إلكترونات) ترتبط ذراتها ببعضها البعض بروابط تساهمية وتكون عازلة تماما في درجة الصفر المطلق وتزداد درجة توصيلها بارتفاع درجة حرارتها أو عند تسليط فرق جهد كهربائي عليها أو عند تعرضه لإشعاع بطاقة كافية (وفي كل درس سيتم توسع أكثر في شرح خصائصها)
وهي نوعين :

أ- مواد شبه موصلة نقية :

إن لهذه المواد ترتيبا بلوريا إذ تترتب ذراتها وفق نظام هندسي جميل ومن أمثلتها (السليكون) الذي يحتوي 14 إلكترونات ... عشرة من هذه الإلكترونات مرتبطة بالنواة.. و4 منها تكون في الغلاف الخارجي لنواة الذرة والجرمانيوم الذي يحتوي على 32 إلكترونات منها 28 إلكترون مرتبط بالنواة و4 منها في الغلاف الخارجي.

ب - مواد شبه موصلة مشوبة (غير نقية):

هي نفس المواد السابقة (السليكون والجرمانيوم) لكن تمت إضافة نسبة من الشوائب إليها (مثل الزرنيخ ، الانتيمون ، الفسفور ، الغاليوم ، الانديوم والبورون) وذلك للسيطرة على عملية التوصيل الكهربائي .. وكي يكون مقدار هذا التوصيل ملائما للأغراض العملية.

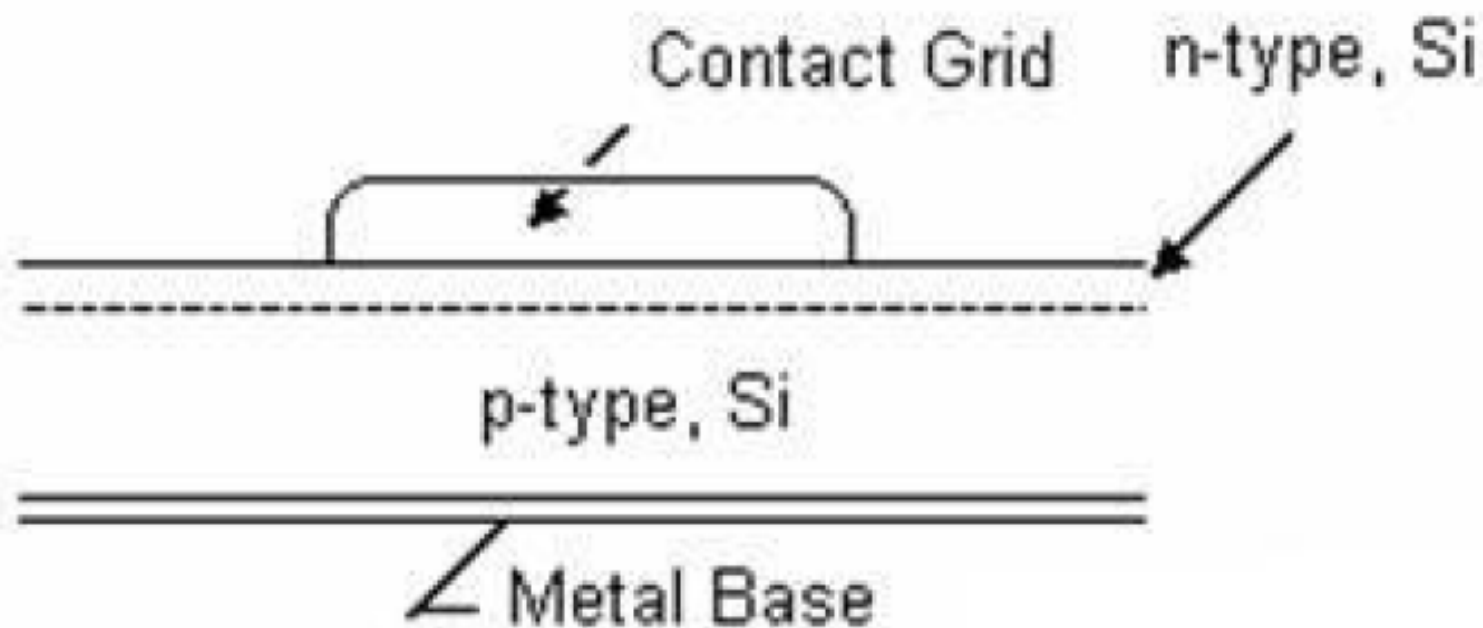
وهذه المواد شبه الموصلة الغير نقية تقسم بدورها إلى قسمين :
قسم نوع N بلورات لمواد شبه موصلة مشوبة بذرات عناصر خماسية التكافؤ (زرنيخ

أو الانتيمون أو الفسفور) .. وناقلات الشحنة الكهربائية فيها هي الإلكترونات الحرة ..
قسم نوع: P بلورات لمواد شبه موصلة مشوبة بذرات عناصر ثلاثية التكافؤ
(الجاليوم، والاندسيوم والباريوم) ناقلات الشحنة فيها هي الفجوات (هي الفراغ الذي يخلفه
الإلكترون المتحرر من الرابطة التساهمية بسبب ارتفاع درجة حرارة بلورة شبه
الموصل).

الآن عندما نشوب بلورة شبه موصل نقي في احد جانبيها شوائب خماسية التكافؤ وفي
الجانب الآخر شوائب ثلاثية التكافؤ.

مكونات الخلية الكهروضوئية:

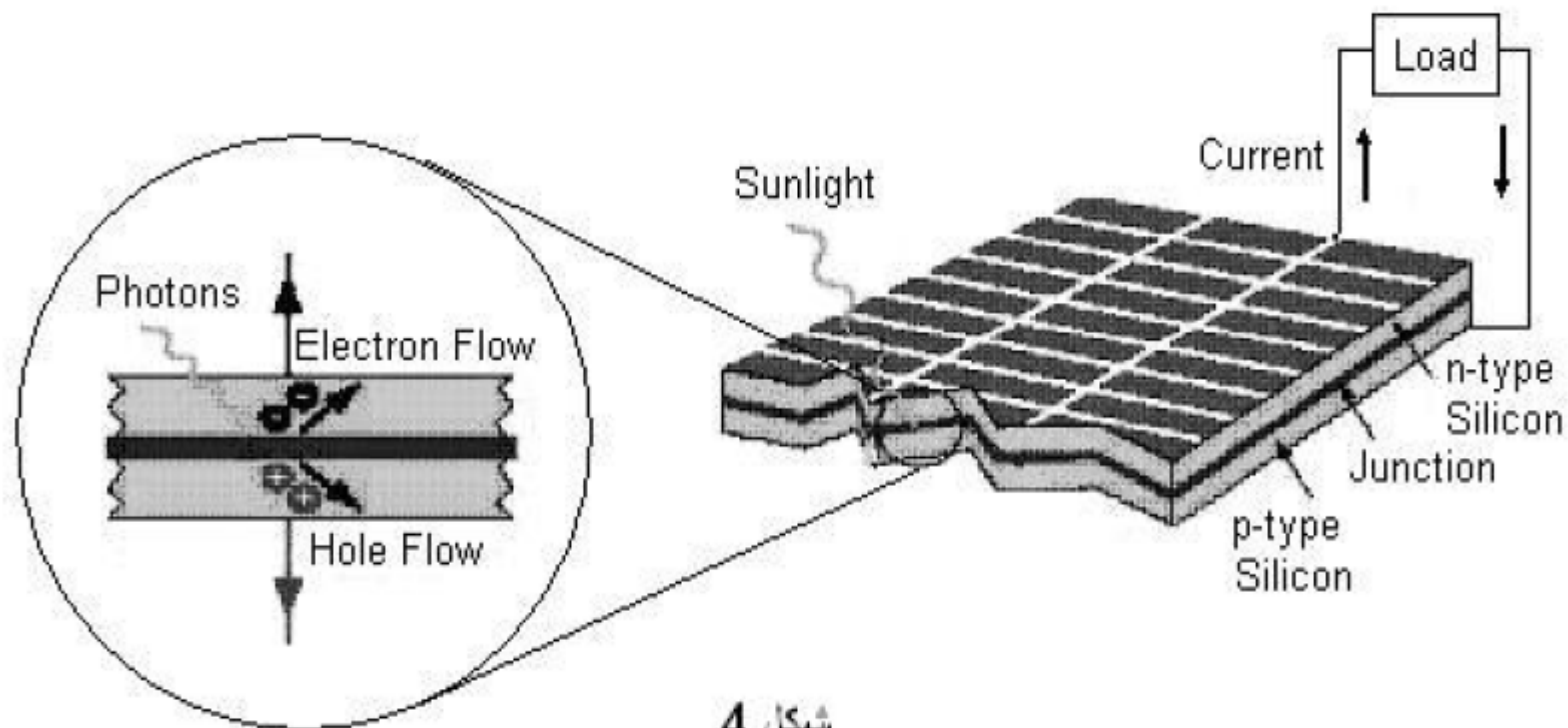
اليوم اغلب الخلايا الكهروضوئية المستخدمة تكون مصنعة من مادة بلورية تدعى سيليكون، وهي إحدى مواد الأرض شيوخا . تتكون الخلية الضوئية من طبقة رقيقة من مادة السيلكون هذه المادة هي احد مواد أشباه الموصلات (أنصاف النواقل) المعروفة التي تتدرج خواصها الفيزيائية بين الموصلات و العوازل . يتم تصنيعها من خلال خلط كمية صغيرة جدا من والبورون مع مادة السيلكون الصافي ثم تسخن إلى درجة حرارة 850 درجة مئوية أثناء التسخين يرش سطح الخلية بطبقة الفسفور وذلك لخلق طبقتين مختلفتين من نوع n-type ومن نوع p-type بمعنى آخر تتكون وصلة الـ pn junctions قرب السطح بين غلاف الفسفور وخليط البورون. عموما يستعمل الفسفور لخلق الطبقة n-type وخليط السيليكون بالبورون لخلق طبقة من نوع-p type بهذا نكون قد حصلنا على المأخذ الموجب و المأخذ السالب للخلية. الشكل التالي يوضح التركيب الأساسي للخلية.



شكل 3

طريقة عمل الخلية الكهروضوئية:

من الشكل التالي نلاحظ انه عند سقوط ضوء الشمس على الخلية يمر هذا الضوء من خلال سطح الخلية ويمتص جزء منه بواسطة الطبقة الأولى للخلية وهي الطبقة التي تحتوي علي فسفور أما أغلبية الضوء الساقط على هذه الخلية فيقوم بامتصاصه الجزء الخاص بذلك وهي الطبقة التي تحتوي علي خليط السيلكون بالبورون حيث يتكون من خلال هذه العملية إلكترونات حرة الحركة يمكنها السريان خلال الموصل الكهربائي في أطراف الخلية وتزداد هذه الحركة بزيادة كثافة الضوء الساقط على هذه الخلية من هنا يمكننا توصيل حمل كهربائي على أطراف هذه الخلية والاستفادة من حركة الإلكترونات الناتجة من تسليط ضوء الشمس علي الخلية.



شکل 4

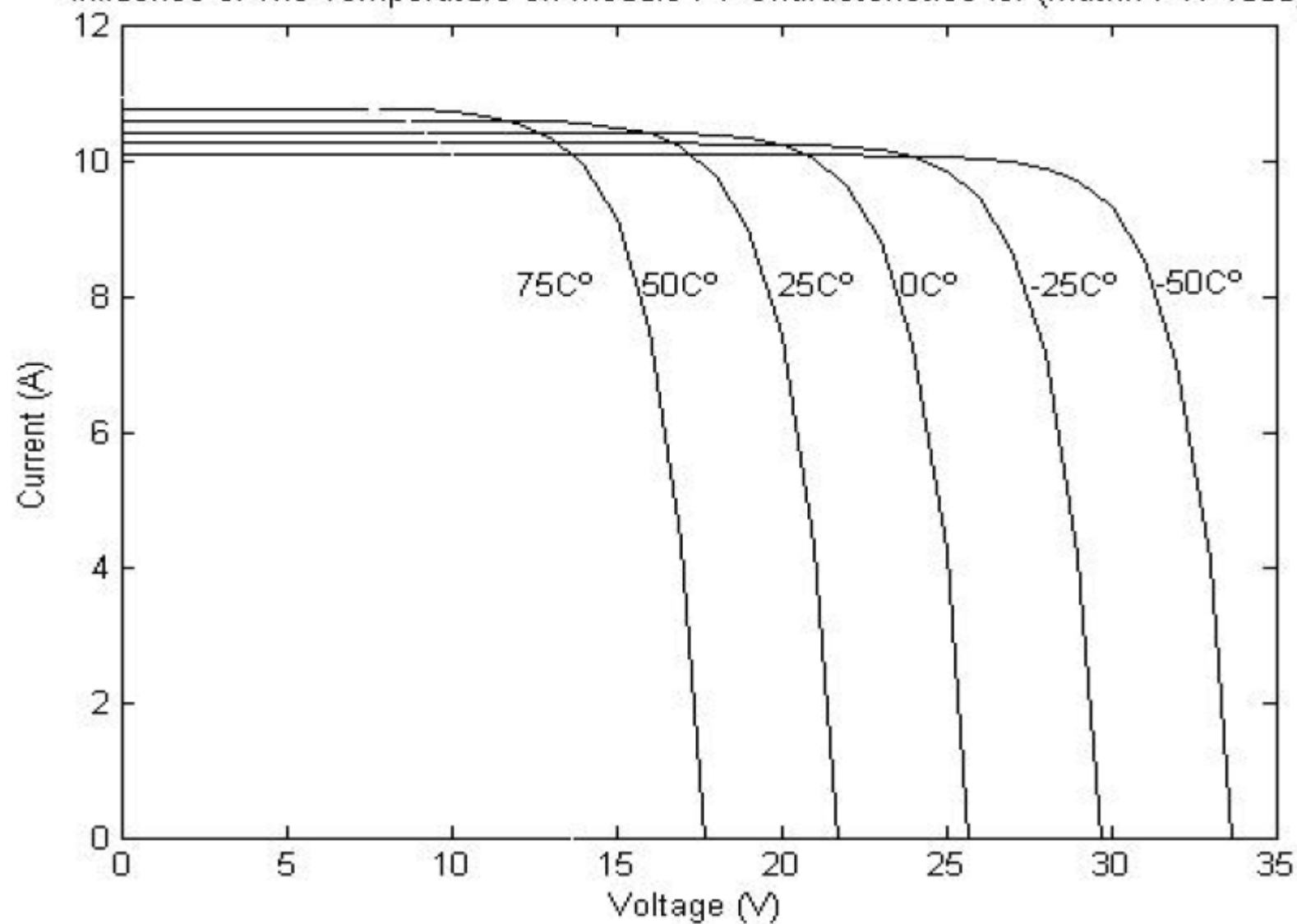
تأثير درجة الحرارة على منحنيات خواص الجهد و التيار للخلية:

تتفاوت كفاءة أداء الخلية الكهروضوئية عادة عكسيا بدرجة حرارة التشغيل بمعنى آخر ينخفض أداء الخلية بارتفاع درجة حرارة الجو المحيط للخلية ، هذا يعني أن الطاقة الكهربائية الناتجة من الخلية تنخفض بارتفاع درجة الحرارة.

الشكل 5 يوضح تأثير درجة الحرارة على منحنى خواص الجهد و التيار وكيف يكون لدرجة الحرارة التأثير المباشر في الطاقة الكهربائية المتولدة.

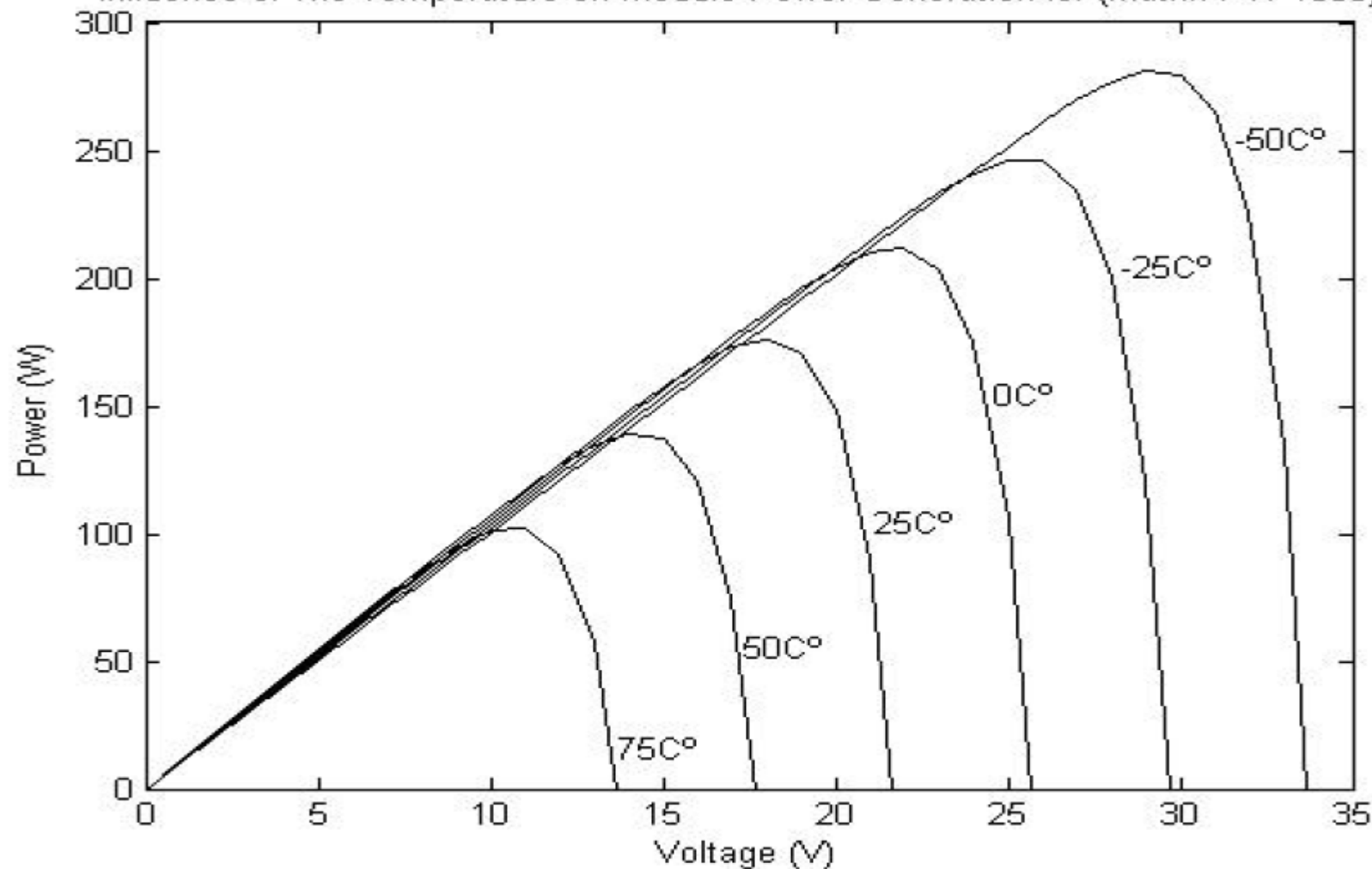
و الشكل 6 يعزز هذا التأثير في كمية الطاقة الكهربائية المتولدة.

Influence of The Temperature on Module I-V Characteristics for (Matrix PW 1650))



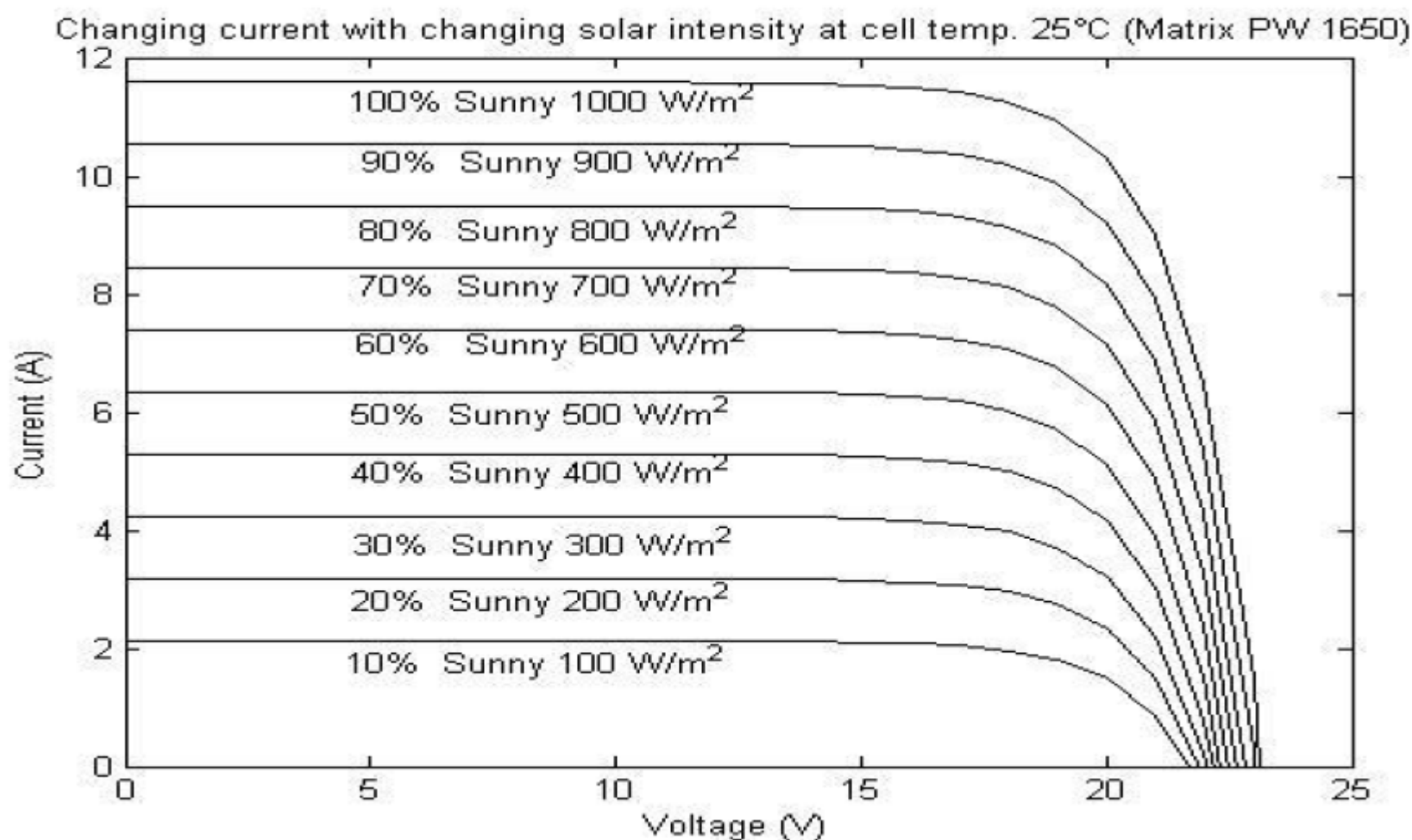
شكل 5

Influence of The Temperature on Module Power Generation for (Matrix PW 1650)



عموما درجة الحرارة من العوامل المؤثرة في الخرج و هناك عوامل أخرى تلعب دور في انخفاض أداء هذه الخلية من هذه العوامل سرعة الهواء و الغبار و كثافة الضوء الساقط على الخلية.

أما سرعة الهواء فتأثيرها ليس كبير مثل درجة الحرارة أو كثافة الضوء أو الغبار ولكن في حساب الطاقة المتولدة رياضيا يؤخذ في الحسبان الشكل 7 حيث يوضح تأثير كثافة الضوء الساقط على الخلية في الطاقة المتولدة.

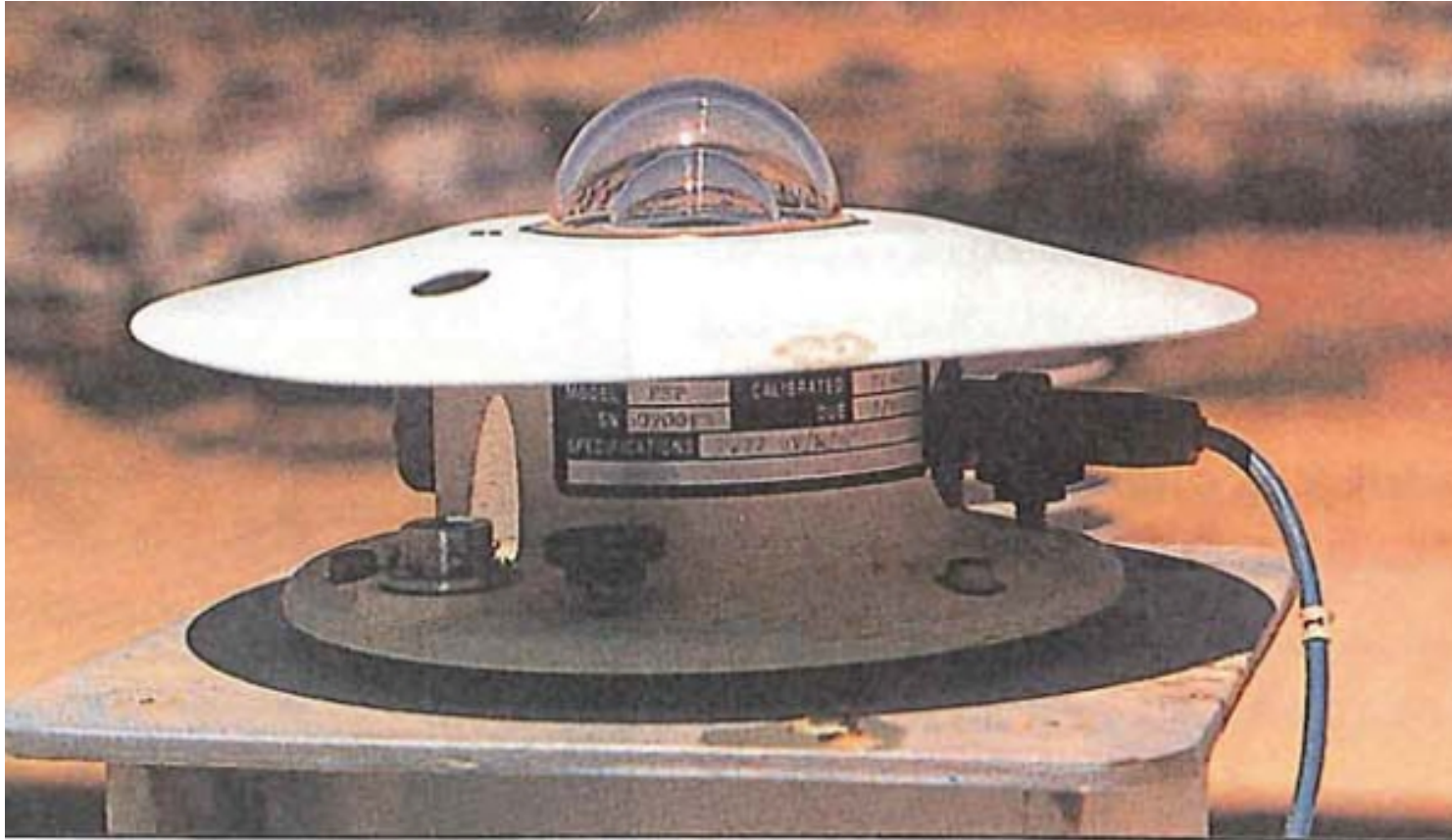


وتعد معرفة كمية الإشعاع الشمسي
الساقط على سطح الأرض مهمة لكثير من
النشاطات العلمية حيث يعتمد اختيار
الموقع وتصميم الأجهزة وأداء نظم
الطاقة الشمسية اعتمادا كبيرا على
مقدار الأشعة الكلية والمبعثرة
والساقطة عموديا .

قياس الإشعاع الشمسي

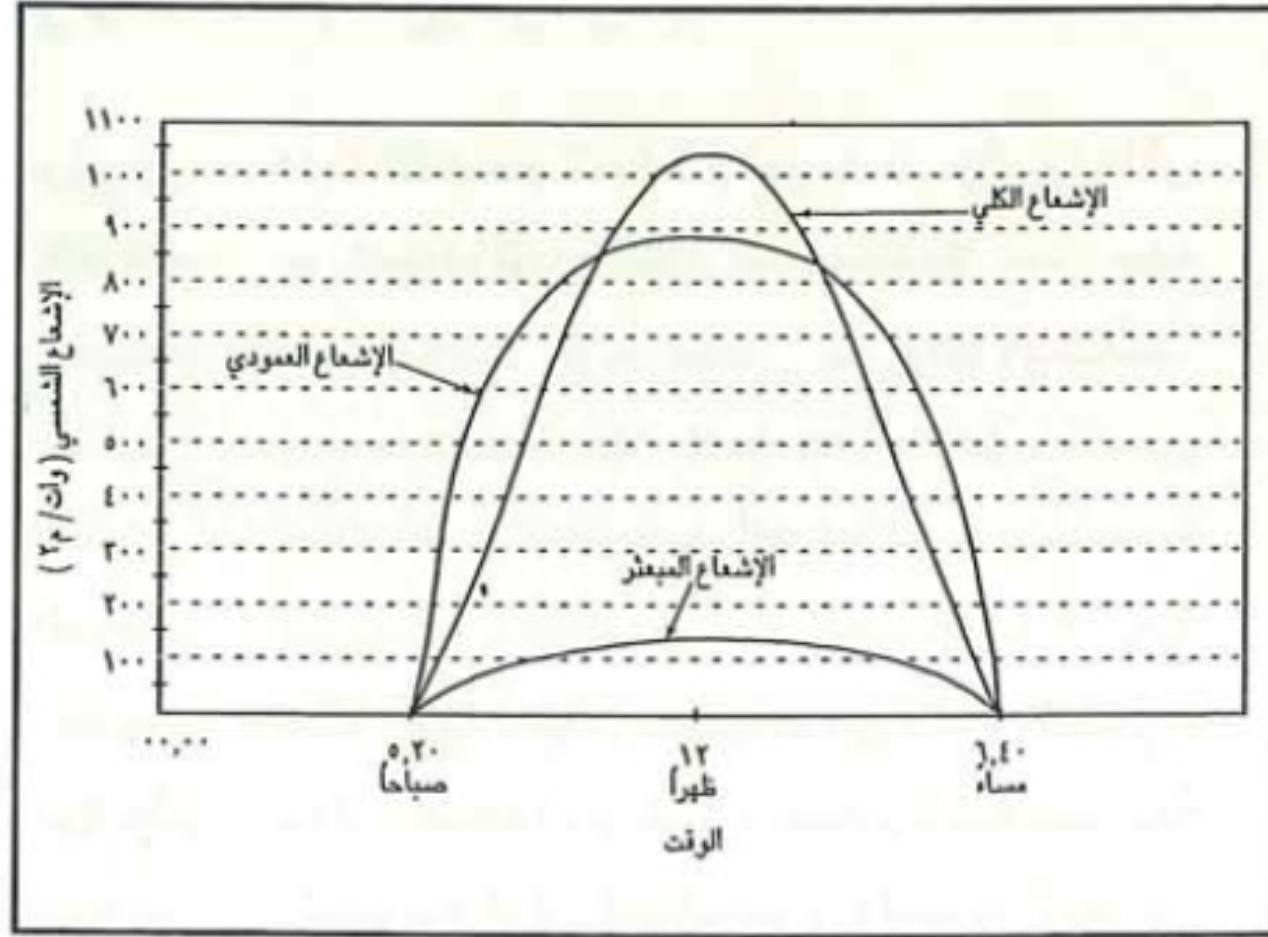
يُقاس الإشعاع الشمسي الساقط عمودياً بجهاز يسمى بايرهليوميتر (Pyrheliometer) وهو جهاز يشبه المنظار الفلكي (التلسكوب) يوضع على جهاز يتتبع الشمس في حركتها خلال اليوم .

ويُقاس الإشعاع الكلي بجهاز يسمى بايرانوميتر (Pyranometer) وهو عبارة عن جهاز يقيس الإشعاع من القبة السماوية (١٨٠ درجة) ، حيث يوضع على سطح مستوي ومرتفع عن سطح الأرض .



● جهاز قياس الإشعاع الشمسي الكلي (بايرانوميتر) .

أما الإشعاع المبعثر فيقاس بنفس جهاز
قياس الإشعاع الكلي بعد حجز
الإشعاع المباشر عن عنصر القياس أما
بقِـرْص يُحْمَل على جهاز تتبع
(Tracking Disk) ، أو بوضع شريحة
معدنية مظلمة (Shadow Band) على طول
مسار الشمس خلال ساعات النهار . ويبين
الشكل (٨) المركبات الثلاث للإشعاع الشمسي
الساقط على القرية الشمسية بالقرب من مدينة
الرياض مقاسة بالأجهزة الثلاثة السابقة كل
٥ دقائق وذلك في يوم ١٢/٢/١٤١٦ هـ
الموافق ١٠/٧/١٩٩٥ م .



● شكل (٨) مركبات الإشعاع الشمسي خلال يوم كامل .

أجهزة القياس الشمسية

تصنع أجهزة القياس الشمسية بثلاث طرق وذلك كمايلي :-

● حرارة كهربائية

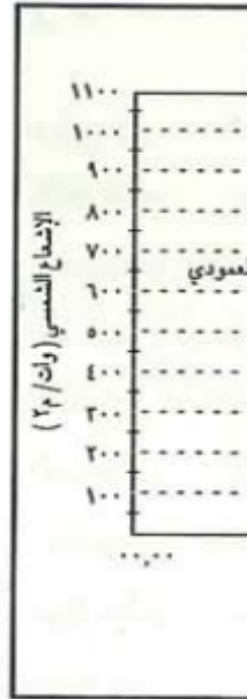
الأجهزة الحرارية الكهربائية (Thermal Electric) عبارة عن سطح مستقبل للأشعة الشمس يطلى بمادة سوداء لكي تمتص حرارة الإشعاع الشمسي ، و سطح آخر أقل إمتصاصاً للإشعاع من السطح الأول . عند تعرض السطحين معاً لأشعة الشمس فان كلاً منهما يمتص مقدراً من الطاقة يختلف عن الآخر ، وعندما تستقر درجتا حرارتهما توصل بينهما بطارية حرارية (Thermopile) حيث يتولد جهد صغير يكون متناسباً مع الفرق في درجتى حرارة السطحين . ويوضع كل هذا التركيب داخل غلاف مانع للفقْد الحراري ، وتركب في أعلاه قبة زجاجية في حالة جهاز مقياس الأشعة الكلية البايرونوميتر (Pyranometer) ، و نافذة زجاجية في حالة جهاز مقياس الأشعة العمودية البايرو هيليوميتر (Pyr heliometer) .

● كهروضوئية

يمكن استخدام خلية كهروضوئية (Photovoltaic Cell) مصنوعة من السيليكون توصل بها على التوازي مقاومة صغيرة تولد جهدا يتناسب مع الإشعاع الشمسي الساقط على الخلية .

● حرارية ميكانيكية

من أمثلة الأجهزة الحرارية الميكانيكية (Thermal Mechanical) جهاز يسمى بايرانوجراف (Pyranograph) وهو عبارة عن تركيب يتكون من شريحتين معدنيتين لهما معاملا إمتصاص مختلفين ويتحركان في حركة قلم على ورق خاص . وتتناسب حركة القلم مع شدة الإشعاع الساقط على الشريحتين المعدنيتين .



يوم كامل .