

الباب التاسع

انتقال الحرارة : HEAT TRANSFER

تعتبر عملية انتقال الحرارة والتبادل الحرارى من العمليات ذات الاهمية الخاصة اذ ان غالبية عمليات التصنيع الغذائى تعتمد اعتمادا اساسيا على نقل الحرارة الى المواد المراد تصنيعها ، أى اجراء عمليات تسخين مثل بسترة اللبن وتعقيمها وتجفيف محاصيل الفاكهه والخضر او امتصاص الحرارة من المواد المراد تصنيعها ، أو اجراء عمليات تبريد مثل تجميد الاغذية وعمل الايس كريم وحفظ المواد المصنعه او الغير مصنعه مثل محاصيل الفاكهه والخضر تحت درجات حرارة منخفضة فى غرف تبريد خاصة تمهيدا لتداولها محليا أو تصديرها الى الخارج .

لذلك نجد انه من واجب مهندس الاغذية الامام الكامل والكافى بالاسس والمبادئ الخاصة بانتقال الحرارة حتى يمكنه التحكم فى عمليات التصنيع والوصول بالمنتج الى الجردة المطلوبه للتسويق وهناك ثلاثة طرق رئيسية تنتقل بها الحرارة خلال جسم أو من جسم الى آخر وهى :

١- انتقال الحرارة بالتوصيل : Heat Conduction

وتتم عملية نقل الحرارة نتيجة لتلامس جزئيات المادة مع بعضها بدون تحركها. وتعتبر عملية رئيسية فى المواد الصلبة ، وثنائية فى المواد السائله ، وقليلة الاهمية فى الغازات .

٢- انتقال الحرارة بالحمل : Heat Convection

وفيهما تنتقل الحرارة من جسم ما الى سائل او غاز وذلك اثناء سريانه داخل مواسير او خارجها . وتتم عملية نقل الحرارة نتيجة لحركة جزئيات السوائل او الغازات .

٣- انتقال الحرارة بالاشعاع : Heat Radiation

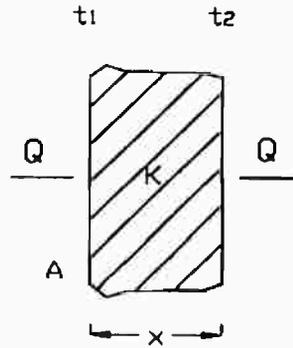
ويتم انتقال الحرارة بهذه الطريقه من اى جسم بدون وسيط وذلك نتيجة لاشعاع الحرارة من هذا الجسم على هيئة موجات كهرومغناطيسيه . Electromagnetic Waves

ومن الناحية العملية لا يحدث انتقال للحرارة من نوع واحد فقط ، بل دائما نجد على الاقل اشتراك نوعين في نقل الحرارة وتسمى العملية بانتقال الحرارة المختلط Combined Heat Transfer ويتوقف معدل انتقال الحرارة خلال جسم على عدة عوامل اهمها : الفرق بين درجات حرارة اسطح الجسم ، ومساحة سطح التبادل الحراري العمودي على اتجاه انتقال الحرارة ، ومقدرة الجسم على نقل الحرارة او مدى مقاومة الجسم لانتقال الحرارة وعموما يعبر عنه بمعامل انتقال الحرارة .

انتقال الحرارة بالتوصيل : HEAT CONDUCTION

إذا فرض انه يوجد لدينا جسم ما ، مثل حائط ذو سمك معين ، ودرجة حرارة سطحيه المتقابلين مختلفة ، نجد انه في حالة الاستقرار الحرارى تنتقل كمية من الحرارة من السطح ذو درجة الحرارة المرتفعة خلال سمك الحائط الى السطح ذو درجة الحرارة المنخفضه (شكل ٩-١). وقد وجد عمليا ان معدل انتقال الحرارة خلال الحائط يتناسب تناسباً طردياً مباشراً مع الفرق في درجة حرارة السطحين ومساحة السطح العمودى على اتجاه انتقال الحرارة . ويتناسب تناسباً عكسياً مع سمك الحائط المنتقله خلاله كمية الحرارة . ويعبر قانون فورير Fourier's Law عن العلاقة بين معدل انتقال الحرارة خلال الحائط والمتغيرات المذكورة كما يأتى :

$$Q = kA \frac{(t_1 - t_2)}{X} \quad (9-1)$$



شكل (٩-١) انتقال الحرارة خلال حائط لانهاى

حيث ان :

Q = معدل انتقال الحرارة بالتوصيل BTU/hr or kcal./hr. or kW

k = معامل انتقال الحرارة بالتوصيل بوحدات

BTU/hr. ft $^{\circ}$ F or kcal/hr. m. $^{\circ}$ C or W/m K

A = مساحة السطح العمودى على اتجاه انتقال الحرارة $f t^2$ or m^2

t_1 = درجة حرارة السطح الساخن للحائط $^{\circ}$ F or $^{\circ}$ C

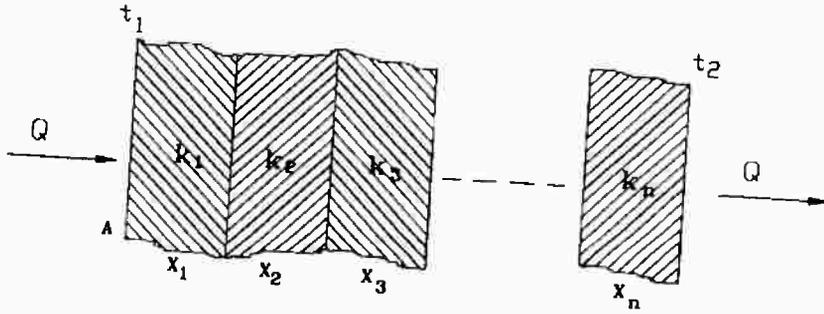
t_2 = درجة حرارة السطح البارد للحائط $^{\circ}$ F or $^{\circ}$ C

X = سمك الحائط ft or m

ويعبر المعامل " k " عن مدى مقاومة مادة الحائط لانتقال الحرارة ، فكلما زادت قيمته كلما كان الجسم موصلا جيدا لانتقال الحرارة ، وكلما قلت قيمته كلما كان الجسم رديء التوصيل للحرارة اى عازل جيد للحرارة

وعادة ما يتكون الجسم من اكثر من طبقة واحدة ، كما هى الحالة عند عزل جدران غرفة تبريد . فتمر كمية من حرارة الجو الخارجى للغرفة من طبقة مادة عازله ملاصقه لطبقة مونه اسمنتيه ثم طبقة الطوب الاحمر (مادة البناء) ثم طبقة مونة اسمنتيه اخرى ومنها خلال طبقة مادة عازله اخرى حتى تصل الى هواء الغرفه الداخلى .

ويمثل الشكل (٩-٢) طريقة انتقال الحرارة خلال جسم مكون من عدة طبقات متوازيه .



شكل (٩-٢) انتقال الحرارة خلال حائط مركب من عدة طبقات

$$Q = \frac{A (t_1 - t_2)}{\frac{x_1}{k_1} + \frac{x_2}{k_2} + \frac{x_3}{k_3} + \dots + \frac{x_n}{k_n}} \quad (9-2)$$

حيث ان :

x_1, x_2, \dots, x_n هى سمك طبقات الحائط

k_1, k_2, \dots, k_n هى معامل انتقال الحرارة بالتوصيل المناظره .

ويمكن تطبيق قانون فورير لانتقال الحرارة بالتوصيل خلال سمك جدار جسم اسطوانى من الداخلى الى الخارج ويسمى بانتقال الحرارة القطرى اى فى اتجاه القطر كما يأتى :

انتقال الحرارة

معدل انتقال الحرارة التفاضلى للسريان القطرى = Q

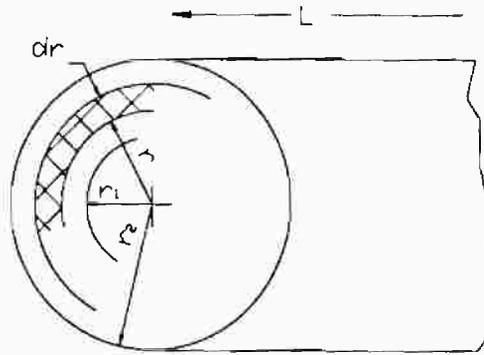
$$Q = -kA \frac{dt}{dr} \quad (9-3)$$

حيث أن

هو المعدل التفاضلى للتغير فى درجة الحرارة فى اتجاه القطر

$$\frac{dt}{dr}$$

الاسطوانى.



شكل (٩-٣) انتقال الحرارة القطرى فى إسطوان

حيث أن هذا المعدل متناقص فالإشارة السالبة موجودة لتصحيح ذلك.

وقيمة A المساحة السطحية للإسطوانه = $2\pi rL$

وبإجراء عملية التكامل بعد التعويض عن قيمة A نحصل على :

$$Q = -2\pi r kL \frac{dt}{dr} \quad (9-4)$$

$$\therefore -\frac{Q}{2\pi kL} \int_{r_1}^{r_2} \frac{dr}{r} = \int_{t_1}^{t_2} dt \quad (9-5)$$

$$\frac{Q}{2\pi kL} \ln \frac{r_2}{r_1} = -[t]_{t_1}^{t_2} \quad (9-6)$$

$$Q = \frac{2\pi kL (t_1 - t_2)}{\ln r_2/r_1} \quad (9-7)$$

or
$$Q = \frac{2\pi kL (t_1 - t_2)}{\ln D_2/D_1} \quad (9-8)$$

حيث أن :

طول الاسطوانه = L

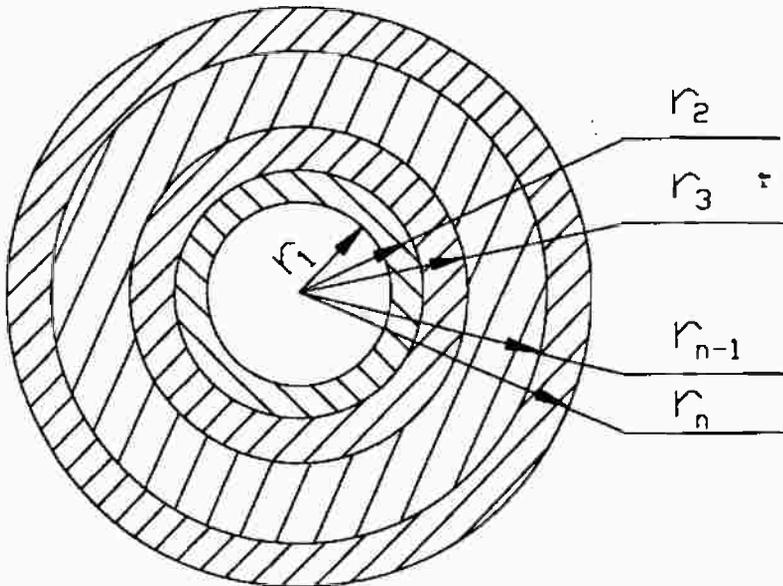
قطر الاسطوانه الداخلى = D_1

قطر الاسطوانه الخارجى = D_2

النسبه التقريبية $\frac{22}{7} = \pi$

لوغاريتم العدد للاساس الطبيعى وليس للاساس ١٠ = \ln

ومن الناحيه العمليه ، تكون الاسطوانه مغطاه باكثر من طبقة كما هى الحاله عند توصيل ماسوره بخار من موقع القيزان الى معدات التصنيع حيث تعزل ماسوره البخار بطبقة او اكثر من مواد عازله للحراره ويمكن حساب معدل انتقال الحراره كما يأتى:-



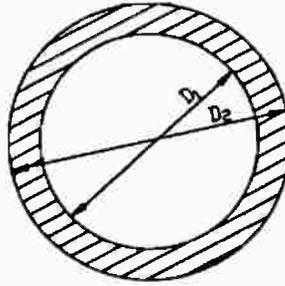
شكل (٩-٤) انتقال الحراره القطرى فى طبقات اسطوانيه

انتقال الحرارة

$$Q = \frac{2\pi L (t_1 - t_2)}{\frac{\ln D_2/D_1}{k_1} + \frac{\ln D_3/D_2}{k_2} + \dots + \frac{\ln D_n/D_{n-1}}{k_{n-1}}} \quad (9-9)$$

حيث أن :

- قطر الاسطوانه الداخلى = D_1
 اقطار طبقات المواد الخارجيه المغلفه للاسطوانه = $D_n \dots D_4 , D_3 , D_2$
 معامل انتقال الحرارة بالتوصيل لمادة الاسطوانه = k_1
 معامل انتقال الحرارة بالتوصيل لطبقات المواد الخارجيه المغلفه للاسطوانه = k_{n-1} , k_2



شكل (9-9) انتقال الحرارة القطرى فى طبقات كروي

أما إذا كان انتقال الحرارة يتم من داخل الى خارج (او العكس) جسم كروي الشكل كما هي الحال عند تبريد البطيخ مثلا داخل غرفة تبريد فيمكن حساب معدل انتقال الحرارة كما يأتى :

$$Q = \frac{2\pi k (t_1 - t_2)}{\frac{1}{D_1} - \frac{1}{D_2}} \quad (9-10)$$

حيث أن :

- قطر الكره حتى السطح الداخلى للجسم = D_1
 قطر الكره حتى السطح الخارجى للجسم = D_2

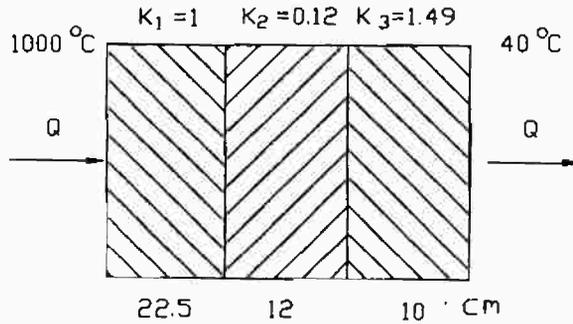
يوجد بالملاحق (ملحق رقم ٢) جداول تبين قيم معامل انتقال الحرارة بالتوصيل لبعض المعادن وسبائكها وكذلك لبعض المواد العازلة الشائعة الاستعمال فى عمليات التسخين والتبريد داخل مصانع الاغذية والالبان بالوحدات الدوليه .

مثال : احسب معدل الفقد فى الحرارة من حائط فرن مكون من ثلاثة طبقات كالاتى:

٢٢.٥ سم طوب حرارى ذو معامل انتقال حراره بالتوصيل ١.٠ وات/متركلفن
 ١٢ سم مادة عازله ذو معامل توصيل للحراره مقداره ٠.١٢ وات/متركلفن
 ١٠ سم من طوب احمر ذو معامل توصيل للحراره مقداره ١.٤٩ وات/متركلفن

وذلك اذا كانت درجة حرارة السطح الداخلى والخارجى 1000°C ، 40°C على الترتيب.

الحل



$$Q = \frac{A (t_1 - t_2)}{\frac{X_1}{k_1} + \frac{X_2}{k_2} + \frac{X_3}{k_3}}$$

$$Q = \frac{(1000 - 40) \times 1}{\frac{22.5}{(100)(1)} + \frac{12}{(100)(0.12)} + \frac{10}{(100)(1.49)}}$$

$$= 745 \text{ Watt/m}^2$$

انتقال الحرارة بالحمل : HEAT CONVECTION

إذا فرض انه يوجد لدينا جسم معدني ساخن ، ويوجد على أسطحه سائل او غاز سواء في حالة سكون او حركة مستمره ، نجد انه تنتقل كمية من الحرارة من الجسم الى السائل او الغاز نتيجة للامستها لسطح التبادل الحرارى . ويلاحظ انه اذا تحرك السائل او الغاز على سطح التبادل الحرارى تتكون طبقة ذات سمك صغير جدا من السائل او الغاز تكون ملاصقة لهذا السطح تسمى بالطبقة الحدية او Boundary Layer ويتم انتقال الحرارة خلالها من الجسم المعدني الى بقية السائل او الغاز . ويزداد معدل انتقال الحرارة كلما قل سمك هذه الطبقة . ويتم انتقال الحرارة في حالة سكون السائل او الغاز على السطح الساخن نتيجة للفرق في كثافة الطبقة الملاصقة للسطح الساخن . فمن المعلوم ان هذه الطبقة تكون درجة حرارتها مرتفعة نوعا ما عن بقية السائل او الغاز مما يتسبب عنه انخفاض في كثافتها فترتفع الى اعلى ويحل محلها طبقة اخرى ذات درجة حرارة منخفضة وتتوالى هذه العملية محدثة حركة في السائل او الغاز تسمى بتيارات الحمل ويسمى هذا النوع من انتقال الحرارة بالحمل الحر Free Convection . أما في حالة حركة السائل او الغاز نتيجة لدفعها بواسطة تلمبه أو مروحة على سطح التبادل الحرارى فيسمى انتقال الحرارة بالحمل الجبرى Forced Convection وفى كلا الحالتين فانه يمكن استخدام قانون نيوتن للتبريد او التسخين Newton's Law of Cooling or Heating لحساب كمية الحرارة المنتقلة الى السائل او الغاز فى وحدة الزمن كما يأتى :

$$Q = h A (t_2 - t_1) \quad (9-11)$$

حيث أن :

$$t_2 = \text{درجة حرارة سطح التبادل الحرارى } ^\circ\text{F or } ^\circ\text{C}$$

$$t_1 = \text{درجة حرارة السائل او الغاز } ^\circ\text{F or } ^\circ\text{C}$$

$$A = \text{مساحة سطح التبادل الحرارى } \text{ft}^2 \text{ or } \text{m}^2$$

$$h = \text{معامل انتقال الحرارة بالحمل}$$

$$\text{BTU/hr. ft}^2 \text{ } ^\circ\text{F or kcal/hr.m}^2 \text{ } ^\circ\text{C or Watt/m}^2 \text{ K}$$

وبخلاف الحالة فى ان معامل انتقال الحرارة بالتوصيل "k" كمية ثابتة لكل مادة تختلف من مادة الى اخرى وتدل على مدى مقاومتها لانتقال الحرارة نجد ان معامل انتقال الحرارة بالحمل "h" يختلف اختلافا جذريا بالنسبة للسائل او الغاز نفسه وذلك تبعا للظروف التى تتحكم فى سريان السوائل والغازات التى تعتمد على ما يأتى :

- ١- سرعة سريان السائل او الغاز على سطح التبادل الحرارى .
- ٢- نوع السريان على الاسطح .
- ٣- كثافة السريان او الغاز .
- ٤- لزوجة السائل او الغاز .
- ٥- حرارته النوعية .
- ٦- درجة حرارة سطح التبادل الحرارى .
- ٧- طول السطح او قطره فى حالة الاسطح المستديره .

سريان السوائل والغازات على الاسطح او داخل مواسير :

سواء كان سريان السوائل او الغازات سريانا حرا او جبريا (قسريا) فنجد انه اما ان يسير فى خطوط متوازيه او انسيابيه Streamline or Laminar Flow او فى المرحلة الانتقالية Transition Flow كخليط من الخطوط المتوازيه والمضطربه ، او يسير فى حالة دوامية مضطربه Turbulent Flow وتؤثر طريقة سريان السوائل او الغازات على قيمة معامل انتقال الحرارة بالحمل "h".

وتحدد طريقة سريان السائل او الغاز بمعرفه قيمة رقم رينولدز Reynolds Number اذا كانت قيمته اقل من ٢١٠٠ كان سريان السائل او الغاز من النوع الانسيابى المتوازى واذا زادت عن ٤٠٠٠ دل ذلك على ان السريان من النوع الدوامى المضطرب والسابق الاشاره اليها فى الباب الخاص بسريان الموائع وتعيد فيما يلى كتابة المعادله الخاصه برقم رينولدز Re.

$$Re = \frac{\rho V D}{\mu} \quad (9-12)$$

حيث ان :

$$\begin{aligned} V &= \text{سرعة سريان السائل او الغاز} \quad \text{ft./sec. or m./sec.} \\ \rho &= \text{كثافة السائل او الغاز} \quad \text{Lb/ft}^3 \text{ or kg./m}^3 \\ D &= \text{الطول المميز لسطح السريان} \quad \text{ft. or m.} \\ \mu &= \text{لزوجة السائل او الغاز} \quad \text{Lb/ft. sec. or kg./m.sec.} \end{aligned}$$

مع مراعاة ان خواص السائل او الغاز الطبيعىه يجب حسابها عند درجة الحرارة المتوسطة له وفى حالة ما اذا كان السريان داخل مواسير فيكون D هو قطر المسوره الواحدة ، واذا كان السريان على اسطح فيكون D هو طول السطح ، اما اذا كان السريان داخل مواسير مقطوعها غير دائرى (مربع او مستطيل مثلا) فان D فى

هذه الحالة تمثل ما يسمى بالقطر الهيدروليكي لمقطع مجرى السريان ويمكن حسابه كما ذكر سابقا فى الباب الخاص بسريان الموائع

الحالات المختلفه لانتقال الحرارة بالحمل وطريقة ايجاد المعامل "h".

قبل ان نذكر فيما بعد الحالات المختلفه لانتقال الحرارة بالحمل فانه يجب معرفة رقم آخر يسمى رقم براندل Prandtl Number وهو رقم غير مميز (لابعدى) يحدد مدى مقارنة توزيع درجة حرارة سائل او غاز داخل مجرى اثناء تسخينه او تبريده وتغيرها مع سرعة سريانه داخل هذا المجرى .

ويرمز لرقم براندل بالرمز "Pr" وتتحدد قيمته من المعادله الآتية :

$$Pr = \frac{\mu C_p}{k} \quad (9-13)$$

حيث ان :

μ = لزوجة السائل او الغاز. Lb/ft.sec. or kg/m.sec.

C_p = الحرارة النوعية تحت ضغط ثابت BTU/Lb. °F

or kcal/kg.°C or kJ/kg K

k = معامل انتقال الحرارة بالتوصيل BTU/sec. ft.°F

or kcal/sec.m.°C or kW/m K

أولا : السريان الجبرى أو القسرى Forced Convection

أ- إذا كان السريان دوامى مضطرب أى أن $Re > 4000$

وكان رقم $Pr < 10$ تستخدم المعادلة الآتية :

$$Nu = \frac{hD}{k} = 0.023 \times Re^{0.8} \times Pr^{0.4} \quad (9-14)$$

ب- اذا كان السريان دوامى مضطرب وكان $Pr > 10$ وتستخدم المعادلة الآتية :

$$\frac{hD}{k} = 0.027 \times Re^{0.8} \times Pr^{0.3} \quad (9-15)$$

ج- إذا كان السريان انسيابى متوازى أى أن $Re < 2100$ تستخدم المعادله الآتيه :

$$\frac{hD}{k} = 0.664 \times Re^{0.5} \times Pr^{0.33} \quad (9-16)$$

ثانيا : السريان الحر Free Convection

وقبل أن نذكر بعض المعادلات التى تعبر عن قيمة معامل إنتقال الحرارة بالحمل h فإنّه من المناسب أن نعرف رقم آخر غير مميز يسمى رقم جراسشوف Grashof's .

ويرمزله بالرمز Gr وهو يعبر عن النسبه بين القوى المتولده عن تيارات الحمل Buoyant forces والقوى المتولده عن احتكاك طبقات المانع مع بعضها أى لزوجتها Viscous forces

$$Gr = \frac{\rho^2 g_c \beta \Delta t \cdot L^3}{\mu^2} \quad (9-17)$$

حيث ان :

- ρ = كثافة المائع
- g_c = عجلة الجاذبيه الأرضيه
- β = معامل التمدد ويعبر عنه بعكس درجة الحرارة المطلقه للمائع
- Δt = الفرق بين درجة حرارة السطح الساخن ودرجة الحرارة المتوسطه للمائع
- L = الطول المميز للسطح
- μ = لزوجة المائع محسوبه عند درجة الحرارة المتوسطه له

مع ملاحظه وحدات كل عامل من هذه العوامل والتى يمكن التعويض بها فى رقم Grashof بحيث ينتج عنه رقم غير مميز (لابعدى Dimensionless)

أ- فى حالة السوائل يمكن استخراج قيمة h من المعادلات الآتيه :

$$Nu = 0.53 (Gr. Pr.)^{0.25} \quad (9-18)$$

$$\frac{hD}{k} = 0.53 \left[\frac{\rho^2 gc \beta \Delta t D^3}{\mu^2} \cdot \frac{\mu cp}{k} \right]^{0.25} \quad (9-19)$$

$$= 0.53 \left[\frac{\rho^2 gc \beta \Delta t D^3 \cdot cp}{\mu k} \right]^{0.25} \quad (9-20)$$

وذلك في حالة ما إذا كان قيمة

$$Gr. Pr. < 10^9$$

وتستخدم المعادلة الآتية :

$$Nu = 0.12 [Gr. Pr.]^{0.33} \quad (9-21)$$

$$\frac{hD}{k} = 0.12 \left[\frac{gc \cdot D^3 \rho^2 \cdot cp \cdot \beta \cdot \Delta t}{\mu \cdot k} \right]^{0.33} \quad (9-22)$$

$$Gr. Pr. > 10^9$$

وذلك إذا كان

ب- في حالة الغازات يمكن استخراج قيمة "h" من المعادلات الآتية :

١- مواسير افقيه أو رأسيه لايزيد طولها عن قدم أو ٣٠ سم

$$0.25$$

$$h = 0.27 \left(\frac{\Delta t}{D} \right) \quad (9-23)$$

في حالة الأسطح تستخدم "L" بدلا من "D"

٢- أسطح أفقيه ساخنه من أعلى

$$h = 0.38 \Delta t^{0.25} \quad (9-24)$$

٣- أسطح أفقيه ساخنه من أسفل

$$h = 0.20 \Delta t^{0.25} \quad (9-25)$$

٤- أسطح أو مواسير رأسية طولها أكبر من قدم أو ٣٠ سم

$$h = 0.27 \Delta t^{0.25} \quad (9-26)$$

مثال :

أوجد معامل انتقال الحرارة بالحمل عند تسخين عصير طماطم من ١٦°م إلى ٧٦°م إذا كانت سرعة سريان العصير ١.٢٥ متر/ثانية خلال ماسورة قطرها الداخلى ٢.٥ سم وكانت درجة حرارة سطح الماسورة من الخارج ٨٢°م وكثافة العصير ١.٢٥ كجم/متر مكعب وحرارته النوعية ٠.٩٥ . ولزوجته المتوسطة ٨ر٤ كجم/ساعة. متر ومعامل إنتقال الحرارة بالتوصيل ٥٢ر٠ وات/متر^٢كلفن .

الحل

نحدد أولاً نوع السريان وعلى ذلك نحسب رقم رينولدز

$$\begin{aligned} Re &= \frac{\rho V D}{\mu} \\ &= \frac{(1025)(1.25 \times 60 \times 60) (2.5)}{(8.4) (100)} \\ &= 13727.7 \quad (\text{i.e.}) > 2100 \end{aligned}$$

∴ السريان دوامى مضطرب

$$\begin{aligned} Pr &= \frac{\mu C_p}{k} \\ &= \frac{(8.4) (0.95)}{(0.57)} = 15.35 \end{aligned}$$

انتقال الحرارة

وعلى ذلك نستخدم المعادلة ب- بند أولا حيث أن $Pr > 10$

$$\begin{aligned} \frac{hD}{k} &= 0.027 Re^{0.8} Pr^{0.3} \\ \frac{h \times 2.5}{0.52 \times 100} &= 0.027 (13727.7)^{0.8} (15.35)^{0.3} \\ \therefore h &= \frac{(0.027) (2042.1) (2.27) (0.52) (100)}{(2.5)} \\ &= 2603 \quad W/m^2 \cdot K \end{aligned}$$

انتقال الحرارة بالإشعاع

HEAT RADIATION

ويتم انتقال الحرارة عن طريق اشعاع جزيئات الجسم ، سواء كان سائل او غاز او مادة صلبة ، بين بعضها وكذلك بتبادل هذه الاشعاعات بين جزيئات مواد مختلفه وتحمل هذه الاشعاعات طاقه حراريه تنتقل على شكل موجات كهرومغناطيسييه Electromagnetic سرعتها تساوي سرعة الضوء تعتمد اساسا على درجة حرارة الجسم المشع وطبيعة سطحه . وقد وجد نظريا وعمليا ان معدل انتقال الحرارة بالإشعاع يتناسب تناسباً طردياً مع مساحة السطح المشع والأس الرابع لدرجة حرارته المطلقة ويعبر عن هذه العلاقة قانون ستيفان - بولتسمان Stefan-Boltzmann كما يأتي :

$$Q = \sigma AT^4 \quad (9-27)$$

حيث ان :

A	=	مساحة السطح المشع
T	=	درجة الحرارة المطلقة للسطح المشع
σ	=	ثابت ستيفان - بولتسمان Stefan-Boltzmann Constant
1.72×10^{-8}	=	$\text{BTU/hr. ft}^2 \text{ } ^\circ\text{F}^4$
4.96×10^{-8}	=	$\text{kcal/hr. m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}^4$
5.67×10^{-8}	=	$\text{W/m}^2 \text{ } \text{K}^4$

والقانون السابق يفترض ان الجسم يشع جميع طاقته الحراريه بدون ان يؤخذ في الاعتبار طبيعة السطح المشع سواء كان املسا او خشنا . وعلى ذلك يجب تصحيح هذه المعادلة بمقدار ما يشعه الجسم حقيقه . فاذا كانت e هي نسبة الاشعاع للجسم اي النسبه بين مقدار ما يشعه الجسم من طاقة حراريه الى الطاقه الحراريه الاشعاعيه الكليه لهذا الجسم ، اي ان هذه النسبه يجب ان تكون اقل من الواحد الصحيح . فتصير المعادلة السابقه (9-27) :

$$Q = \sigma e AT^4 \quad (9-28)$$

فإذا فرض انه يوجد هناك جسمان مشعان فى حيز لا يؤثر على طريقة اشعاعهما ، فان كمية الحرارة المتبادله بينهما بالاشعاع تعتمد بالاضافه الى ماسبق على كيفية وضع هذان الجسمان بالنسبه لبعضهما حيث ان جميع الطاقه المشعه من كل جسم لاتقطع سطح الجسم الآخر . ففى حالة وجود جسم ساخن فى حيز محدود - مثل اسطوانه ذات قطر صغير موضوعه مركزيا داخل اسطوانه اخرى ذات - قطر كبير وسطحيهما متوازيان ، او مثل سطحى كرتين متوازيين مركزيا فان كمية الحرارة المتبادله بالاشعاع بينهما تكون :

$$Q = \frac{\sigma A_1 (T_1^4 - T_2^4)}{\frac{1}{e_1} + \frac{A_1}{A_2} \left(\frac{1}{e_2} - 1 \right)} \quad (9-29)$$

حيث ان :

$$\begin{aligned} A_1 &= \text{مساحة السطح المشع} \\ A_2 &= \text{مساحة سطح الحيز المحدود المحيط بالجسم المشع} \\ T_1 &= \text{درجة الحرارة المطلقة للجسم المشع} \\ T_2 &= \text{درجة الحرارة المطلقة للحيز المحيط} \\ e_1 &= \text{نسبة اشعاع الجسم المشع} \\ e_2 &= \text{نسبة اشعاع الحيز المحيط} \end{aligned}$$

فإذا كان الحيز كبير جدا بالنسبه للسطح المشع ، كما هى الحالة عند وجود ماسورة بخار تمر داخل حجرة كبيره مثلا ، فانه يمكن اهمال مساحة السطح المشع A_1 اذا ماقورنت بمساحة الحيز A_2 وبذلك تصبح المعادله السابقه معادله رقم (9-29) كما يأتى :

$$Q = \sigma e_1 A_1 (T_1^4 - T_2^4) \quad (9-30)$$

وفى حالة تبادل الاشعاع الحرارى بين سطحين مستقيمين متوازيين اى ان :

$$A_2 = A_1 \quad \text{فان كمية الحرارة المتبادله بينهما تصير :}$$

$$Q = \frac{\sigma A_1 (T_1^4 - T_2^4)}{\frac{1}{e_1} + \frac{1}{e_2} - 1} \quad (9-31)$$

وفى كثير من الاحيان يمكن تبسيط حساب كمية الحرارة المتبادلة بالاشعاع باستخدام معامل انتقال الحرارة بالاشعاع يشابه الحالة لانتقال الحرارة بالحمل . ويمكن توضيح ذلك باستخدام مثلا الحالة التى يكون فيها الحيز كبير جدا بالنسبه للمسطح المشع كما يأتى :

$$Q = h_r A (T_1 - T_2) \quad (9-32)$$

$$= \sigma \epsilon A (T_1^4 - T_2^4) \quad (9-33)$$

حيث h_r = معامل انتقال الحرارة بالاشعاع

$$\therefore h_r = A \epsilon \sigma \frac{(T_1 + T_2)^3}{2} \left[1 + \left(\frac{T_1 - T_2}{T_1 + T_2} \right)^2 \right] \quad (9-34)$$

$$= 0.00692 \epsilon \left(\frac{T_{av}}{100} \right)^3 \quad (9-35)$$

حيث

$$\frac{T_1 + T_2}{2} = \text{درجة الحرارة المطلقة المتوسطة} = T_{av}$$

انتقال الحرارة المختلط

COMBINED HEAT TRANSFER

من الناحية العملية ، لا يحدث ان تتبادل المواد كمية حرارة من نوع واحد فقط ، ودائما نجد ان كمية الحرارة تنتقل بالتوصيل مع انتقال بالحمل ، او انتقال بالحمل مع انتقال بالاشعاع او انتقال بالثلاثة انواع معا . ويعبر عن ذلك استخدام معامل كلى مكافئ ، للتبادل الحرارى ، وتكون بذلك كمية الحرارة المنتقلة فى وحدة الزمن :

$$Q = UA (T_1 - T_2) \quad (9-36)$$

حيث ان :

$$T_1 = \text{درجة الحرارة الخارجية للمساحة الاولى}$$

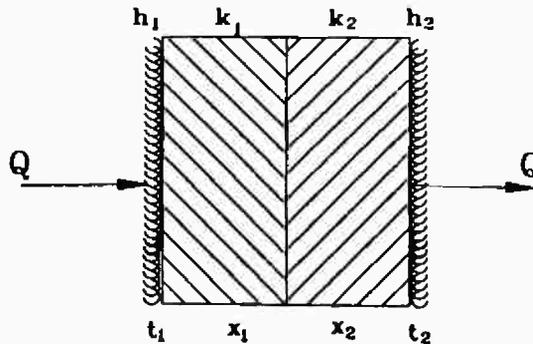
$$T_2 = \text{درجة الحرارة الخارجية للمساحة الثانية}$$

$$A = \text{مساحة سطح التبادل الحرارى المتعامد مع اتجاه انتقال الحرارة .}$$

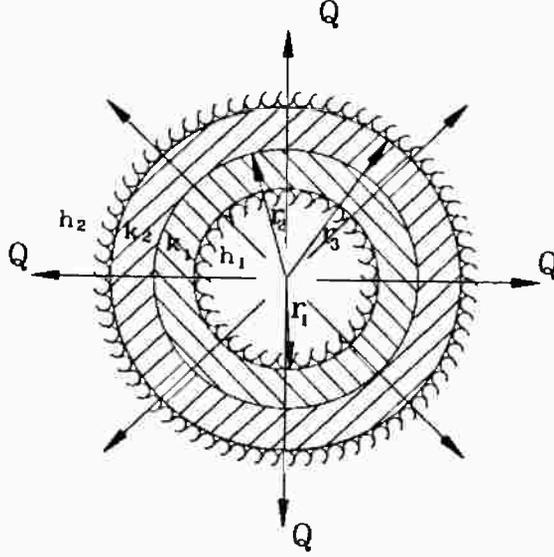
$$U = \text{المعامل الكلى المكافئ لانتقال الحرارة .}$$

ففى حالة التبادل الحرارى المختلط بالتوصيل والحمل لحائط مكون من طبقتين شكل (٩-٦) يكون المعامل الكلى المكافئ ، للتبادل الحرارى ،

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{h_1} + \frac{x_1}{k_1} + \frac{x_2}{k_2} + \frac{1}{h_2} \quad (9-37)$$



شكل (٩-٦) انتقال الحرارة المختلط فى حائط مركب



شكل (٧-٩) انتقال الحرارة المختلط في طبقات اسطوانيه

وفي حالة انتقال الحرارة القطري لاسطوانتين مركزيتين متوازيتين :

$$\frac{1}{UA_1} = \frac{1}{h_1 A_1} + \frac{1}{2\pi k_1 L} \ln \frac{D_2}{D_1} + \frac{1}{2\pi k_2 L} \ln \frac{D_3}{D_2} + \frac{1}{h_2 A_2} \quad (9-38)$$

حيث أن :

- = D_1 القطر الداخلي للاسطوانه الداخليه .
- = D_2 القطر الخارجى للاسطوانه الداخليه .
- = D_3 القطر الخارجى للاسطوانه الخارجيه .
- = k_1 معامل انتقال الحرارة بالتوصيل لجدار الاسطوانه الداخليه .
- = k_2 معامل انتقال الحرارة بالتوصيل لجدار الاسطوانه الخارجيه .
- = A_1 المساحه السطحيه الداخليه للاسطوانه الداخليه $\pi D_1 L$
- = A_2 المساحه السطحيه الخارجيه للاسطوانه الخارجيه $\pi D_3 L$
- = L طول الاسطوانه .
- = h_1 معامل انتقال الحرارة بالحمل على سطح الاسطوانه الداخليه .
- = h_2 معامل انتقال الحرارة بالحمل على السطح الخارجى للاسطوانه الخارجيه .

وفي حالة وجود كرتين مركزيتين يمكن حساب المعامل الكلي المكافئ للتبادل الحراري من :

$$\frac{1}{UA_1} = \frac{1}{h_1 A_1} + \frac{1}{2\pi k_1} \left(\frac{1}{D_1} - \frac{1}{D_2} \right) + \frac{1}{2\pi k_2} \left(\frac{1}{D_2} - \frac{1}{D_3} \right) + \frac{1}{h_2 A_2} \quad (9-39)$$

حيث :

$$A_1 = \pi D_1^2$$

$$A_2 = \pi D_2^2$$

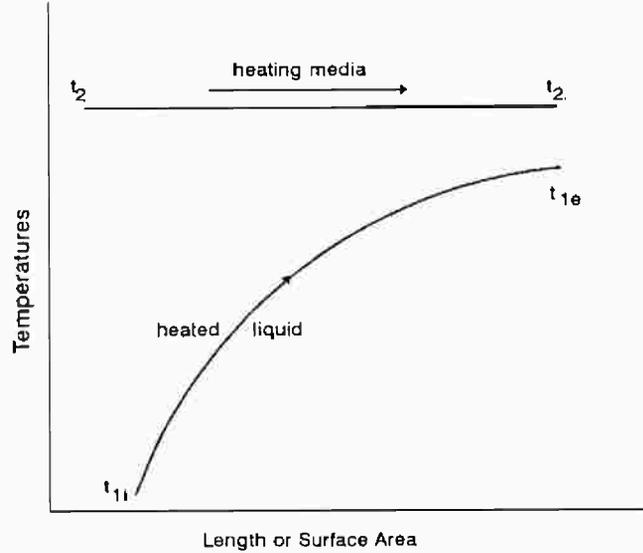
المبادلات الحرارية HEAT EXCHANGERS

يتم نقل الحرارة من وإلى المواد المراد تصنيعها بواسطة معدات خاصة تسمى بالمبادلات الحرارية . ولكي نتفهم هذه الأجهزة بأنواعها وأشكالها المختلفة يجب دراسة طريقة انتقال الحرارة داخل هذه الأجهزة والامام الكافي بمدى صلاحيتها للاستعمال فى مختلف عمليات التصنيع . وحتى نضمن الانتقال السريع للحرارة بكفاءة عالية وباقل فقد ممكن للحرارة ، نذكر فيما يأتى القواعد الاساسية التى يجب مراعاتها فى جميع عمليات التبادل الحرارى :

- ١- التجديد السريع لطبقة السائل الملامسه لسطح التبادل الحرارى .
- ٢- خلط الطبقات الملامسه مع باقى طبقات السائل وتجديدها بطبقة اخرى مع الاخذ فى الاعتبار المنتجات والسوائل التى تتلف نتيجة للخلط الشديد .
- ٣- العمل على ايجاد اكبر فرق ممكن فى درجات الحرارة بين المادة المراد تسخينها او تبريدها وبين وسيط التسخين او التبريد ولكن مع مراعاة انواع الاغذية والمنتجات الزراعيه التى لاتتحمل فرق كبير فى درجة الحرارة كالالبان التى يحدث لها ظاهرة الشياط اذا زاد هذا الفرق بمقدار كبير .
- ٤- استعمال اسطح جيدة التوصيل للحراره .

الطرق الرئيسية للتبادل الحرارى

١- التبادل الحرارى ذو الوسيط الثابت : Constant Flow



شكل (٩-٨) المبادل الحرارى ذو الوسيط الثابت

وفى هذه الحالة يكون الوسيط الحرارى ذو درجة حرارة ثابتة مثل البخار وتنتقل الحرارة الكامنة منه الى السائل المراد تسخينه فلا تنخفض درجة حرارته اى يتم تكثيفه فيتحول البخار من حالة التشبع مثلا الى حالة ماء عند درجة حرارة الغليان لضغط البخار المناظر .

ويعمل موازنة حراريه داخل المبادل الحرارى بغرض اهمال أى فقد للحرارة منه الى الجو المحيط به ، نجد ان :

كمية الحرارة المنتقلة من البخار = كمية الحرارة الممتصه بواسطة السائل المراد تسخينه .

$$Q = m_1 C_{p1} (t_{1i} - t_{1e}) \quad (9-40)$$

$$Q = m_2 (\text{Total heat of steam} - \text{liquid heat}) \quad (9-41)$$

حيث أن :

$$m_1 = \text{معدل سريان السائل المراد تسخينه}$$

$$m_2 = \text{معدل سريان بخار التسخين}$$

$$C_{p1} = \text{الحرارة النوعية للسائل المراد تسخينه عند ضغط ثابت}$$

$$t_{1i} = \text{درجة حرارة دخول السائل قبل تسخينه}$$

$$t_{1e} = \text{درجة حرارة خروج السائل بعد تسخينه.}$$

وكذلك يمكن حساب مساحة سطح التبادل الحرارى من المعادلة الآتية :

$$Q = UA \Delta t_m \quad (9-42)$$

حيث Δt_m هو الفرق المتوسط فى درجات الحرارة ويمكن حسابها من المعادلة الآتية :

$$\Delta t_m = \frac{\Delta t_i - \Delta t_e}{\ln \frac{\Delta t_i}{\Delta t_e}} \quad (9-43)$$

حيث أن :

$$\Delta t_i = \text{فرق درجات حرارة الدخول الى المبادل الحرارى}$$

$$\Delta t_i = t_2 - t_{1i}$$

$$\Delta t_e = \text{الفرق فى درجات حرارة الخروج من المبادل الحرارى}$$

$$\Delta t_e = t_2 - t_{1e}$$

وإذا كانت النسبة بين الفرق فى درجات حرارة الدخول الى الفرق فى درجات حرارة الخروج من المبادل الحرارى اقل من ٢ ، فإنه يمكن استخدام المتوسط الحسابى للفرق فى درجات الحرارة بدلا من المتوسط اللوغاريتمى . أى أن :-

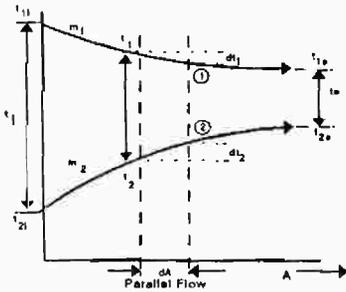
انتقال الحرارة

$$\frac{\Delta t_i}{\Delta t_e} < 2$$

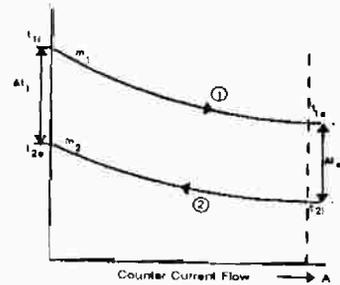
$$\Delta t_m = \frac{\Delta t_i + \Delta t_e}{2} \quad (9-44)$$

Mean Temp. Difference:

الفرق المتوسط في درجات الحرارة



شكل (٩-٩) المبادل العكسي



شكل (٩-١٠) المبادل الحراري المتوازي

سوف نقوم بتحليل الوضع في حالة التبادل الحراري المتوازي وذلك بأخذ مساحة تفاضليه مقدارها dA ويكون الفرق في درجات الحرارة داخل المبادل الحراري بين كل من المائع وسط التسخين (١) والمائع المراد تسخينه (٢)

$$\Delta t = t_1 - t_2 \quad (9-45)$$

وكمية الحرارة المنتقلة بين المائعين

$$dQ = U \cdot dA \cdot \Delta t \quad (9-46)$$

أساسيات هندسة التصنيع الزراعي

وهي تساوى كمية الحرارة المفقودة من المائع الساخن

$$dQ = -m_1 C_1 dt_1 \quad (9-47)$$

وتتساوى مع كمية الحرارة المكتسبة في المائع المراد تسخينه (بافتراض أنه لا يوجد فقد في انتقال الحرارة)

$$dQ = m_2 C_2 dt_2 \quad (9-48)$$

لاحظ الإشارة السالبة في المعادلة رقم (9-47) حيث تدل على الانخفاض في معدل انحدار درجة الحرارة Temperature gradient

حيث أن :

$$\begin{aligned} t_1 &= \text{درجة حرارة المائع الساخن عند المقطع التفاضلي} \\ t_2 &= \text{درجة حرارة المائع المراد تسخينه عند المقطع التفاضلي} \\ U &= \text{المعامل الكلى المكافئ لانتقال الحرارة التبادلي} \\ m_1 &= \text{معدل سريان مائع التسخين} \\ m_2 &= \text{معدل سريان المائع المراد تسخينه} \\ C_1 &= \text{الحرارة النوعية لمائع التسخين} \\ C_2 &= \text{الحرارة النوعية للمائع المراد تسخينه} \end{aligned}$$

فاذا ما أجرينا التفاضل للمعادلة (9-45) نحصل على

$$d(\Delta t) = -dt_1 - dt_2 \quad (9-49)$$

وبالتعويض بمعادلتى (9-47) ، (9-48) فى معادلة (9-49) نحصل على

الآتى:

$$d(\Delta t) = - \left(\frac{1}{m_1 C_1} + \frac{1}{m_2 C_2} \right) dQ = - a \cdot dQ \quad (9-50)$$

بين الفرق فى درجات الحرارة عند الدخول ودرجات (9-50) ويتكامل المعادلة الحرارة عند الخروج من المبادل الحرارى نحصل على :

$$\Delta t_i - \Delta t_e = a Q \quad (9-51)$$

وبالتعويض عن معادلة (9-46) فى معادلة (9-50) نحصل على :

$$\frac{d(\Delta t)}{\Delta t} = - a U dA \quad (9-52)$$

وبإجراء التكامل لطرفى المعادلة (9-52) على سطح التسخين التبادلى فإن

$$\ln \frac{\Delta t_e}{\Delta t_i} = - a U A \quad (9-53)$$

$$\begin{aligned} \text{or } \Delta t_e \\ = \Delta t_i e^{-a U A} \end{aligned} \quad (9-54)$$

وبالتعويض عن معادلة (9-51) فى معادلة (9-53) نحصل على :

$$Q = UA \frac{\Delta t_i - \Delta t_e}{\ln \frac{\Delta t_i}{\Delta t_e}} \quad (9-55)$$

or

$$Q = UA \Delta t_m \quad (9-56)$$

حيث الفرق المتوسط فى درجات الحرارة Δt_m يعبر عنه

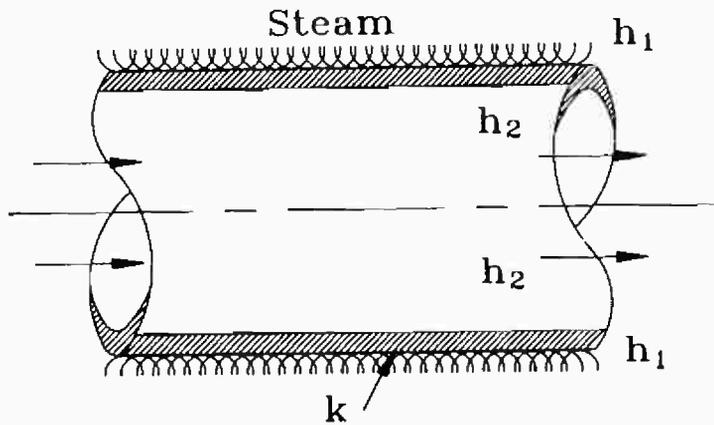
$$\Delta t_m = \frac{\Delta t_i - \Delta t_e}{\ln \frac{\Delta t_i}{\Delta t_e}} \quad (9-57)$$

ونلاحظ أن نفس الخطوات يتم إتباعها فى حالة المبادل الحرارى المتعاكس (العكسى) شكل (٩-١٠) وذلك بوضع:

$$a = \frac{1}{m_1 C_1} - \frac{1}{m_2 C_2} \quad (9-58)$$

تعبير عن المتوسط اللوغاريتمى للفرق فى درجات الحرارة (9-57) ومعادلة
وهو بطبيعة الحال مختلف عن المتوسط العددي أو الحسابي والذي يعبر عنه .

$$\Delta t_m = \frac{\Delta t_i + \Delta t_e}{2} \quad (9-59)$$



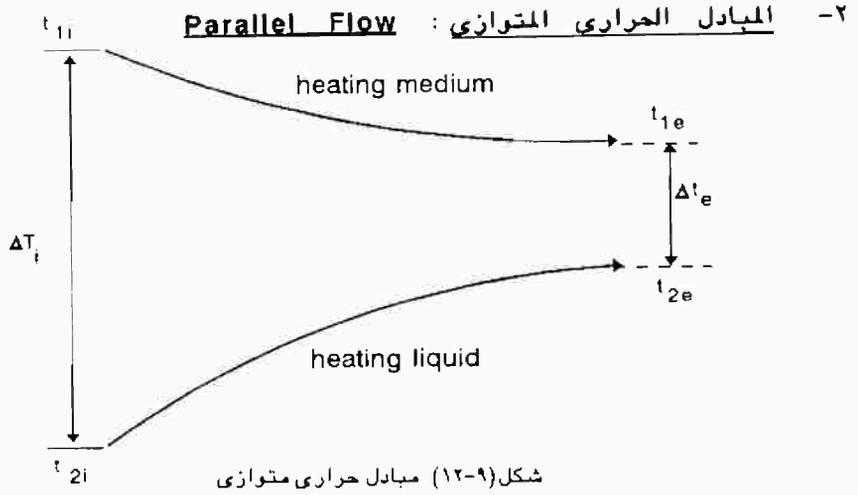
شكل رقم (٩-١١) انتقال الحرارة فى تكثيف البخار داخل اسطوانه

ويجب حساب المعامل الكلى المكافىء للتبادل الحرارى منسوبا الى مساحة
السطح المنتقله منه الحرارة الى السائل المراد تسخينه فمثلا اذا كان التسخين يتم
بواسطة تكثيف بخار على السطح الخارجى لانايبب المبادل الحرارى فان :

$$\frac{1}{UA_1} = \frac{1}{h_1 A_1} + \frac{1}{2\pi kL} \ln \frac{D_2}{D_1} + \frac{1}{h_2 A_2} \quad (9-60)$$

حيث ان :

- مساحة السطح الخارجى لانايبب المبادل الحرارى = A_1
- مساحة السطح الداخلى لانايبب المبادل الحرارى = A_2



وفى هذه الحالة يكون اتجاه مرور السائل فى نفس اتجاه مرور الوسيط الحرارى فترتفع درجة حرارة السائل تدريجيا بينما تنخفض درجة حرارة الوسيط الحرارى - وهذه الطريقة محدودة الاستعمال اذ ان فاعليتها ضعيفة نتيجة لعدم انتظام الفرق فى درجات الحرارة على طول مساحة سطح التبادل الحرارى .

وتتبع الخطوات الآتية لحساب المساحة اللازمة للتبادل الحرارى :

١ - تحسب درجات حرارة السائل والوسيط وذلك بعمل موازنة حرارية .
كمية الحرارة المنتقلة من الوسيط = كمية الحرارة المكتسبة بالسائل.

$$Q = m_1 C_{p1} (t_{1i} - t_{1e}) \quad (9-61)$$

$$= m_2 C_{p2} (t_{2e} - t_{2i}) \quad (9-62)$$

حيث ان :

m_1 = المعدل الوزنى لسريان الوسيط

m_2 = المعدل الوزنى لسريان السائل

t_{1i} = درجة حرارة دخول الوسيط المبادل الحرارى .

t_{1e} = درجة حرارة خروج الوسيط من المبادل الحرارى .

t_{2i} = درجة حرارة دخول السائل الى المبادل الحرارى .

t_{2e} = درجة حرارة خروج السائل من المبادل الحرارى .

. الحرارة النوعية للوسيط = C_{p1}

. الحرارة النوعية للسائل = C_{p2}

ب - بحسب الفرق المتوسط لدرجات حرارة المبادل فاذا كان :

$$\Delta t_i = t_{1i} - t_{2i}$$

$$\Delta t_e = t_{1e} - t_{2e}$$

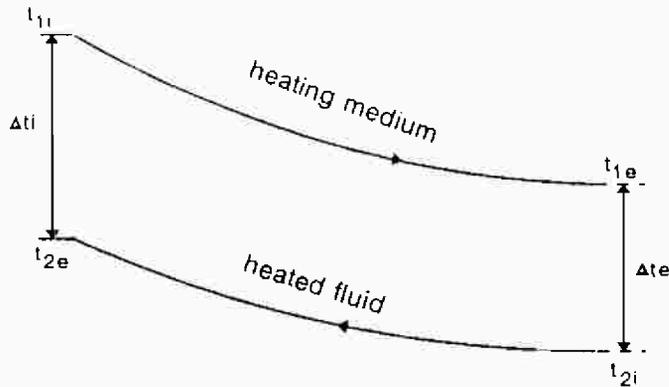
$$\Delta t_m = \frac{\Delta t_i - \Delta t_e}{\ln \frac{\Delta t_i}{\Delta t_e}} \quad (9-63)$$

ج- يوجد المعامل الكلي المكافئ للتبادل الحرارى "U" كما ذكر سابقا .

د- تحسب المساحة السطحية للتبادل الحرارى من المعادلة الآتية :

$$Q = UA \Delta t_m \quad (9-64)$$

٢- المبادل الحرارى العكسى او المتعكس : Counter Flow



شكل (٩-١٢) مبادل حرارى متعكس

وفى هذه الحالة يكون اتجاه مرور السائل فى عكس اتجاه مرور التسخين فى المبادل الحرارى ، فترتفع تدريجيا درجة حرارة السائل فى حين تنخفض تدريجيا درجة حرارة الوسيط تقريبا بنفس المقدار . وهذه الطريقة شائعة الاستعمال فى عمليات التصنيع اذ ان فاعليتها مرتفعة نظرا لان الفرق فى درجات الحرارة يكون تقريبا متساو على طول مساحة سطح التبادل الحرارى ويمكن بذلك استخدام مبادل عكسى بسطح تبادل حرارى اقل بكثير من مبادل متوازى لنفس كمية الحرارة المتبادله .

وتتبع نفس خطوات الحسابات التى ذكرت فى الطرق الاخرى مع اعتبار ان الفرق فى درجات حرارة الدخول والخروج من المبادل الحرارى تكون منسوبة لاتجاه سريان الوسيط التسخين . اى ان :

$$\Delta t_i = t_{1i} - t_{2e}$$

$$\Delta t_e = t_{1e} - t_{2i}$$

مثال : مبادل حرارى يستخدم لتبريد سائل بواسطة ماء بارد بالمواصفات الآتية :

درجة حرارة دخول السائل	93.7 °م
درجة حرارة دخول الماء	10 °م
درجة حرارة خروج الماء	27 °م
معدل سريان السائل المراد تبريده	450 كجم/ساعه
معدل سريان ماء التبريد	900 كجم/ساعه
الحراره النوعيه للسائل	2050 جول/جم °كلفن
الحراره النوعيه للماء	418 جول/جم °كلفن

احسب :

أ - درجة حرارة خروج السائل (t_{1e})

ب- المساحة السطحية لمواسير مرور السائل فى كل من الحالتين :
 ١- مبادل متوازى
 ٢- مبادل عكسى

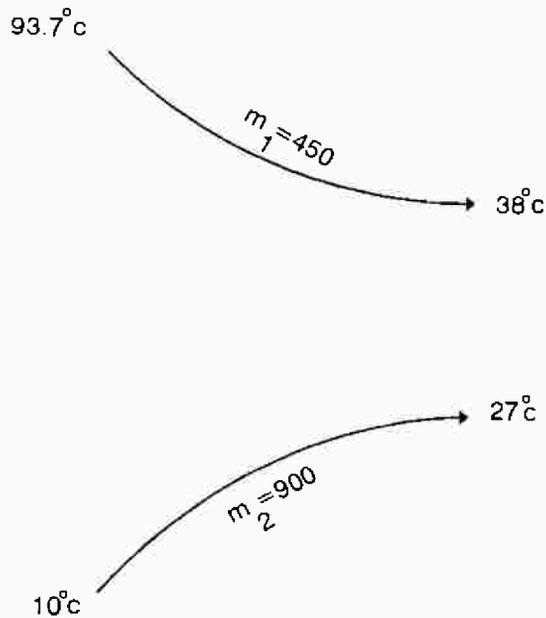
اعتبر أن المعامل الكلى المكافىء للتبادل الحرارى فى كلا الحالتين :

$$U = 1700 \text{ Watt/m}^2 \cdot \text{K}$$

الحل

$$\begin{aligned}
 Q &= m_1 C_{p1} (t_{1i} - t_{1e}) \\
 &= m_2 C_{p2} (t_{2e} - t_{2i}) \\
 \therefore Q &= (900) (4.18) (27 - 10) = 63954 \text{ kJ/hr.} \\
 &= (450) (2.55) (93.7 - t_{1e}) \\
 \therefore t_{1e} &= 38 \text{ } ^\circ\text{C}
 \end{aligned}$$

١- فى حالة مبادل متوازى :



$$\Delta t_i = 93.7 - 10 = 83.7 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\Delta t_e = 38 - 27 = 11 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\frac{\Delta t_i}{\Delta t_e} = 7.6 > 2$$

وحيث أن

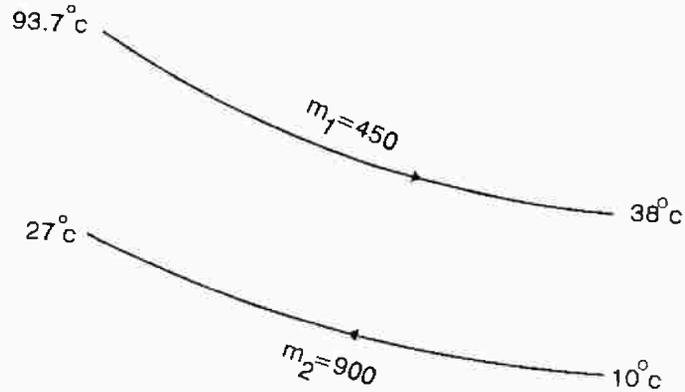
∴ نستخدم المتوسط اللوغاريتمي للفرق في درجات الحرارة

$$\begin{aligned} \therefore \Delta t_m &= \frac{\Delta t_i - \Delta t_e}{\ln \frac{\Delta t_i}{\Delta t_e}} \\ &= \frac{83.7 - 11}{\ln \frac{83.7}{11}} = \frac{72.7}{\ln 7.6} \\ &= \frac{72.7}{2.03} = 35.8 \text{ } ^\circ\text{C} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \therefore Q &= UA \Delta t_m \\ 63954 &= (A) (1700) (35.8) \end{aligned}$$

$$\therefore A = 1.05 \text{ m}^2$$

ب- في حالة مبادل عكسي :



$$\Delta t_i = 93.7 - 27 = 66.7 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\Delta t_e = 38 - 10 = 28 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\frac{\Delta t_i}{\Delta t_e} = 2.38 > 2$$

وحيث أن

∴ نستخدم المتوسط اللوغاريتمى للفرق فى درجات الحرارة

$$\begin{aligned}\therefore \Delta t_m &= \frac{66.7 - 28}{\ln \frac{66.7}{28}} \\ &= \frac{38.7}{\ln 2.38} = \frac{38.7}{0.87} \\ &= 44.5 \text{ } ^\circ\text{C} \\ \therefore Q &= UA \Delta t_m \\ 63954 &= (A) (1700) (44.5) \\ \therefore A &= 0.85 \text{ m}^2\end{aligned}$$

ويتلاحظ أن مساحة سطح المبادل العكسى أقل من مساحة سطح المبادل المتوازى تحت نفس ظروف الأداء .

انتقال الحرارة الغير مستقر UNSTEADY STATE HEAT TRANSFER

يحدث انتقال الحرارة الغير مستقر عندما تتعرض فجائيا حدود المجموعات لتغير في درجة حرارتها مع الزمن بمعنى ان درجة الحرارة على الحدود المذكورة لاتظل ثابتة عند درجة واحدة طوال فترة الانتقال الحرارى وانما تتغير من وقت الى آخر لمدة قد تطول حتى تصل الى الاستقرار الحرارى . ومن الامثلة الشائعة فى التصنيع الغذائى نذكر على سبيل المثال وليس الحصر : تبريد وتجميد اللحوم ، الاسماك وتبريد الفواكه والخضروات والمعامله الحراريه للمواد الغذائيه المعلبه ، وبسترة وتعقيم الالبان ومنتجاتها .

وهناك حالتان رئيسيتان قد امكن تحليلهما رياضيا وهما :

الحاله الاولى :-

١- عندما تكون المقاومه الحراريه للماده المنتقله منها او اليها صغيره جدا اى ان معامل انتقال الحرارة بالتوصيل للماده مرتفع نسبيا اذا ما قورن بالمقاومه الحراريه عند حدود المجموعه اى مع معامل انتقال الحرارة بالنقل على حدود المجموعه . مثال ذلك تسخين او تبريد مواد جيدة التوصيل الحرارى كالحديد والنحاس وما شابهها .

٢- عندما تكون الماده المنتقله اليها او منها الحرارة حجمها صغير نسبيا بحيث يمكن اهمال التغير فى درجة حرارتها من نقطة على سطحها مثلا مع نقطة فى منتصفها مثال ذلك عند معامله بذرة القطن حراريا لقتل حيوية الجنين .

فاذا اخذنا فى الاعتبار الميزان الحرارى لهذه المجموعه (قانون ثبوت الطاقه) نجد أن :

$$C_p \cdot \rho \cdot v \cdot dt = h \cdot A \cdot (t_0 - t) d\theta \quad (9-65)$$

or

$$\frac{dt}{t_0 - t} = \frac{h \cdot A}{C_p \cdot \rho \cdot v} d\theta \quad (9-66)$$

حيث ان:

$$\begin{aligned}
 v &= \text{حجم المادة} \\
 C_p &= \text{الحرارة النوعية للمادة} \\
 \rho &= \text{كثافة المادة} \\
 h &= \text{معامل انتقال الحرارة بالنقل على سطح المادة} \\
 t_0 &= \text{درجة حرارة الجو المحيط بالمادة} \\
 t &= \text{درجة حرارة المادة عند السطح (او عند المنتصف)} \\
 A &= \text{مساحة السطح.} \\
 \theta &= \text{الزمن} \\
 d &= \text{علامة التفاضل}
 \end{aligned}$$

ومع افتراض ان الخصائص الحرارية للمادة لا تتغير مع تغير درجة الحرارة وان درجة حرارة الجو المحيط بالمادة ثابتة لا تتغير ، فانه يمكننا اجراء التكامل اللازم للمعادلة رقم (9-66) لنحصل على :

$$\ln \left(\frac{t - t_0}{t_1 - t_0} \right) = - \frac{h.A}{C_p \cdot \rho \cdot v} \cdot \theta \quad (9-67)$$

حيث :

$$t_1 = \text{درجة حرارة المادة عند بدء التسخين أو التبريد}$$

$$\theta = \text{الزمن الذي تصل فيه درجة حرارة المادة إلى } t$$

ويمكننا استخدام هذه العلاقة عند استيفاء الشرطان السابق الاشارة اليهما او التحديد عندما تكون :

$$\left(\frac{h.L}{k} \right) \text{ أو } \left(\frac{h.r}{k} \right) < 0.2$$

مثال :

احسب درجة حرارة عمود من الصلب قطرة ٧سم وطوله ٢٠سم اذا وضع فجاءة في فرن درجة حرارته ثابتة عند ٢١٥°م بعد مضي ٤٠ دقيقة اذا كانت درجة حرارته الابتدائية ٢٠°م . علما بأن :

$$\text{معامل انتقال الحرارة بالنقل داخل الفرن} = ٧٥ \text{ كيلوكالوري/ساعة متر مربع } ^\circ\text{م}$$

$$\text{معامل انتقال الحرارة بالتوصيل للحديد الصلب} = ١١٥ \text{ كيلوكالوري/ساعة متر } ^\circ\text{م}$$

$$\begin{aligned} \text{الحرارة النوعية للصلب} &= ١٢ \text{ ر. كيلوكالوري/كجم.}^\circ\text{م} \\ \text{كثافة الصلب} &= ٧٢٠٠ \text{ كجم/متر مكعب} \end{aligned}$$

الحل

نقوم اولاً بحساب مقدار المقاومة الحرارية النوعية على السطح لمعرفة مدى امكاننا استخدام المعادله المذكورة .

$$\frac{hr}{k} = (7.5) \left(\frac{7.5}{2} \times \frac{1}{100} \right) \times \frac{1}{11.5} = 0.0245$$

كذلك نحسب

$$\frac{h.L}{k} = (7.5) \left(\frac{30}{100} \right) \times \frac{1}{11.5} = 0.196$$

وحيث انها اقل من ٢ ر. فانه يمكننا استخدام المعادله المذكوره .

$$\begin{aligned} \text{المساحة الاجماليه للسطح} &= \text{مساحة الاسطوانه} + \text{مساحة الطرفين} \\ &= 2\pi r^2 + 2\pi r L \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{or Area} &= 2\pi \left(\frac{7.5}{2 \times 100} \right)^2 + 2\pi \left(\frac{7.5}{2 \times 100} \right) \left(\frac{30}{100} \right) \\ &= 0.0088 + 0.0707 \\ &= 0.0795 \text{ m}^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Volume} &= \pi r^2 L \\ &= \pi \left(\frac{7.5}{200} \right)^2 \left(\frac{30}{100} \right) \\ &= 0.001325 \text{ m}^3 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \therefore \ln \left(\frac{t - 315}{20 - 315} \right) &= - \frac{7.5 \times 0.0795}{0.12 \times 7200 \times 0.001325} \times \frac{40}{60} \\ &= - 0.347 \end{aligned}$$

$$\text{or } t = 315 + 0.707 (20 - 315)$$

$$\therefore t = 106.4 \text{ }^\circ\text{C}$$

الحالة الثانية :

١- عندما تكون المقاومة الحرارية للمادة المنقله منها او اليها الحراره كبيرة نسبيا اذا ماقورنت بالمقاومه الحراريه عند حدود المجموعه اى انه يوجد تغيير سريع فى درجة حرارة سطح المادة وبالتالي لاتظل درجة حرارة سطح المادة ثابتة عند كل نقطة فيها .

٢- معامل انتقال الحرارة بالتوصيل للماده منخفض نسبيا مما يتسبب عنه تغير فى درجة حرارة المادة من نقطة الى نقطة داخل المادة نفسها .

وفى هذه الحالة فان المعادلة السابق ذكرها لاتنطبق ويجب الاخذ فى الاعتبار التغير فى درجة حرارة المادة فى الداخل وليس على السطح فقط . وتحليل هذه الظروف رياضيا خارج عن نطاقنا فى هذا المقرر ولو انه توجد خرائط مبسطه يمكن استخدامها مباشرة لحساب الوقت اللازم لتسخين او تبريد مادة ما تحت ظروف معلومه .

وقد وجد ان :

$$\text{Fourier Modulus} \left(\frac{k \theta}{C_p \cdot \rho \cdot r^2} \right) \text{ تعتمد على معامل فورير} \left(\frac{t - t_0}{t_1 - t_0} \right)$$

$$\text{ومعامل بايوت} \left(\frac{hr}{k} \right) \text{ ومعامل الحجم} \left(\frac{r}{r_0} \right)$$

وذلك اذا كانت المادة على شكل كروي او اسطوانى لانهاى ، اما اذا كانت على شكل مضلع لانهاى فيستبدل نصف القطر r بنصف طول الضلع x .

ملحوظه :

Thermal Diffusivity

عادة ما تستخدم معامل الانتشار الحرارى

فى حسابات انتقال الحرارة ومقداره :-

$$\text{معامل الانتشار الحرارى} = \frac{\text{معامل انتقال الحرارة بالتوصيل}}{\text{الحراره النوعيه} \times \text{الكثافه}}$$

$$\alpha = \frac{k}{C_p \cdot \rho} \quad (9-68)$$

وحداته قدم مربع/ساعه بالوحدات الانجليزيه او متر مربع/ساعه بالوحدات المترية .

مثال (١)

حائط سمكه ٦.٠ سم ، درجة حرارته الابتدائية ٢٠° م ، معرض من جانبيه لغازات ساخنه مندفعه عند درجة حرارة ٥٧٧° م . فاذا علمت ان :

معامل انتقال الحرارة بالنقل على سطح الحائط = ١٣ر٥ كيلو كالورى/ساعه متر^٢ م^٥
 معامل انتقال الحرارة بالتوصيل لمادة الحائط = ٤ كيلو كالورى/ساعه متر^٥ م^٥
 الكثافه النوعيه لمادة الحائط = ٢٥٩٠ كجم/متر^٣
 الحرارة النوعيه لمادة الحائط = ٠.٣ كيلوكالورى/كجم.م^٥

احسب درجة حرارة كل من منتصف الحائط وسطحه بعد مرور زمن مقداره ٨.٧٥ ساعه .

الحل

$$\frac{\alpha \theta}{x^2} = \text{رقم فورير}$$

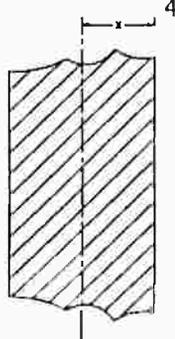
ونلاحظ هنا ان قيمة x تساوى نصف سمك الحائط تساوى ٣.٠ سم

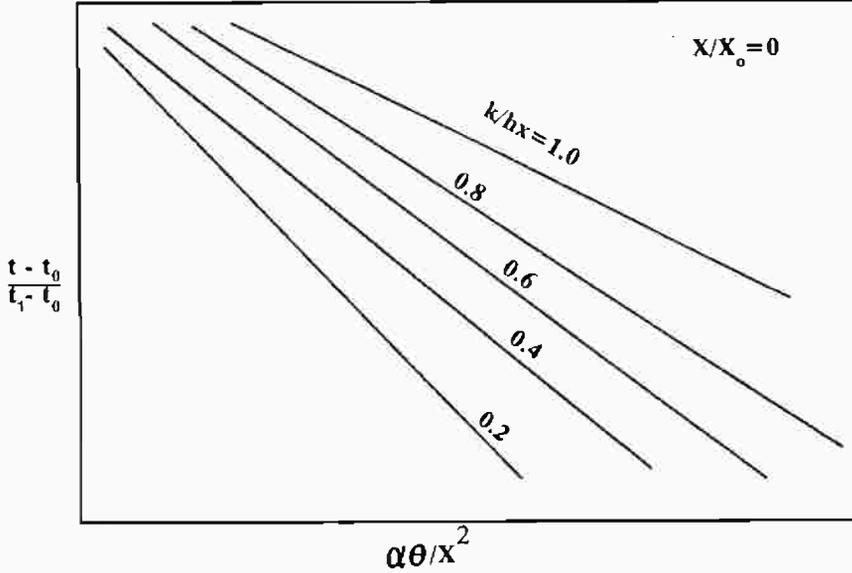
$$\alpha = \frac{k}{C_p \cdot \rho}$$

$$\alpha = \frac{4}{(0.3)(2590)} = 0.00515 \text{ m}^2/\text{hr.}$$

$$\text{Fourier number} = \frac{(0.00515)(8.75)}{(0.3)^2} = 0.5$$

$$\text{Biot number} = \frac{13.5 \times 0.30}{4} = 1.01$$





شكل (٩-١٤) خريطة التبادل الحرارى خلال منتصف حائط

نستخدم خرائط الانتقال الحرارى الغير مستقر فى حائط لانهاىي ونلاحظ ان المحور الافقى يمثل قيم مختلفه لرقم فورير والمحور الرأسى يمثل النسبه بين الفرق بين درجات حرارة الحائط والجو المحيط به الى الفرق بين درجات حرارة الحائط الابتدائيه والجو المحيط به اى ان المحور الرأسى يعبر عن :

$$\frac{t - t_0}{t_1 - t_0}$$

كما نلاحظ ان الخريطة الاولى تستخدم لايجاد درجة حرارة منتصف الحائط ، والخريطة السادسة تستخدم لايجاد درجة حرارة سطح الحائط اى ان معامل الحجم $\frac{x}{x_0}$ فى الخريطة الاولى يساوى صفر . وفى السادسة يساوى واحد .

والمحنيات المختلفه الموجوده فى هذه الخرائط هى لقيم مختلفه من مقلوب رقم بايوت اى للمقدار :

$$\frac{k}{h x}$$

انتقال الحرارة

باستخدام الخريطة الاولى (منتصف الحائط) : تقاطع الخط الرأسى من رقم فورير ٥٠ مع المنحنى ذو مقلوب رقم بايوت ١ ، يقابله معامل درجة الحرارة .

$$\frac{t - t_0}{t_1 - t_0} = 0.8$$

$$t - 577 = (0.8) (20 - 577)$$

$$t = 577 - 445.6 \quad \text{وعلى ذلك تكون}$$

$$= 131.4 \text{ } ^\circ\text{C}$$

وهى درجة حرارة منتصف الحائط (t)

ومن الخريطة السادسة (معامل الحجم = ١) نتبع نفس الخطوات السابقه لنجد ان :

$$\frac{t - t_0}{t_1 - t_0} = 0.42$$

$$t - 577 = (0.42) (20 - 577)$$

$$t = 577 - 233.9 = 343.1 \text{ } ^\circ\text{C}$$

وهى درجة حرارة سطح الحائط

مثال (٢) :

من المشاكل الشائعة فى انتاج الحمضيات (الموالح) بالمناطق الباردة وصول درجات حرارة منتصف الثمار الى اقل من درجات التجمد خصوصا فى الليالى القارصه البرودة حيث تفقد الثمار كميات من الحرارة بالحمل والاشعاع من سطح الثمار وبالتوصيل من داخل الثمار الى الجو المحيط بها . ولمعالجة هذه المشكله توضع موافد او مشاعل اسفل الاشجار بغرض رفع درجة حرارة الجو الى الحد الذى يسمح بعدم حدوث تجمد داخل الثمار . وعلى ذلك فانه من المطلوب حساب درجات الحرارة داخل الثمار وخارجها حتى يمكن معرفة الحرارة الكلية وطريقة توزيعها فى بساتين الحمضيات للتغلب على هذه المشكله .

لذلك يراد تقدير درجة حرارة منتصف ثمار البرتقال اذا كان قطر الثمره

١٠سم ودرجة الحرارة الابتدائيه ١٨^oم ودرجة حرارة الجو المحيط -٤^oم وتعرضت هذه الثمار لها مدة ٢٥^oساعه مع اعتبار الخصائص الآتية :

معامل انتقال الحرارة بالنقل على سطح الثمار = ٢ كيلو كالورى/ساعة متر^٢ م°
 معامل انتقال الحرارة بالتوصيل لداخل الثمار = ١٥ . كيلو كالورى/ساعة متر^٥ م°
 معامل الانتشار الحرارى لداخل الثمار = ٤٧٥ × ١٠^{-٤} متر^٢/ساعة

الحل

$$\text{Fourier number} = \frac{(0.000475) (5.25)}{(0.05)^2} = 0.9975$$

$$\text{Biot number} = \frac{(3) \left(\frac{10}{2 \times 100}\right)}{(0.15)} = 1.0$$

ومن خرائط الانتقال الحرارى الغير مستقر للاشكال الكرويه ، تستخدم

الخريطة الاولى $\left(\frac{r}{r_0}\right) = 0$ منتصف الثمره .

$$\frac{t - t_0}{t_1 - t_0} = 0.1$$

$$\therefore t - (-4) = (0.1) [18 - (-4)]$$

$$\therefore t = 2.2 - 4 = -1.8^{\circ}\text{C}$$

درجة حرارة منتصف الثمار بعد خمسة ساعات وربع = -١.٨ م°

مثال (٣) :

قطعة من اللانشون على شكل اسطوانة طولها ٦.٠سم وقطرها ١.٠سم .
 وضعت فى فرن درجة حرارته ١١٥ م° بفرض معاملتها حراريا لمدة ٤ ساعات .
 احسب درجة حرارة المنتصف (المركز) اذا علمت ان :

معامل انتقال الحرارة بالنقل لجو الفرن = ٢٠٠ كيلو كالورى/ساعة متر^٢ م°

معامل انتقال الحرارة بالتوصيل للانشون = ١٣ . كيلو كالورى/ساعة متر^٥ م°

كثافة اللانشون النوعيه = ١.٧ كجم/م^٣

الحراره النوعيه للانشون = ٠.٨ . كيلو كالورى/كجم. م°

درجة حرارة اللانشون الابتدائيه = ٢٠ م°

الحل

نفرض ان انتقال الحرارة داخل اللانشون يكون قطري وليس فى اتجاه المحور على اساس ان طولها كبير ويمكن اعتباره لانهاى بالنسبه للقطر .

نستخدم خرائط انتقال الحرارة فى اسطوانه لانهاية الطول لايجاد درجة

$$\left(\frac{r}{r_0}\right) = 0 \quad \text{حيث اننا نستخدم الخريطة الاولى حيث}$$

$$\text{Fourier number} = \frac{k \theta}{C_p \cdot \rho \cdot r^2}$$

$$= \frac{(0.13) (4)}{\left(\frac{5}{100}\right)^2 (1070) (0.8)} = 0.243$$

$$\text{Biot number} = \frac{h r}{k}$$

$$= \frac{(300) \left(\frac{5}{100}\right)}{(0.13)} = 115.4$$

$$\therefore \text{Reciprocal or inverse Biot Number} = 0.0087$$

ومن الخريطة الاولى نجد ان :

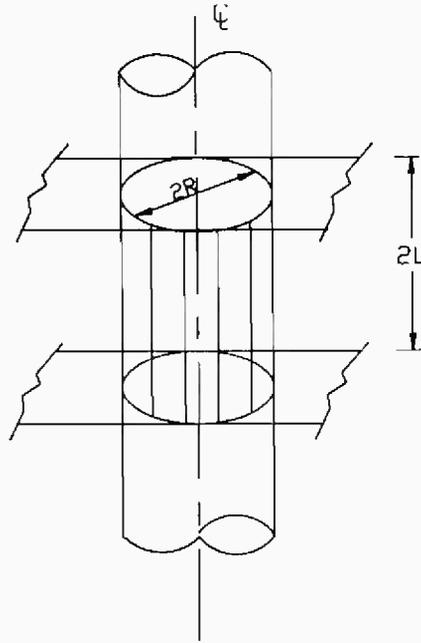
$$\frac{t - t_0}{t_1 - t_0} = 0.35$$

$$\therefore (t - 115) = (0.35) (20 - 115)$$

$$\therefore t - 115 = - 33.25$$

$$t = 81.75 \text{ } ^\circ\text{C}$$

∴ درجة حرارة المنتصف (t)



شكل (٩-١٥) الانتقال الحراري في اسطوانه محددة الطول

نلاحظ من الامثله السابقه اننا نعتبر اتجاه واحد لانتقال الحرارة سواء في اتجاه القطر (قطريا) او في اتجاه المحور (محوريا) وذلك باننا نهمل الاتجاهات الاخرى على اساس ان طول الاسطوانه كبير بالنسبه لقطرها او ان طول الحائط في الاتجاهين الاخرين كبير بالنسبه لسماك الحائط . ولكن عادة مانقابل من الناحية العملية ان انتقال الحرارة يكون في اكثر من اتجاه مثال ذلك عندما نعقم المعلبات الغذائيه باشكالها المختلفه سواء على شكل اسطوانى او على شكل متوازى اضلاع شكل (٩-١٥) حيث ان اطوال المعلبات في الاتجاهات (الاحداثيات) المختلفه تكون متقاربه وعلى ذلك لايمكننا اهمال الانتقال الحرارى فيها ويمكن ايجاد الحلول الرياضيه لهذه الحالات ولكن من الوجهه العملية فاننا نعتبر ان الشكل الموجود مكون من عدة مستويات متقاطعه مع بعضها لتشكله . ونقوم بحساب قيمة معامل درجة الحرارة .

$$\frac{t - t_0}{t_1 - t_0}$$

لكل اتجاه على حده ويكون الحل النهائي هو حاصل ضرب المعاملات مع بعضها .
فمثلا تعتبر المعلبات الاسطوانية على انها اسطوانة لانهاية متقاطعه مع مستويين
البعد بينهما هو ارتفاع او طول العلبة .

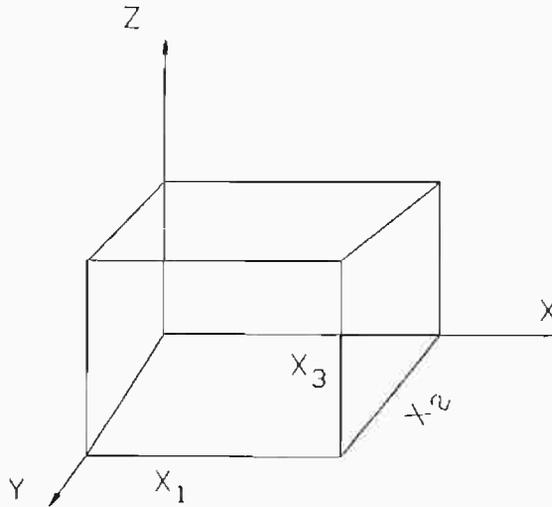
وتحسب درجة الحرارة من المعادلة الآتية :

$$\left(\frac{t - t_0}{t_1 - t_0} \right) = \left(\frac{t - t_0}{t_1 - t_0} \right) \times \left(\frac{t - t_0}{t_1 - t_0} \right) \quad (9-69)$$

Cylinder

Infinite Cylinder

Infinite Slab



شكل (٩-١٦) الانتقال الحراري في جسم ثلاثي الأبعاد

وبنفس الطريقة يمكن تقدير درجة حرارة معلب على شكل متوازي اضلاع
باعتبار انه تقاطع ستة مستويات تبعد عن بعضها باطوال المضع في الاتجاهات
الثلاثة .

وتحسب درجة الحرارة من المعادلة الآتية :

$$\left(\frac{t - t_0}{t_1 - t_0} \right) = \left(\frac{t - t_0}{t_1 - t_0} \right) \times \left(\frac{t - t_0}{t_1 - t_0} \right) \times \left(\frac{t - t_0}{t_1 - t_0} \right) \quad (9-70)$$

مضلع

Slab 1

Slab 2

Slab 3

مثال (١) :

عبئت مادة غذائية ذات محتوى رطوبى مرتفع فى علب رقم ٢ (القطر الصافى ٨ر٤ سم والارتفاع الصافى ١٠ر٦ سم) وكانت المادة الغذائية تملأ العلب تماما وكشافتها ١٠٩٠ كجم/متر^٣ ودرجة حرارتها الابتدائية ٨٢° م . وضعت المعلبات فى معقم يستخدم بخار درجة حرارته ١١٥° م لمدة ثلاثة ساعات وذلك بفرض معاملة المعلبات حراريا - احسب درجة حرارة منتصف الغذاء المعبأ اذا علمت ان :

الحرارة النوعية للمادة الغذائية المعبأ = ٠.٨٤ . كيلوكالورى/كجم.°م
معامل انتقال الحرارة بالنقل للبخار = ١٥٠٠ كيلوكالورى/ساعة.متر^٢ .°م
معامل انتقال الحرارة بالتوصيل للمادة الغذائية = ٠.١١٤ . كيلوكالورى/ساعة.متر^٥

الحل

معامل الانتشار الحرارى (α) Thermal diffusivity,

$$\alpha = \frac{k}{C_p \cdot \rho} = \frac{(0.114)}{(0.84) (1090)}$$

$$= .000125 \quad m^2/hr.$$

$$\text{Radius of can} = \frac{8.4}{200} = 0.042 \text{ m} \quad \text{نصف قطر العلبه (الاسطوانه)}$$

$$\text{Half height can} = \frac{10.6}{200} = 0.053 \quad \text{نصف ارتفاع العلبه}$$

وبعد ذلك يتم الحل على مرحلتين :

الاولى باعتبار ان الاسطوانه ذات طول لانهاى والمرجله الثانىه تعتبر ان الطول محدد ويكون اتجاه انتقال الحرارة فى اتجاه المحاور الرئيسيه . ويتم الحصول على درجة الحرارة فى الموقع المطلوب معرفتها عنده وذلك بضرب قيمة كل حالة فى الأخرى وبالتالى يتم تحديد الوضع على طبيعته كمجسم وذلك كما يأتى :

أ- اسطوانة لانهاية :

$$\text{Inverse Biot number} = \left(\frac{k}{h r_o} \right)$$

$$\frac{(0.114)}{(1500) (0.042)} = 0.00181 \approx \text{Zero}$$

$$\text{Fourier number} = \frac{\alpha \theta}{r_o^2}$$

$$= \frac{(0.000125)(3)}{(0.042)^2} = 0.213$$

ومن خريطة إنتقال الحرارة الغير مستقر لمنتصف اسطوانة لانهاية أى أن :

نجد أن:

$$\left(\frac{r}{r_o} \right) = 0$$

$$\left(\frac{t - t_o}{t_1 - t_o} \right) = 0.4$$

Infinite Cylinder

ب- حائط لانهاية :

$$\text{Reciprocal Biot number} = \left(\frac{k}{h x_o} \right)$$

$$= \frac{(0.114)}{(1500) (0.053)} = 0.00143 \approx \text{Zero}$$

$$\text{Fourier number} = \frac{\alpha \theta}{x_o^2}$$

$$= \frac{(0.000125)(3)}{(0.053)^2} = 0.133$$

ومن خريطة إنتقال الحرارة الغير مستقر لمنتصف الحائط اللانهاية أى أن :

نجد أن :

$$\left(\frac{x}{x_0}\right) = 0$$

$$\therefore \left(\frac{t - t_0}{t_1 - t_0}\right) = 0.82$$

Infinite Slab

وعلى ذلك يمكن حساب درجة حرارة منتصف المعبأ الغذائي من حاصل ضرب النتيجتين في كل من (أ) ، (ب) .

$$\therefore \left(\frac{t - t_0}{t_1 - t_0}\right) = (0.4) (0.82) = 0.328$$

Can

$$\therefore \left(\frac{t - 115}{82 - 115}\right) = 0.328$$

$$t - 115 = (-33) (0.328)$$

$$\therefore t = 104.18 \text{ } ^\circ\text{C}$$

مثال (٢) :

إذا استبدلت العبوة الاسطوانية الشكل في المثال رقم (١) بأخرى على شكل متوازي أضلاع بالمقاسات الآتية ٧٢ × ٨٦ × ٢٥ سم إحسب درجة حرارة المنتصف تحت نفس الظروف السابقة .

الحل

$$\text{Half-length of can in the first direction} = \frac{7.3}{200} = 0.0365 \text{ m}$$

$$\text{Half-length of can in the second direction} = \frac{806}{200} = 0.043 \text{ m}$$

$$\text{Half-length of can in the third direction} = \frac{15.25}{200} = 0.762 \text{ m}$$

أ- الاتجاه الأول: (First direction)

$$\text{Reciprocal Biot number} = \frac{(0.114)}{(1500)(0.0365)} = 0.00208$$

= Zero

$$\text{Fourier number} = \frac{(0.000125)(3)}{(0.0365)^2} = 0.2815$$

$$\therefore \left(\frac{t - t_0}{t_1 - t_0} \right)_{x_1} = 0.6$$

ب- الاتجاه الثاني: (Second direction)

Reciprocal Biot number =

$$= \frac{(0.114)}{(1500)(0.0430)} = 0.00177 = \text{Zero}$$

$$\text{Fourier number} = \frac{(0.000125)(3)}{(0.043)^2} = 0.2$$

$$\therefore \left(\frac{t - t_0}{t_1 - t_0} \right)_{x_2} = 0.72$$

ج- الاتجاه الثالث : (Third direction)

$$\text{Reciprocal of Biot number} = \frac{(0.114)}{(1500)(0.0762)} = 0.001 \sim \text{Zero}$$

$$\text{Fourier number} = \frac{(0.000125)(3)}{(0.0762)^2} = 0.065$$

$$\therefore \left(\frac{t - t_0}{t_1 - t_0} \right)_{x_3} = 0.96$$

وعلى ذلك يمكن تحديد درجة حرارة منتصف المقلب الغذائي من حاصل ضرب النتائج في كل من أ ، ب ، ج .

$$\therefore \left(\frac{t - t_0}{t_1 - t_0} \right)_{\text{Can}} = (0.6)(0.72)(0.96) = 0.415$$

$$\therefore \left(\frac{t - 115}{82 - 115} \right) = 0.415$$

$$\therefore t = 115 - 13.7$$

$$\therefore t = 101.3 \text{ } ^\circ\text{C}$$

مسائل عامه

١- خزان من الحديد يحتوى على ٧ متر مكعب من الهواء الجاف عند ضغط مانومتري ٢٧٥ كيلو باسكال ودرجة حرارة ٢٠° م . أوجد وزن الهواء الموجود فى الخزان . ماهو وزن النيتروجين اللازم اضافته الى هذا الخزان لرفع ضغط المخلوط الى ٤١٢ كيلو باسكال .

٢- ١ متر مكعب من الهيدروجين ضغطت تحت ضغط ثابت مقداره ٢٧٥ كيلو باسكال الى ان اصبح الحجم ٤ر . متر مكعب . اوجد الشغل اللازم لضغط هذا الغاز .

٢- ٢ر . متر مكعب من الهواء عند ضغط ١.٢٤ كيلو باسكال تمدد داخل اسطوانه الى ان اصبح الحجم ١ متر مكعب اذا كان منحنى التمدد يتبع القانون $p.v^{1.4}=c$ اوجد الضغط النهائى للهواء .

٤- كمية من الهواء حجمها ٦ر . متر مكعب وعند ضغط مطلق مقداره ٦٨٩ كيلو باسكال ، تمددت هذه الكمية داخل اسطوانه الى ضغط مطلق مقداره ١.٢ كيلو باسكال . اوجد الشغل الناتج عن تمدد الهواء اذا كان منحنى التمدد يتبع :

أ - اجراء ايزوسيرمالي . ب- اجراء ادياباتيكى $p.v^{1.4}=c$

٥- ماهى كمية الحرارة اللازمه لتسخين ١ر٨ كيلو جرام من الهواء من درجة حرارة ١٠° م الى ١٥° م اذا كانت الحرارة النوعيه للهواء تحت حجم ثابت = ١٧٢ر . كيلو كالورى/كجم.° م والحرارة النوعيه للهواء تحت ضغط ثابت تساوى ٢٢ر . كيلو كالورى/كجم.° م اذا كانت عملية التسخين تتم :
أ - تحت حجم ثابت ب- تحت ضغط ثابت

٦- ١ر٨ كيلوجرام من الهواء عند ضغط مطلق مقداره ٦٨٩ كيلو باسكال تشغل حجم مقداره ٢ر . متر مكعب . تمددت هذه الكمية الى حجم مقداره ٤ر٤ متر مكعب . اوجد درجة حرارة الهواء النهائيه ، الشغل الناتج عن تمدد الهواء ، الحرارة التى امتصت او طردت من هذا الهواء اذا تمدد الهواء :
أ - تحت ضغط ثابت.

ب- اجراء ايزوسيرمالي (درجة حرارة ثابتة).

ج- اجراء ادياباتيكى . (بدون فقد او اكتساب للحرارة)

علما بان : $R = 289 \text{ N.m/kg.K}$ ، $C_p = 0.24$ ، $C_v = 0.17$

٧- ١ متر مكعب من الهواء تحت ضغط مانومتري ١٢ر٢ ميجاباسكال ودرجة حراره 15°م تعدد الى ٢٥ر٠ متر مكعب بدون امتصاص او فقد اى كمية من الحراره اى ان الاجراء ادياباتيكى ($\gamma = 1.4$). اوجد وزن الهواء والضغط ودرجة الحراره بعد التمدد ما مقدار الشغل الناتج عن هذا التمدد ؟

٨- اسطوانه من الحديد الصلب مساحه قاعدتها ٠.٦ر٠ متر مربع وارتفاعها ٤٥ سم بها كمية من الهواء تحت ضغط مانومتري مقداره ٦٨٩ كيلو باسكال وفى درجة حراره 15°م اذا كان الثابت النوعى للهواء ٢٨٩ نيوتن .متر/كجم . 0°م احسب كمية الهواء الموجوده داخل الاسطوانه .

٩- ٢ر٠ متر مكعب من الهواء تحت ضغط مطلق مقداره ٢٧٥ كيلو باسكال تمددت الى ٧ر٠ متر مكعب اوجد الشغل الناتج عن هذا التمدد فى كل من الحالات الآتية :-
 أ - تحت ضغط ثابت .
 ب- تحت درجة حراره ثابتة (ايروسيرمالى) .
 ج- ادياباتيكى .

١٠- ضاغط هواء ذو وجه واحد واسطوانه واحده قطرها ٢٢سم وطول مشوار الضاغط ٢٢سم ويدخل الهواء الاسطوانه عند ضغط ١.٢ كيلو باسكال ودرجة حراره 15°م ثم يضغط ادياباتيكاً الى ٦٢. كيلو باسكال . اوجد القدره الحصانيه النظرية اللازمه لاداره هذا الضاغط اذا كانت عدد لفات عمود الاداره ١٠٠ لفة/دقيقه وكذلك احسب كمية الهواء المضغوط فى الدقيقه .

١١- احسب التغيير فى الطاقه الكامنه ره . كجم من الهواء عند درجة حراره 1°م اذا ضغط الهواء الى $\frac{1}{10}$ حجمه الاصلى وكانت عملية الضغط تتبع القانون $pV^{1.3} = C$
 علما بان :

$C_p = 0.24$, $C_v = 0.17$ ، مامقدار الحراره التى تبادلتها جدران الاسطوانه مع الهواء الجوى .

١٢- ١ر٠ متر مكعب من الهواء تحت ضغط مطلق ١٤ر٢ ميجاباسكال ودرجة حراره 15°م تعدد تحت ضغط ثابت الى ٢٥ر٠ متر مكعب . اوجد درجة الحراره فى نهاية عملية الضغط وكذلك مقدار الشغل الناتج عن تمدد الهواء ومقدار التغيير فى الطاقه الكامنه علما بان :

$$R = 289 \text{ N.m/kg.}^\circ\text{C} \quad , \quad C_p = 24 \text{ , } C_v = 17 \text{ ,}$$

١٢- غاز ما يتبع القانون الآتي :

$$p.v. = 100 \text{ T}$$

ومقدار $C_p = 17$ ، فاذا تمدد كيلوجرام واحد من هذا الغاز الموجود تحت ضغط مطلق ٤١٣ كيلوباسكال من حجم ١٤ . متر مكعب الى ٩ . متر مكعب ، وكان قانون منحنى التمدد $p.v^{1.31} = C$. اوجد كمية الحرارة التي تبادلتها الاسطوانة المحتوية على هذا الغاز .

١٤- ضاغط هواء ذو وجه واحد واسطوانة واحدة قطرها ٧سم وطول مشوار الضاغط ١٥سم ، يدخل الهواء اسطوانة الضاغط عند ضغط مطلق ١.٢ كيلوباسكال ودرجة حرارة ١٥°م ويخرج الهواء المضغوط عند ضغط مطلق مقداره ١٤ ميغاباسكال اذا كانت سرعة دوران عمود الاداره ١٥٠٠ لفة/دقيقه . اوجد القدرة الحصانية النظرية اللازمه لادارة الضاغط اعتبر ان عملية الضغط ادياباتيكية ومقدار $\gamma = 1.4$.

١٥- محطة خدمة عامه تستخدم هواء مضغوط عند ضغط مطلق ٨٢٧ كيلوباسكال ومقدار استخدام الهواء المضغوط ٢٨ متر مكعب/ساعه عند درجة حرارة ١°م . اذا استخدم ضاغط هواء ذو اسطوانة واحدة لتغذية المحطه بالهواء المضغوط ويدخل الهواء الى الضاغط عند ضغط مطلق مقداره ١.٢ كيلوباسكال وكانت عملية الضغط ادياباتيكية ($\gamma = 1.4$) مامقدار اقل قدرة حصانية تلزم لادارة هذا الضاغط ؟ .

١٦- هواء عند ضغط مطلق مقداره ١.٢ كيلوباسكال ودرجة حرارة ١°م يراد ضغطه الي ١.٢٤ كيلوباسكال بواسطة ضاغط هواء ترددي ذو اسطوانة واحده وكانت عملية الضغط تتبع القانون $p.v^{1.2} = C$ ، $C_p = 24$ ، $C_v = 17$. $\gamma = 1.4$ احسب :

- ١- الشغل اللازم لادارة الضاغط لكل كجم واحد من الهواء .
- ٢- كمية الحرارة التي اكتسبتها مياه التبريد لكل ١ كجم من الهواء .
- ٢- اذا استخدم رذاذ ماء داخل اسطوانة الضاغط لتبريد الهواء اثناء عملية الانضغاط حتى تكون درجة حرارته ثابتة عند درجة دخول الهواء الي الضاغط ماذا تكون كمية الشغل المتوفرة من هذه العملية ؟

- ٤- اذا أدير هذا الضاغط بواسطة سير على طاره موصله الى محرك كهربائى يدور عند ٤٠٠ لفة/دقيقه مامقدار قدرة المحرك اللازم اذا كانت كفاءة الضاغط ٩٠٪ وكفاءة توصيل الحركة من المحرك الى الضاغط ٩٥٪ .
- ١٧- كم تكلف عملية تسخين ٤٥٠٠ كجم من محلول ما محتواه الرطوبى ٨٥٪ من درجة حرارة ٢١°م الى درجة حرارة ٧١°م اذا كانت عملية التسخين تتم ببخار على ضغط ٦٥ كجم/سم^٢ وجفافه ٩٠٪ بينما يخرج البخار المكثف على درجة حرارة ٧٧°م وثمان كجم الوقود ٦٠ قرشا وقيمته الحراريه ١٠٠٠٠ كيلوكالورى/كجم وقود ، وكفاءة جهاز التسخين ٨٨٪ وكفاءة الغلايه ٨٤٪ .
- ١٨- ماهى كمية الحرارة اللازمه لتحويل كيلوجرام واحد من الماء عند درجة حرارة ١٠°م الى بخار جاف ومشبع تحت الضغط الجوى العادى ، علما بان الحرارة النوعيه للماء = ١ .
- ١٩- ما هى كمية اللبن التى يمكن تسخينها بواسطة ٤ كجم بخار جاف ومشبع تحت الضغط الجوى العادى من درجة ١٨°م الى ٦٣°م علما بان الحرارة النوعيه للبن تساوى ٩ و يخرج البخار المكثف عند درجة حرارة ٢٦°م .
- ٢٠- ماهى كمية الحرارة الكليه الموجوده فى ١٠ كجم بخار ، اذا علمت ان نسبة جفافه ٩٠٪ وضغطه ٢٨ كجم/سم^٢ .
- ٢١- ماهى كمية البخار اللازم لتسخين ١٨٠٠ كجم من محلول ملهى حرارته النوعيه ٨٨ر من درجة ١٩°م الى ٥٤°م ، علما بان البخار المستخدم ضغطه واحد كجم/سم^٢ ونسبة جفافه ٩٦٪ وكفاءة جهاز التسخين ٨٠٪ ويخرج البخار المتكثف عند درجة حرارة ٦٣°م .
- ٢٢- ماهى كمية الزيت التى يمكن تسخينها من ٢٥°م الى ١١٠°م بواسطة ١٠٠ كجم من البخار الذى ضغطه ٧ كجم/سم^٢ وجفافه ٧٥٪ اذا كانت حرارة الزيت النوعيه ٧٠ . وكفاءة جهاز التسخين ٨٠٪ وحرارة الماء المتكثف ٥٤°م .

٢٣- ماهى كمية الوقود وتكاليفه اللازمه لعملية بسترة ٧٥٢٠ كجم من اللبن على درجة ٦٥°م بواسطة بخار ضغطه ٢ر٤ كجم/سم^٢ وجفافه ٩٥٪ اذا علمت ان حرارته النوعيه ٩ر وان كفاءة جهاز البسترة ٧٢٪ ويخرج الماء المكثف عند درجة حرارة ٦٤°م وان الفلايه كفاءتها ٧٠٪ وتعمل بوقود قيمته الحراريه ١٠٠٠٠ كيلوكالورى/كجم وثمان الكيلو جرام الواحد منه ٦٠ قرشا وان حرارة اللبن قبل البسترة تعادل حرارة الجو اى حوالى ٢٦°م.

٢٤- باستخدام جداول البخار اوجد كمية الحرارة اللازمه لتحميص واحد كجم من البخار الجاف عند ضغط مطلق مقداره ٧ كجم/سم^٢ الى درجة حرارة ٣٠٠°م. احسب الحرارة النوعيه للبخار المحمص.

٢٥- احسب الحرارة الكليه لبخار محمص عند ضغط مطلق ١٤ كجم/سم^٢ ودرجة حرارة ٢٢٢°م اعتبر ان الحرارة النوعيه للبخار المحمص = ٥٥ر. قارن النتيجة باستخدام جداول البخار .

٢٦- احسب الحرارة اللازمه لتحويل ٢ كجم من بخار رطب عند ضغط ٢ر٥ كجم/سم^٢ ونسبة جفافه ٨٠٪ الى بخار محمص درجة حرارته ٢٠٠°م.

٢٧- احسب وزن بخار رطب حجمه ١ر٠٠ متر مكعب عند ضغط مطلق ٨ر٠ كجم/سم^٢ وجودته ٧٠٪. ماهى الحرارة الكليه لمتر مكعب واحد من هذا البخار بوحدات كيلوكالورى/سم^٢.

٢٨- احسب القيمه التقريبيه لحجم واحد كجم من بخار محمص عند ضغط مطلق ٢١ كجم/سم^٢ ودرجة حرارة ٢٦٠°م.

٢٩- احسب حجم واحد كجم من بخار محمص عند ضغط مطلق مقداره ١٠ كجم/سم^٢ ودرجة حرارة ٢٨٠°م مستخدما :
أ - القانون العام للغازات .
ب- قانون كاندنر .

٣٠- اوجد الطاقة الكامنه لكجم واحد من بخار محمص عند ضغط مطلق مقداره ١٠ كجم/سم^٢ ودرجة حرارة ٢٨٠ م^٥ . اذا تمدد هذا البخار الى بخار رطب عند ضغط مطلق ١ كجم/سم^٢ ونسبة جفافه ٩٠% ، اوجد التغير فى الطاقة الكامنه لهذا البخار .

٣١- سخن مخلوط من الماء والهواء فى اناء مغلق ، عند وقت معين كان الضغط المطلق للمخلوط ٤٣٩ كجم/سم^٢ ودرجة الحرارة ١٤٠ م^٥ اوجد:
 أ - وزن الهواء الموجود مع كل كجم بخار .
 ب- الضغط فى الاناء المغلق عندما تصل درجة حرارة المخلوط ١٩٠ م^٥ علما باناه مازال يوجد بعض الماء فى الاناء .

٣٢- حجم غلاية تجارب صغيرة ١٧ م^٣ تحتوى على ٥٠ كجم من الماء عند ضغط مطلق ١.٢ كيلوباسكال ودرجة حرارة ١٥ م^٥ ويشغل الهواء باقى حجم الغلاية . وعند تشغيل الغلاية وصلت درجة حرارة المخلوط ١٤٠ م^٥ وكان لايزال محبوس البخار العمومى مغلق تماما . احسب الضغط الموجود فى الغلاية عند هذه الدرجة .

٣٣- يتم الحصول على البيانات التالىة للزوجہ الظاهريہ لعصير الخوخ المصفى عند ٢٠ م^٥ وذلك باستخدام ريومتر انبوى قطره ٢٨ ر . سم وطوله ١٠٠ سم .

الزوجہ الظاهريہ ٤.٦ . ٣.١ . ٢.٥٥ . ٢.٩ . ١.٧٤ . ١.٦٤ . ١.١ . ٠.٧٥ .
 (باسكال - ثانيه)

معدل القص ١٢١ ٢٠.٥ ٢٨٥ ٢٨. ٥.٥ ٧٢. ١٣.٠ ٢١٥.
 (١/ثانيه)
 احسب كل من n ، k .

٣٤- قارن بين الفقد فى الضغط الناتج عن الاحتكاك عند سريان كلامن الماء ومركز الموز المصفى كل على حده ، فى انبوى قطره الداخلى ١٢٥ ر سم ومعدل التصرف ١٢٥ كجم/ثانيه وطول الانبوى ٢ امتار وخصائص مركز الموز $k = ٦$ باسكال . ثانيهⁿ ، $n = ٤.٥٤$. والكثافه ٩٧٥ كجم/متر مكعب . علما بان لزوجة المياه النقيه تساوى ١٤٨٨×١٠^{-٢} باسكال . ثانيه .

٢٥- احسب كل من معامل الاحتكاك f ومقدار طاقة الحركة لسريان عصير المشمش المصفى فى انبويه قطرها ٢سم وطولها ٥ امتار بمعدل تصرف ١ متر مكعب/ثانية علما بان خصائص عصير المشمش هى كما يلى :

$$k = 2.0 \text{ باسكال} \cdot \text{ثانية}^n, \quad n = 2.2 \dots \text{ وكثافة العصير } 1.04 \text{ كجم/متر مكعب}.$$

٢٦- تم الحصول على النتائج التجريبية الآتية من جهاز لزوجة أنبويى Tube viscometer قطره $R = 0.267 \text{ cms}$ وطوله $L = 0.91 \text{ m}$ وكان السائل المستخدم هو صلصة التفاح Apple Sauce.

ΔP Pascal $\times 10^5$	1.3	1.45	2.56	1.99	2.13	2.41	2.7
$Q \text{ m}^3/\text{sec} \cdot 10^{-4}$	0.91	2.5	2.1	3.2	5.2	8.5	12.49

احسب كل من n , k .

٢٧- تم الحصول على القياسات الآتية للمولاس عند درجة حرارة 274 K مستخدمين ريومتر احادى الاسطوانه طولها 0.1143 m وقطرها 0.159 m. احسب كل من n , k .

٢٨- احسب قيمة رقم رينولدز Re لتحديد نوع السريان لمركز الطماطم $\frac{1}{2}$ مواد صلبة ذو الخصائص الآتية : $k = 18 \text{ Pa} \cdot \text{s}^n$, $n = 0.4$ اذا كان مركز الطماطم يسرى فى انبوب قطره ٢سم عند سرعة سريان تساوى ١.٢ متر/ث ماذا تكون قيمة Re فى حالة استخدام مياه

$$\rho_{\text{Tomato}} = 1130 \text{ kg/m}^3 \quad \rho_{\text{water}} = 1000 \text{ kg/m}^3 \quad \mu_{\text{water}} = 1488 \times 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{sec}.$$

٢٩- يتم ضخ مركز الموز المصفى خلال ماسورة قطرها ٤سم بسرعة متوسطة قدرها ٢.٢ متر/ث ودرجة حرارة ٢٥°م أوجد معامل الاحتكاك وحدد نوع السريان اذا كان:

$$n = 0.454 \quad k = 6 \text{ Pa} \cdot \text{s}^n \quad \rho_{\text{banana}} = 975 \text{ kg/m}^3$$

٤٠- يلزم تشغيل مروحة هواء بالمواصفات الآتية : $17 \text{ م}^3/\text{ق}$ عند ضغط ٥سم ماء . فاذا فرض انها تشابه من ناحية التصميم مروحة هواء تعمل عند المواصفات الآتية :

٢٨م^٣/ق عند ضغط ٧سم ماء وعدد لفاتها ١٠٠٠ لفة/دقيقه وقطر قرص الريش ٩سم ومقدار القدرة الحصانية اللازمه لادارتها ٧٧ حصان ميكانيكى اوجد قطر قرص الريش اللازم للمروحة المطلوب تشغيلها . وعدد لفاتها والقدرة الحصانية اللازمه لادارتها .

٤١- مروحة هواء تعمل عند ضغط ٢٢سم ماء ومقدار تصرفها ٢٨م^٣/ق يلزمها ٢٦ حصان لإدارة عمود الحركة الذى يدور عند ١٠٠٠ لفة/دقيقه . اذا أريد تقليل تصرفها الى ٣م^٣/ق . ما مقدار السرعة والقدرة الجديدة للمروحة . احسب النسبة المئوية فى تخفيض قدرتها الحصانية .

٤٢- مروحة كفاءتها ٦٥٪ ومقدار تصرفها ١٩٨م^٣/ق عند سرعة دوران ٧٠٠ لفة/دقيقه تعمل عند ضغط كلى مقداره ٦سم ماء . اذا استخدمت هذه المروحة لتعمل فى منطقة مرتفعه عند ضغط مقداره ٦٥سم ماء وسرعتها تغيرت لتصبح ٨٥٠ لفة/دقيقه . ما مقدار كل من تصرفها وقدرتها الحصانية فى الحالة الجديده .

٤٣- احسب القدره الحصانية اللازمه لرفع ٧٥ لتر/ق من الماء من خزان الى آخر على ارتفاع ٦ر٥م علما بان مقدار الفقد فى الرفع نتيجة لاحتكاك السائل فى المواسير يوازى ٥٪ من مقدار الرفع المانومتري . ومقدار سرعة سريان الماء فى المواسير ٢م/ثانيه .

٤٤- اوجد مقدار التصرف بوحدات م^٣/دقيقه لطللمبة تردديه مكونه من اسطوانه واحده لدفع لبن وقطر الاسطوانه ١٠سم وطول مشوار المكبس ١٥سم والكفاءه الحجميه للطللمبه ٩٥٪ . وعدد لفات عمود المحرك ١٠٠ لفة/دقيقه .

٤٥- اذا رفع ٤م^٣ من اللبن مقدار ٦م فى ٢٠ دقيقه مامقدار الشغل اللازم لاتمام هذه العمليه ؟ مامقدار القدره الحصانية الناتجه ؟ اذا كان قطر ماسورة الدفع ١٣سم وكثافة اللبن ١.٢٢ كجم/م^٣ احسب سرعة مرور اللبن فى ماسورة الدفع .

٤٦- آلة تجنيس لبن تعمل عند ضغط ١٧ ميجاباسكال سعتها ٢٢ لتر/ق اذا كانت كفاءة الطلمبه المستخدمه فى الجهاز ٨٢٪ اوجد القدرة الحصانية للموتور اللازم لإدارة الطلمبه . ماذا تكون القدرة الحصانية اللازمه لإدارة نفس الطلمبه اذا انخفض ضغط التشغيل الى ١٠ ميجاباسكال اهمل الاحتكاك داخل ماسورة التوصيل . (٤ لتر لبن فى الدقيقه = ٢٢ ر كجم لبن فى الساعه).

٤٧- مضخه تدور بسرعه ١٧٦٠ لفة/دقيقه ومقدار تصرفها ٤٧٢ لتر/ق عند رفع مانومتري مقداره ١٥م ويلزم لإدارتها ١٦٢ حصان ميكانيكى . اذا زادت السرعة الى ٢١٠٠ لفة/دقيقه . اوجد كل من مقدار التصرف والرفع والقدره الحصانية الجديده .

٤٨- طللمبه ذات قرص ريش قطره ١٨سم ومقدار تصرفها ٥١١ لتر/ق عند رفع مانومتري ١٢م يلزمها ١٦٢ حصان . اذا زاد قطر قرص الريش الى ١٨سم وكانت سرعة الطلمبه ثابتة ، اوجد كل من مقدار التصرف والرفع المانومتري والقدرة الحصانيه الناتجه لادارة الطلمبه .

٤٩- من واقع تجربه لمعرفة كفاءة مضخة مياه من النوع الطارده المركزيه وجد الآتى:-

٥سم	قطر ماسورة التصرف الخارجى لمياه الطلمبه
٤م/ث	سرعة المياه فى ماسورة الخروج
١١متر	الارتفاع الاستاتيكي
٠.٦ متر	مقدار الفقد فى الرفع
١٤٥. لفه/دقيقه	سرعة الموتور اللازمه لادارة الطلمبه
٢ حصان	القدرة الحصانيه للموتور
٩٥٪	كفاءة الموتور
٨٥٪	كفاءة توصيل الحركه الميكانيكيه للمضخه
	احسب الكفاءة الهيدروليكيه للمضخه .

٥٠- اذا زادت السرعه فى المسائل السايقه الى ٢٠٠ لفه/دقيقه اوجد مواصفات التشغيل الجديده . هل يمكن استخدام الموتور السابق فى ادارة المضخه ؟

٥١- مضخه تردديه مكونه من اسطوانه واحده تستخدم فى توصيل اللبن (كثافتة ١.٢٦ كجم/م^٣) الى جهاز تجنيس تحت ضغط مرتفع مقدار ه ٦ ميجاباسكال. فاذا علمت ان قطر اسطوانة المكبس ١٠سم وطول المشوار ١٥سم وعدد لفات الموتور ١٠٠ لفه/دقيقه وكفاءة المضخه ٧٠٪ . احسب مقدار تصرف الطلمبه فى الدقيقه والقدرة الفرمليه اللازمه لادارة المضخه .

٥٢- من واقع تجربه لمعرفة كفاءة طللمبة مياه من النوع الطارد المركزيه وجد الآتى :

٧٥سم	قطر ماسورة تصرف المياه
٨م/ث	سرعة المياه فى ماسورة التصرف
١٢م	الارتفاع الاستاتيكي
١٥م	مقدار الفقد فى الرفع نتيجة احتكاك السائل
١٤٥. لفه/دقيقه	سرعة الموتور اللازمه لادارة الطلمبه
٧ حصان ميكانيكى	القدرة الحصانيه للموتور

كفاءة الموتور ٩٥٪
الكفاءة الميكانيكية لتوصيل الحركة للظلمبه ٨٥٪

احسب الكفاءة الهيدروليكية للظلمبه اذا زادت السرعه الى ٢٠٠٠ لفة/دقيقه .
اوجد مواصفات التشغيل الجديده . هل يمكن استخدام الموتور الكهربائى
السابق فى ادارة الظلمبه فى الحاله الجديده ؟

٥٢- احسب القدره الحصانيه اللازمه لرفع ٧٥ لتر/دقيقه من الماء من خزان الى آخر
على ارتفاع ٨م علما بان مقدار الفقد فى الرفع نتيجة لاحتكاك السائل فى المواسير
يوازى ٥٪ من مقدار الرفع المانومتري ، ومقدار سرعه سريان الماء فى المواسير ٢م/ث.
اعتبر ان كفاءة الموتور ٨٠٪ وكفاءة الظلمبه ٥٠٪ .

٥٤- غرفة تبريد درجة حرارتها ٤٥°م معزوله بطبقة من الفلين بسمك ٥سم
ومساحتها السطحيه ٢م^٢ والجو المحيط بها عند درجة حرارة ٢١°م . احسب
كمية الحراره التى تنتقل الى داخل غرفة التبريد فى الساعه اذا علمت ان معامل
انتقال الحراره بالتوصيل للفلين ١٢ كيلوكالورى/ساعه.متر.°م .

٥٥- فرن حائط مكون من طبقتين الاولى بسمك ٢٠سم ومعامل توصيلها ٤ر . والثانيه
بسمك ٢٠ سم ومعامل توصيلها ١٨ر . فاذا كانت درجة حرارة السطح الداخلى
٩٨٠°م ، والخارجى ٣٢°م - احسب كمية الحراره المفقوده فى الساعه .

٥٦- قدر نسبة الانخفاض فى الفقد فى كمية الحراره نتيجة لوضع الطبقة الثانيه فى
المسائل السابقه التى معاملها ١٨ر . ثم احسب درجة حرارة سطح التلامس بين الطبقتين .

٥٧- اوجد معدل الفقد فى الحراره لكل متر مربع من حجرة توصيل الهواء الساخن
الى مجفف . وجدران هذه الغرفه معزوله بطبقة من الصوف الزجاجى بسمك
١٠سم ودرجة حرارة الحجرة من الداخلى ١٥°م ومن الخارج ٢٥°م . اعتبر ان
معامل انتقال الحراره بالتوصيل للصوف الزجاجى
١٢ر . كيلوكالورى/ساعه.متر.°م

٥٨- حائط من الحديد سمكه ٢٥سم ($k = ١٢ر$. كيلوكالورى/ساعه متر.°م) يفصل
طبقتين من الهواء الساخن كل منهما عند درجة حرارة ٢١٥°م ، ٥٠°م على

الترتيب ، ومعامل انتقال الحرارة بالحمل لكل منهما هو $h = 0.2$ كيلو كالورى/ساعة.متر².
احسب معدل انتقال الحرارة فى الحائط لكل متر مربع من السطح .

٥٩- طبقه من الهواء ($k = 0.1$ كيلوكالورى/ساعة.متر.م) بسمك ٠.٠١ ر.سم تفصل حائط مصنوع من الحديد بسمك ١٢ سم عن حائط مصنوع من الالومنيوم بسمك ٥ ر.سم . احسب معدل انتقال الحرارة لكل متر مربع اذا كانت درجة حرارة حائط الحديد من الخارج ٢٠.٥ م⁰ ودرجة حرارة حائط الالومنيوم من الخارج ٢٨ م⁰ k للحديد = ١٢٦ ، k للالومنيوم = ٥٤ .
احسب كذلك درجة حرارة سطح التلامس بين الطبقتين .

٦٠- احسب معدل الفقد من حائط مكون من ثلاثة طبقات كالاتى : ٥ ر.سم طوب حرارى ، ١٢ سم مادة عازله ، ١٠ سم من طوب احمر اذا كانت درجة حرارة السطح الداخلى والخارجى للحائط ١٠٠ م⁰ ، ٤٠ م⁰ على الترتيب علما بان :
 k للطوب الحرارى = ١ ر.٠ ، k للطوب الاحمر = ١ ر.٤٩ و k للمادة العازله = ١٢ ر. كيلوكالورى/ساعة.متر.م⁰ .

٦١- احسب درجة حرارة السطح الخارجى لحائط مساحة سطحه ١٠ متر مربع ، اذا كان معدل الفقد فى الحرارة منه الى الجو الخارجى ٨٠٠ كيلوكالورى/ساعة ، درجة حرارة الجو الخارجى ٢٠ م⁰ علما بان :

$$h = 1.13 (t_s - t_o)^{\frac{1}{4}} \quad \text{kcal./m}^2.\text{hr.}^{\circ}\text{C}$$

٦٢- من المعلوم نظريا انه يمكن التعبير عن معامل انتقال الحرارة بالحمل من السطح الخارجى للمواسير الافقيه من المعادله الآتية :

$$h = 1.13 \left(\frac{t_s - t_o}{D} \right)^n \quad \text{kcal./m}^2.\text{hr.}^{\circ}\text{C}$$

حيث ان:

$$t_s = \text{درجة حرارة السطح الخارجى للماسورة (م}^{\circ}\text{)}$$

$$t_o = \text{درجة حرارة الجو الملامس للسطح الخارجى للماسورة (م}^{\circ}\text{)}.$$

$$D = \text{القطر الخارجى للماسورة (متر).}$$

وبعمل تجربة على ماسوره قطرها الخارجى ١٥ سم وجد ان درجة حرارة سطحها الخارجى ١١٠ م° ، ودرجة حرارة الجو الملامس لهذا السطح ٢٠ م° ، وكمية الحرارة المفقوده من الماسوره لكل متر طولى منها ٢٠٥ كيلوكالورى/ساعه .متر طولى . احسب الاس " n " فى المعادله السابقه .

٦٣- ماسوره بخار قطرها الخارجى ١٧سم مغطاه بطبقة من ماده عازله سمكها ٥سم (k للماده العازله = ٠.٨ ر كيلوكالورى/ساعه.متر.م°). ومغلفه بطبقة اخرى من ماده عازله بسمك ٤سم (k للماده العازله = ٠.٦ ر كيلوكالورى/ساعه.متر.م°). احسب كمية الحرارة المفقوده من سطح الماسوره اذا كان طولها ١٢٠ متر ، علما بان درجة حرارة السطح الداخلى والخارجى للمواد العازله ٤٢٦ م° ، ٢٨ م° على الترتيب اهمل مقاومة سمك جدار الماسوره لمرور الحرارة .

٦٤- كره مجوفه من الحديد قطرها الداخلى والخارجى ١٤سم ، ١٦سم على الترتيب احسب كمية الحرارة اللازمه لتسخين الكره من الداخل حتى يكون الفرق فى درجات الحرارة بين السطح الداخلى والخارجى ٤ م° (k للحديد = ٢٠ كيلوكالورى/ساعه . متر . م°).

٦٥- احسب كمية الحرارة المتبادله بالاشعاع بين سطحين لانهايين متوازيين عند درجات حرارة ٢٦٠ م° ، ٩٢ م° (اعتبر ان الاسطح سوداء).

٦٦- اذا كانت الاسطح فى المساله السابقه رماديه ونسبة اشعاعها ٨ ، ٦ . ، ماهى كمية الاشعاع الحرارى المتبادل لكل متر مربع من الاسطح .

٦٧- احسب كمية الحرارة المشعه من سطح ماسوره إذا كان نسبة اشعاعه ٨ . ، قطرها الخارجى ٩ سم ودرجة حرارة سطحها الخارجى ١٠٠ م° وتم داخل غرفة كبيرة درجة حرارة الهواء بها ٢٠ م° .

٦٨- مبادل حرارى عكسى يستخدم لتبريد زيت بواسطة ماء بارد بالمواصفات الآتية:-

درجة حرارة دخول الزيت	٨٢ م°
درجة حرارة دخول الماء	٢٤ م°
درجة حرارة خروج الماء	٦٥ م°
وزن الزيت المراد تبريده	٦٨٠ كجم/ساعه

كمية الماء اللازمه للتبريد ٣٥٤ كجم/ساعه
 الحراره النوعيه للزيت ٥ر كيلوكالورى/كجم.°م
 اوجد :
 أ - درجة حرارة خروج الزيت.
 ب- المساحه السطحيه لكل ماسوره من مواسير مرور الزيت .
 اعتبر ان المعامل الكلى المكافى لانتقال الحراره U = ٣٠٠
 كيلوكالورى/ساعه.م^٢.

٦٩- مبادل حرارى يستخدم لتبريد سائل بواسطة ماء بارد بالمواصفات الآتية :-

درجة حرارة دخول السائل ٩٣°م
 درجة حرارة دخول الماء ١٠°م
 درجة حرارة خروج الماء ٢٧°م
 معدل سريان السائل المراد تبريده ٣٥٤ كجم/ساعه
 معدل ماء التبريد ٩.٧ كجم/ساعه
 الحراره النوعيه للسائل ٦ر كيلوكالورى/كجم.°م
 احسب :

أ- درجة حرارة خروج السائل .
 ب- المساحة السطحيه لمواسير المبادل فى كل من الحالتين :
 ١- مبادل متوازى . ٢- مبادل عكسى .

٧٠- غلايه بخاريه تولد بخار ماء محمص عند ضغط مطلق مقداره ٤ كجم/سم^٢

ومقدار درجات التحميص ٥°م فوق درجة حرارة التشبع عند هذا الضغط .
 استخدم هذا البخار فى مصنع لبسترة الالبان ، فاذا كانت ماسورة البخار
 الموصله من الغلايه الى جهاز البسترة قد تركت بدون مادة عازلة ووجد ان
 البخار يصل الى جهاز البسترة رطبا ودرجة جفافه ٩٦٪ عند ضغط مطلق مقداره
 ٣ر٥ كجم/سم^٢ . احسب كمية الحرارة التى فقدها كجم واحد من البخار بسبب
 وجود الماسورة الغير معزوله .

٧١- احسب كمية البخار اللازمه لجهاز البسترة فى المسأله السابقه لتسخين ٥٠٠

كجم من اللبن من درجة حرارة ٣٥°م الى ٨٥°م علما بان كفاءة جهاز البسترة
 ٨٥٪ والحرارة النوعيه للبن ٩٣ر . كيلو كالورى/كجم.°م.

- ٧٢- مبادل حراري يستخدم لتبريد سائل بواسطة ماء بارد بالمواصفات الآتية :-
 درجة حرارة دخول السائل 92°م ، درجة حرارة دخول الماء 7°م ، ودرجة حرارة خروج الماء 22°م ، وزن السائل المراد تبريده 254 كجم/ساعة ، كمية الماء اللازم للتبريد 725 كجم/ساعة : الحرارة النوعية للسائل 72 ر. كيلوكالوري/كجم. $^{\circ}\text{م}$.
 احسب :
 أ- درجة حرارة خروج السائل.
 ب- المساحة السطحية لمواسير المبادل في كل من الحالتين :
 ١- مبادل متوازي. ٢- مبادل عكسي .

- ٧٣- حجم غلاية تجارب صغيره متر مكعب تحتوى على كجم واحد من الماء عند ضغط مطلق واحد كجم/سم 2 ودرجة حرارة 15°م ويشغل الهواء باقى حجم الغلاية .
 احسب :
 ١- وزن الهواء الموجود بالغلاية مع كل كجم بخار .
 ٢- الضغط الكلي في الغلاية عندما تصل درجة حرارة المخلوط الى 150°م .
 علما بان محبس البخار العمومى كان لايزال مغلقا .
 ٣- الحرارة الكلية للبخار اذا كانت جودته 90%
 (اعتبر ان الثابت العام للغازات 298 كجم متر/كجم $^{\circ}\text{م}$).

- ٧٤- مصنع صغير لبسترة الالبان على دفعات ، به غلايتان الاولى تعمل عند ضغط مطلق مقداره 2 كجم/سم 2 وجودة البخار الناتج 90% والثانيه تعمل عند ضغط مطلق مقداره 5 كجم/سم 2 وجودة البخار الناتج 85% وللاستفادة باكبر كمية ممكنه لتسخين اللبن خلط 15 كجم من بخار الغلاية الاولى مع 10 كجم من بخار الغلاية الثانيه ونتج عن ذلك ان مخلوط البخار كان عند ضغط مطلق 4 كجم/سم 2 .

- استخدم هذا المخلوط لتسخين مقدار من اللبن من درجة حرارة 20°م الى 65°م
 ويتكثف البخار المستخدم على درجة 36°م . احسب :
 ١- جودة البخار الناتج من عملية الخلط.
 ٢- كمية اللبن التى يمكن تسخينها بمخلوط البخار.
 علما بان $c_p = 0.93 \text{ kcal/kg. K}$

٧٥- ضاغط هواء يعمل بقوة الطرد المركزيه لضغط ٣.٠ متر مكعب من الهواء الجوى فى الدقيقه عند ضغط مطلق مقداره ١.٣ كيلوباسكال الى ضغط مطلق مقداره ٦٨٩ كيلوباسكال .

احسب القدرة الحصانيه اللازمه لادارة الضاغط علما بان كفاءته ٧٥٪ .
اذا كان عمود الاداره يدور بسرعه ١٠٠٠ لفة فى الدقيقه واريد زيادة ضغط الهواء بالضاغط الى ٨٢٧ كيلوباسكال فما مقدار الزيادة المنتظرة فى سرعه دوران عمود ادارة الضاغط ($\gamma = 1.4$) .

٧٦- مبادل حرارى يستخدم لتبريد ٩ كجم ماء ساخن فى الساعه من درجة ٨٨° م بواسطة ١٣٦.٧ كجم ماء بارد فى الساعه عند درجة ٢٢° م . فاذا كان المعامل الكلى المكافىء لانتقال الحرارة بين الماء الساخن وجدار مواسير المبادل الداخليه والماء البارد يساوى ٤٤٨ كيلوكالورى/ساعه.متر^٢ . م^٥ .
احسب:

أ- المساحه السطحيه للمواسير فى حالة استخدام :

١- مبادل متوازى .

٢- مبادل عكسى .

ب- فى حالة استخدام مبادل عكسى ، اذا تغيرت درجة حرارة دخول الماء البارد من ٢٢° م الى ٢١° م وبقيت درجة حرارة دخول الماء الساخن ثابتة عند ٨٨° م مع عدم تغير مقدار سرريان كل من الماء البارد والساخن ، احسب درجة حرارة خروج الماء البارد من المبادل (اعتبر ان المعامل الكلى المكافىء لانتقال الحرارة ظل ثابتا كذلك) .

٧٧- جهاز بسترة يستخدم لتسخين كمية من اللبن من درجة ٢١° م الى ٦٦° م (الحراره النوعيه للبن ٩٣ كيلوكالورى/كجم° م) وكفاءته ٨٥٪ - فاذا كان البخار المستخدم فى التسخين هو عبارته عن مخلوط من ثلاثة انواع من البخار :
الاول مقدار ١٠ كجم/ساعه بخار محمص عند ضغط مطلق ١٠ كجم/سم^٢ ودرجة حرارة ٢٠٠° م ، والثانى مقداره ١٥ كجم/ساعه بخار جاف ومشيع عند ضغط مطلق ٨ كجم /سم^٢ ، والثالث مقداره ٢٥ كجم/ساعه بخار رطب عند ضغط مطلق ٥ كجم/سم^٢ ونسبة جفافه ٧٥٪ . فاذا كان الضغط المطلق للمخلوط هو ٧ كجم/سم^٢ - احسب :

١- نسبة جفاف مخلوط البخار .

٢- كمية اللبن التي يمكن تسخينها بمخلوط البخار .

٧٨- مبادل حراري يستخدم لبسترة واحد كيلوجرام في الدقيقة من عصير البرتقال وذلك بواسطة تكثيف بخار رطب في الغلاف الخارجي المحيط بمواسير المبادل الحراري . فإذا كان ضغط البخار المستخدم في المبادل الحراري يساوي نصف كجم/سم^٢ ونسبة جفافه ٩٠٪ وطول مواسير المبادل خمسة امتار، القطر الداخلي لكل منها ٢سم والخارجي ٢.٥سم ومصنوعه من النحاس الاحمر ذو معامل انتقال حرارة بالتوصيل مقداره ٢٠٠ كيلوكالوري/متر.ساعة.°م . واذا كان معامل انتقال الحرارة بالحمل لعصير البرتقال ٢٠ كيلوكالوري/متر مربع.ساعة.°م ، ومعامل انتقال الحرارة بالحمل للبخار المستخدم ١٥ كيلوكالوري/متر مربع.ساعة.°م ودرجة حرارة دخول عصير البرتقال الى المبادل ٢٥°م ودرجة حرارة خروجه ٦٠°م وحرارته النوعيه ٨٠ كيلوكالوري/كجم °م

احسب :

أ - عدد مواسير المبادل الحراري مقربه الى اقرب عدد صحيح .

ب- كمية البخار المتكثفه في الساعه .

ج - كمية الوقود المستخدم في الغلايه لتوليد هذا البخار اذا علمت ان القيمه الحراريه للوقود ١٠.٠٠٠ كيلوكالوري/كجم ووقود وكفاءة الغلايه ٨٠٪ .

٧٩- مصنع صغير لبسترة الالبان على دفعات به غلايتان : الاولى تعمل عند ضغط مطلق مقداره ٦ كجم/سم^٢ ، وجودة البخار الناتج ٨٥٪ والثانيه تعمل عند ضغط مطلق مقداره ٥ كجم/سم^٢ وجودة البخار المستخدم ٩٠٪ ، وحتى يمكن الاستفاده باكبر كفاءة ممكنه من تسخين اللبن خلط ١٠ كجم/ساعه من بخار الغلايه الاولى مع ١٥ كجم/ساعه من بخار الغلايه الثانيه ونتج عن ذلك ان مخلوط البخار كان عند ضغط مطلق مقداره ٥ كجم/سم^٢ . استخدم هذا المخلوط في تسخين كمية من اللبن من درجة ٢٠°م الى ٦٥°م ، ويتكثف البخار المستخدم على درجة ٤٠°م . احسب :

١- جودة البخار الناتج عن عملية الخلط .

٢- كمية اللبن التي يمكن تسخينها بمخلوط البخار .

٨٠- استخدمت علب على شكل متوازي مستطيلات مقاس $7 \times 35 \times 15$ سم لتعبئة لحم اللانشون بدون ترك اى فراغ ، وكانت درجة حرارة اللحم الابتدائيه 82°م ، وضعت المعلبات فى معقم يستخدم بخار درجة حرارته 115°م لمدة ساعتين وذلك بفرض معاملة المعلبات حراريا . احسب درجة حرارة منتصف اللحم المعبأ اذا علمت ان :

$$\begin{aligned} \text{الحراره النوعيه للحم} &= 84 \text{ ر. كيلوكالورى/كجم.}^\circ \text{م} \\ \text{كثافة اللحم} &= 1.88 \text{ كجم/متر مكعب} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{معامل انتقال الحراره بالتوصيل للحم} &= 11 \text{ ر. كيلو كالورى/ساعه.متر.}^\circ \text{م} \\ \text{معامل انتقال الحراره بالنقل للبخار} &= 1495 \text{ كيلو كالورى/ساعه.متر مربع.}^\circ \text{م} \end{aligned}$$

٨١- استخدمت علب رقم ٢ (القطر الصافى ٨سم والارتفاع الصافى ١٠.٢٥سم) فى تعبئة لبن مكثف ومحلى كثافته ٨٨ ر. كجم/متر مكعب ودرجة حرارته الابتدائيه 6°م . وضعت المعلبات فى معقم يستخدم بخار درجة حرارته 92°م لمدة ساعه واحده وذلك بفرض معاملة المعلبات حراريا ، فاذا كان فراغ العلبه ٦رسم ، احسب درجة حرارة منتصف الغذاء المعبأ اذا علمت ان :

$$\begin{aligned} \text{الحراره النوعيه للبن المكثف} &= 94 \text{ ر. كيلوكالورى/كجم.}^\circ \text{م} \\ \text{معامل انتقال الحراره بالنقل للبخار} &= 1495 \text{ كيلوكالورى/ساعه.مترمربع.}^\circ \text{م} \\ \text{معامل انتقال الحراره بالتوصيل للبن المكثف} &= 11 \text{ ر. كيلوكالورى/ساعه.متر.}^\circ \text{م} \end{aligned}$$

٨٢- قطعة من اللانشون على شكل اسطوانه قطرها ٧.٣٥سم وطولها ١٤رسم وضعت فى فرن درجة حرارته 115°م بفرض معاملتها حراريا ولمدة ساعتين . فاذا كانت درجة حرارة اللانشون الابتدائيه 21°م احسب درجة حرارة منتصف اللانشون اذا كان :

$$\begin{aligned} \text{معامل انتقال الحراره بالنقل لجو الفرن} &= 298 \text{ كيلوكالورى/ساعه.متر مربع.}^\circ \text{م} \\ \text{معامل انتقال الحراره بالتوصيل للانشون} &= 12 \text{ ر. كيلوكالورى/ساعه.متر.}^\circ \text{م} \\ \text{الوزن النوعي للانشون} &= 1.7 \text{ ر.} \\ \text{الحراره النوعيه للانشون} &= 8 \text{ ر. كيلوكالورى/كجم.}^\circ \text{م} \end{aligned}$$

٨٢- بطيخه على شكل كرة قطرها ٢٢سم ودرجة حرارتها الابتدائيه ٢٧°م ، يراد تبريدها لتصل درجة حرارتها عند المركز الى ٥°م وذلك بوضعها فى ثلاجة درجة حرارة جوها ٢°م . احسب الوقت اللازم لذلك اذا كان :

معامل انتقال الحراره بالنقل لجو الثلاجه = ٧٥. كيلوكالورى/ساعه.متر مربع.°م

معامل انتقال الحراره بالتوصيل للبطيخه = ١١. كيلوكالورى/ساعه.متر.°م

الحراره النوعيه للبطيخه = ٩. كيلوكالورى/كجم.°م

كثافة البطيخه = ١٠٠١ كيلوجرام /متر مكعب

٨٤- مقلب بيوريه بسلة على شكل اسطوانه قطرها ٢٦سم وارتفاعها ٩٨سم ودرجة حرارتها الابتدائيه ٣٠°م يراد معاملتها حراريا وذلك بوضعها فى وسط تسخين درجة حرارته ١١٥°م . والمطلوب تقدير درجة حرارة المنتصف لكل من الحالتين:

أ - اذا اعتبرت المقلب كاسطوانه لانهايه .

ب- اذا اعتبرت المقلب اسطوانه محددة الارتفاع

علما بان :

معامل انتقال الحراره بالنقل لوسط التسخين=٥٢٢ كيلوكالورى/ساعه.متر مربع.°م

معامل انتقال الحراره بالتوصيل للبسله = ٢٢. كيلوكالورى/ساعه.متر.°م

الحراره النوعيه للبسله = ٩١. كيلوكالورى/كجم.°م

كثافة بيوريه البسله = ١٠٨٨ كجم /م^٣

وقت المعامه الحراريه = ٤٥ دقيقه