

الأكاديمية العربية الدولية



الأكاديمية العربية الدولية
Arab International Academy

الأكاديمية العربية الدولية المقررات الجامعية

مقدمة

إن الزيادة المضطردة في الطلب على الغذاء سواء للإنسان أو الحيوان يضع عبئاً متزايداً على قطاع الزراعة لتوفيره من خلال محاور متعددة لتنمية الموارد النباتية والحيوانية وأحد هذه المحاور هو تصنيع المنتجات الزراعية والحيوانية وبالأخص الصناعات الغذائية . يصاحب ذلك متطلبات الاستخدام الأمثل للطاقة والحد من الفاقد سواء منها أو من المنتج المصنع مع إيجاد السبل اللازمة لتنفيذ ذلك بتصميم وتصنيع أجهزة ومعدات نظم الصناعات الغذائية المناسبة .

ومن هذا المنطلق فإنه يلزم إعداد الاختصاصيين في هذا المجال إعداداً جيداً لإمكان استخدام التقنيات الحديثة والعمل على تطويرها وتطوير المتقدم منها للوصول إلى منتج عالي الجودة قليل التكاليف بالقدر الممكن .

وقد حرصت في هذا الكتاب على شرح القواعد الأساسية في مجال هندسة التصنيع الزراعي بطريقة مبسطة تمكن كل من طلبة السنوات النهائية لمرحلة البكالوريوس وطلبة الدراسات العليا سواء لتخصص الصناعات الغذائية والألبان وتخصص الهندسة الزراعية من الإلمام الكافي بأساسيات التصميم والتطوير المستمر للملاحقة التقدم التكنولوجي في المجالات البحثية والتطبيقية لتصنيع المنتجات الزراعية.

وكان المدخل الرئيسي لهذا الكتاب هو شرح تفصيلي للأبعاد والوحدات والتركيز على ما هو متفق عليه عالمياً من استخدام الوحدات الدولية على أساس مرحلي باستخدام الوحدات المترية وتبسيط طريقة التحويل من نظام إلى آخر . ولتدريب الطالب على ذلك ، اشتملت الأمثلة المحولة والمسائل العامة والتمرينات على استخدام كلا من النظامين الدولي والمترى .

وقد كان لاستخدام الطاقة الحرارية الإهتمام الكافي نظراً لأنها أصبحت تمثل عامل الندرة والحد من الفاقد في استخدامها يمثل عاملاً هاماً لزيادة كفاءة التشغيل مع توفير إنتاج عالي الجودة بأقل التكاليف . وعلى هذا الأساس كان لزاماً عرض وشرح مبادئ الديناميكا الحرارية والتي بنى عليها تحويل الطاقة الحرارية إلى طاقة ميكانيكية وحدود ذلك عند عكس هذا التحويل . وإمتد ذلك لسريان الموائع والغازات المثالية وتغير الضغط الواقع عليها كما هو الحال في ضواغط الغازات والمراوح والمضخات وما صاحب ذلك من عمليات إنتقال الكتلة والحرارة وقد تم التعرض تفصيلاً لسريان الموائع الغير نيوتونية علي أساس أن معظم المواد الغذائية السائلة تتبع ذلك . وقد تم التركيز على حسابات إنتقال الحرارة بأشكاله المختلفة

خلال الجوامد والسوائل والغازات وعمليات التبادل الحرارى سواء المستقر أو غير المستقر وتطبيقات ذلك في مجالات التصنيع الغذائى . وأشتمل الكتاب على معالجة المادة العلمية الخاصة بعملية التجفيف وخاصة التجفيف الصناعى وذلك بشرح تداخل إنتقال الرطوبة (الكتلة) والطاقة الحرارية وتأثير ذلك على معدل تجفيف المادة والمدة اللازمة لإحداث ذلك . وكان هناك اهتماما خاصا بعمليات التبريد والتجميد سواء لاجراءات خفض الحرارة أو الحفظ تحت درجات حرارة منخفضة . هذا وقد أخذ فى الاعتبار إمكان إستبدال موائع التبريد التى يتسبب عنها التأثير على البيئة وخاصة إتساع ثقب الأوزون .

وقد عنى الكتاب بإضافة ملحقات تختص بجداول التحويل فى القياس وجداول لخصائص البخار وبعض المواد الغذائية الطبيعية والحوارية وكذلك الخرائط السيكرومترية وإنتقال الحرارة وخرائط التبريد والتجميد بما يساعد الطالب للحصول على البيانات اللازمة فى عمليات التصنيع الغذائى .

ويود المؤلف أن يعبر عن خالص شكره وعظيم تقديره للأخ الاستاذ الدكتور حمدى عبد اللطيف حسنين والأخ الدكتور هانى إدريس خليل على ما بذلاه من جهد ووقت فى المراجعة والترتيب لكى يخرج هذا الكتاب بالشكل الواضح والجيد . وكذلك للسيدة /سامية عبد الحليم أحمد لقيامها بكتابة هذا الكتاب على جهاز الحاسب الشخصى وعلى صبرها فى إجراء التصحيحات المتعددة . هذا ويود المؤلف تقديم الشكر كل الشكر للأخوة الأبناء العاملين بقسم التصميم والتطوير بمعهد بحوث الهندسة الزراعيه لإخراج الرسومات والمقاطع المختلفه تحت اشراف دكتور عاطف حمام سليمان .

ويأمل المؤلف أن يكون هذا الكتاب عوناً ومفيداً للطلبة الدارسين لهندسة التصنيع الزراعى وكذلك الأخوة والزملاء العاملين فى المجال التطبيقى فى الصناعات الغذائيه والالبان .

أ.د. أحمد فريد السهرجى

القاهرة / أكتوبر ١٩٩٦

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 الالبان 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 جزيئات 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 جزيئات السوائل او الغازات .

٣- انتقال الحرارة بالاشعاع : Heat Radiation

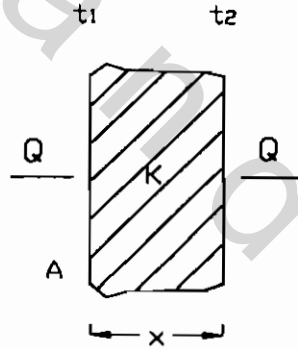
ويتم انتقال الحرارة بهذه الطريقه من اى جسم بدون وسيط وذلك نتيجة لاشعاع الحرارة من هذا الجسم على هيئة موجات كهرومغناطيسيه . Electromagnetic Waves

ومن الناحية العملية لا يحدث انتقال للحرارة من نوع واحد فقط ، بل دائما نجد على الأقل اشتراك نوعين فى 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 الحرارى العمودى 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 فى 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 فى درجة حرارة السطحين ومساحة السطح العمودى على اتجاه انتقال الحرارة . ويتناسب تناسباً عكسياً مع سمك الحائط المنتقله خلاله كمية الحرارة . ويعبر قانون فوريير Fouriers 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 بوحدة

BTU/hr. ft °F or kcal/hr. m. °C or W/m K

A = مساحة السطح العمودى على اتجاه انتقال الحرارة ft^2 or m^2

t_1 = درجة حرارة السطح الساخن للحائط °F or °C

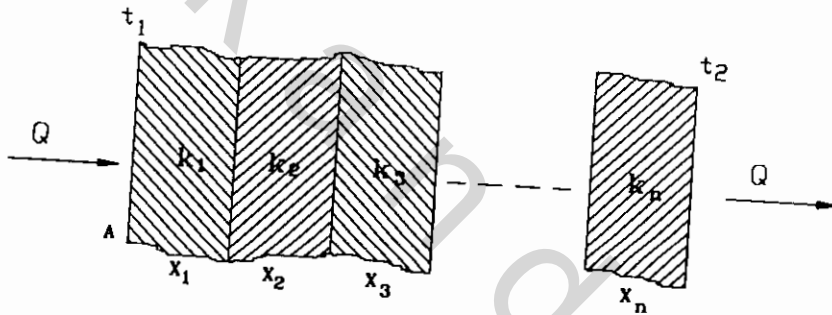
t_2 = درجة حرارة السطح البارد للحائط °F or °C

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 أى عازل جيد للحرارة

وعادة ما يتكون الجسم من اكثر من طبقة واحدة ، كما هى الحالة عند عزل جدران غرفة تبريد . فتتم كمية من حرارة الجو الخارجى للغرفة من طبقة مادة عازله ملاصقة لطبقة مونه اسمنتيه ثم طبقة الطوب الاحمر (مادة البناء) ثم طبقة مونة اسمنتيه أخرى ومنها خلال طبقة مادة عازله أخرى حتى تصل الى هواء الغرفة 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 الداخل الى الخارج ويسمى بانتقال الحرارة القطرى أى فى اتجاه القطر كما يأتى :

انتقال الحرارة

معدل انتقال الحرارة التفاضلى للسريان القطرى = Q

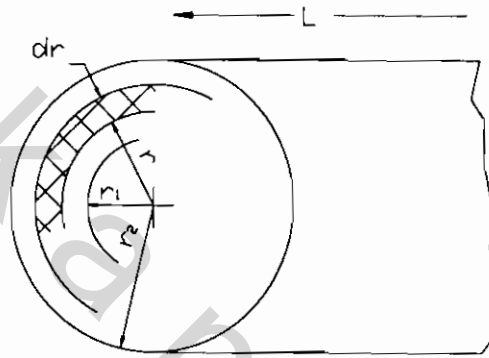
$$Q = -kA \frac{dt}{dr} \quad (9-3)$$

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 المساحه السطحيه 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 الاسطوانة = L

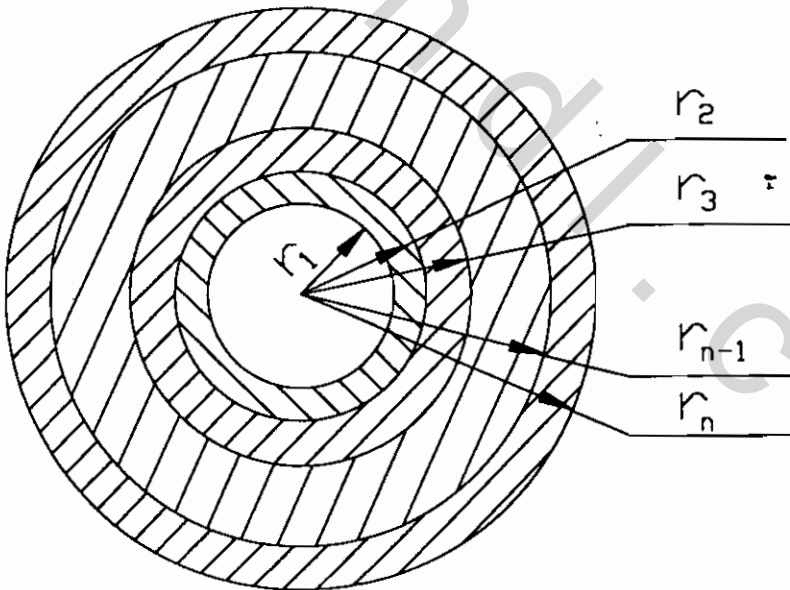
قطر الاسطوانة الداخلى = D_1

قطر الاسطوانة الخارجى = D_2

النسبة التقريبية $\frac{22}{7} = \pi$

$\ln$ = لوغاريتم العدد للأساس الطبيعى وليس للأساس ١٠

ومن الناحية العملية ، تكون الاسطوانة مغطاه باكثر من طبقة كما هى الحالة عند توصيل ماسورة بخار من موقع القيزان الى معدات التصنيع حيث تعزل ماسورة البخار بطبقة او اكثر من مواد عازلة للحرارة ويمكن حساب معدل انتقال الحرارة كما يأتى:-

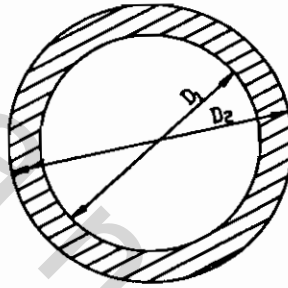


شكل (٩-٤) انتقال الحرارة القطرى فى طبقات اسطوانية

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

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 (٩-٥) انتقال الحرارة القطرى فى طبقات كرويه

أما اذا كان انتقال الحرارة يتم من داخل الى خارج (او العكس) جسم كروى الشكل كما هى الحالـه 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

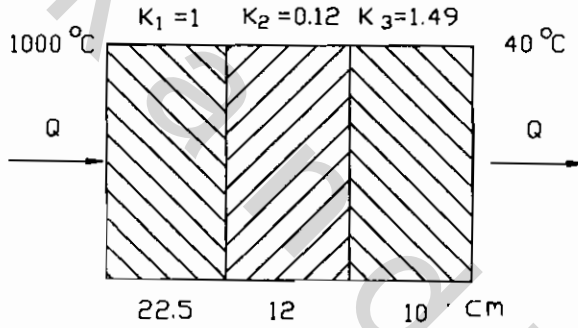
يوجد بالملاحق (ملحق رقم ٢) جداول تبين قيم معامل انتقال الحرارة بالتوصيل لبعض المعادن وسبائكها وكذلك لبعض المواد العازلة الشائعة الاستعمال فى عمليات التسخين والتبريد داخل مصانع الاغذية والالبان بالوحدات الدوليه.

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

٢٢٥ سم طوب حرارى ذو معامل انتقال حراره بالتوصيل ١٠ 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 ١٠٠٠ م° ، ٤٠ م° 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 معدنى ساخن ، ويوجد على أسطحه سائل او غاز سواء فى 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 المعدنى الى بقية السائل او الغاز . ويزداد معدل انتقال الحرارة كلما قل سمك هذه الطبقة . ويتم انتقال الحرارة فى حالة سكون السائل او الغاز على السطح الساخن نتيجة للفرق فى 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 فى كثافتها فترتفع الى اعلى ويحل محلها طبقة اخرى ذات درجة حرارة منخفضة وتتوالى هذه العملية محدثة حركة فى السائل او الغاز تسمى بتيارات الحمل ويسمى هذا النوع من انتقال الحرارة بالحمل الحر Free Convection . أما فى حالة حركة السائل او الغاز نتيجة لدفعها بواسطة طلمبه 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 :

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

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

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

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

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

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 مايتأتى :

- 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 متوازية او انسيابية Streamline or Laminar Flow او فى المرحلة الانتقالية Transition Flow كخليط من الخطوط المتوازية والمضطربة ، او يسير فى حالة دوامية مضطربة Turbulent Flow وتؤثر طريقة سريان السوائل او الغازات على قيمة معامل انتقال الحرارة بالحمل "h".

وتتحدد طريقة سريان السائل او الغاز بمعرفة 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 الاشارة اليها فى الباب الخاص بسريان الموائع ونعيد فيما يلى كتابة المعادلة الخاصة برقم رينولدز Re.

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

حيث ان :

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

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

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

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

قبل ان نذكر فيما بعد الحالات المختلفة 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" وتحدد قيمته من المعادله الآتيه :

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

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 القسري Forced Convection

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

وكان رقم $Pr < 10$ تستخدم المعادلة الآتيه :

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

ب- إذا كان السريان دوامى مضطرب وكان $Pr > 10$ وتستخدم المعادلة الآتيه :

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

ج- إذا كان السريان انسيابى متوازى أى أن $Re < 2100$ تستخدم المعادلة الآتية :

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

ثانياً : السريان الحر Free Convection

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

ويرمز له بالرمز Gr وهو يعبر عن النسبة بين القوى المتولدة عن تيارات الحمل Buoyant forces والقوى المتولدة عن احتكاك طبقات المائع 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 بمقلوب درجة الحرارة المطلقه للمائع
- Δt = الفرق بين درجة حرارة السطح الساخن ودرجة الحرارة المتوسطة للمائع
- L = الطول المميز للسطح
- μ = لزوجة المائع محسوبه عند درجة الحرارة المتوسطة له

مع ملاحظة 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 الآتية :

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

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

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

وذلك فى حالة ما إذا كان قيمة

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

وتستخدم المعادلة الآتية :

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

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

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

وذلك إذا كان

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

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

$$h = 0.27 \left(\frac{\Delta t}{D} \right)^{0.25} \quad (9-23)$$

فى 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 ٥٢ ر. وات/متر°كلفن .

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

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

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

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

انتقال الحرارة بالاشعاع

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 مختلفة وتحمل هذه الاشعاعات طاقه حراريه تنتقل على شكل موجات كهرومغناطيسيه Electromagnetic سرعتها تساوى سرعة الضوء تعتمد اساسا على درجة حرارة الجسم المشع وطبيعة سطحه . وقد وجد نظريا وعمليا ان معدل انتقال الحرارة بالاشعاع يتناسب تناسباً طردياً مع مساحة السطح المشع والأس الرابع لدرجة حرارته المطلقه ويعبر عن هذه العلاقة قانون ستيفان - بولتسمان Stefan-Boltzmann كما يأتى :

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

حيث ان :

A	=	مساحة السطح المشع
T	=	درجة الحرارة المطلقة للسطح المشع
σ	=	ثابت ستيفان - بولتسمان Stefan-Boltzmann Constant
1.72×10^{-8}	=	$\text{BTU/hr. ft}^2 \text{ } ^\circ\text{F}^4$
5.67×10^{-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 فى الاعتبار طبيعة السطح المشع سواء كان املسا او خشنا . وعلى ذلك يجب تصحيح هذه المعادلة بمقدار ما يشعه الجسم حقيقة . فاذا كانت e هى نسبة الاشعاع للجسم الى النسبه بين مقدار مايشعه الجسم من طاقة حراريه الى الطاقه الحراريه الاشعاعيه الكليه لهذا الجسم ، اى ان هذه النسبه يجب ان تكون اقل من الواحد الصحيح . فتصير المعادلة السابقه (٩-٢٧) :

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

فإذا فرض انه يوجد هناك جسمان مشعان فى حيز لا يؤثر على طريقة اشعاعهما ، فان كمية الحرارة المتبادلة بينهما بالاشعاع تعتمد بالاضافه الى ماسبق على كيفية وضع هذان الجسمان بالنسبة لبعضهما حيث ان جميع الطاقة المشعه من كل جسم لاتقطع سطح الجسم الآخر . ففى حالة وجود جسم ساخن فى حيز محدود - مثل اسطوانه ذات قطر صغير موضوعة مركزيا داخل اسطوانه اخرى ذات - قطر كبير وسطحيهما متوازيان ، او مثل سطحى كرتين متوازيين مركزيا فان كمية الحرارة المتبادلة 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 بالنسبة للسطح المشع ، كما هى الحالة عند وجود ماسورة بخار تمر داخل حجرة كبيرة مثلا ، فانه يمكن اهمال مساحة السطح المشع A_1 اذا ماقورنت بمساحة الحيز A_2 وبذلك تصبح المعادلة السابقه معادلة رقم (٩-٢٩) 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 :

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

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

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 بالنسبة 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

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

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

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 بالإشعاع 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 :

$$T_1 = \text{درجة الحرارة الخارجية للسطح الاول}$$

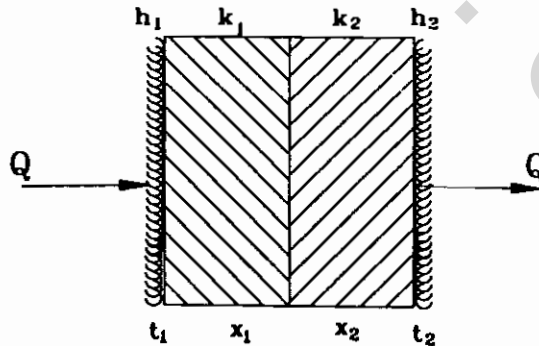
$$T_2 = \text{درجة الحرارة الخارجية للسطح الثانى}$$

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

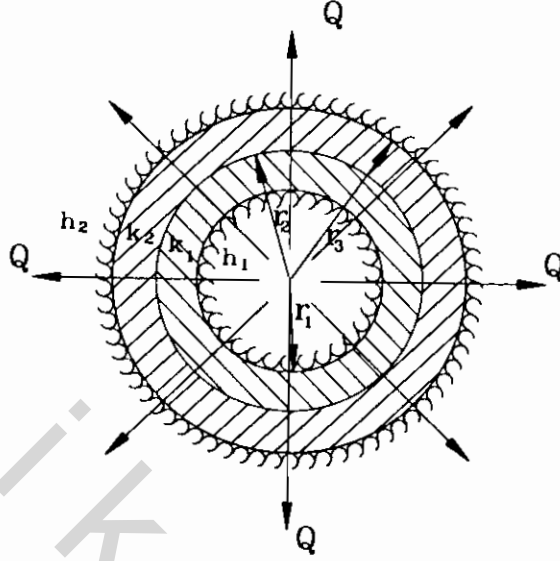
$$U = \text{المعامل الكلى المكافئ لانتقال الحرارة .}$$

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

وفى حالة وجود كرتين مركزيتين يمكن حساب المعامل الكلى المكافئ للتبادل الحرارى 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 :

$$A_1 = \pi D_1^2$$

$$A_2 = \pi D_2^2$$

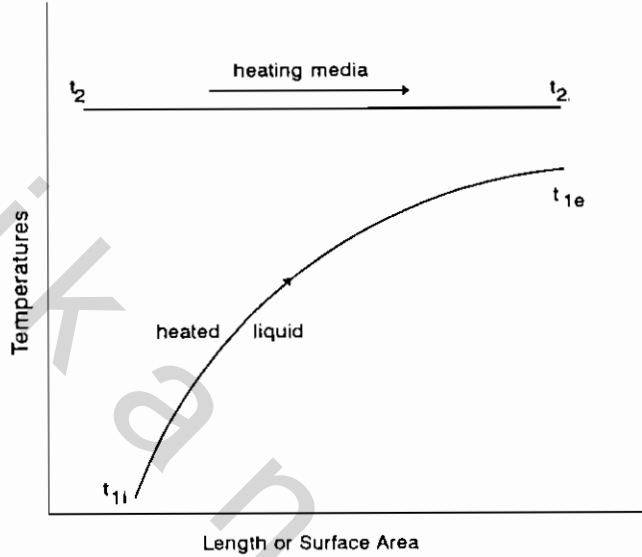
المبادلات الحرارية HEAT EXCHANGERS

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 الكافى بمدى صلاحيتها للاستعمال فى مختلف عمليات التصنيع . وحتى نضمن الانتقال السريع للحرارة بكفاءة عالية وبأقل فقد ممكن للحرارة ، نذكر فيما يأتى القواعد الأساسية 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 لا تتحمل 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 مثلاً الى حالة ماء عند درجة حرارة الغليان لضغط البخار المناظر .

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

كمية الحرارة المنتقلة من البخار = كمية الحرارة الممتصة 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 هى 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 ان :

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

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

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

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

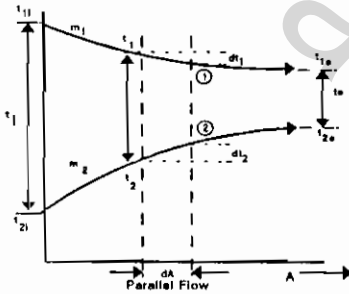
واذا كانت النسبة بين الفرق فى درجات حرارة الدخول الى الفرق فى درجات حرارة الخروج من المبادل الحرارى اقل من ٢ ، فانه يمكن استخدام المتوسط الحسابى للفرق فى درجات الحرارة بدلا من المتوسط اللوغاريتمى . اى ان :-

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

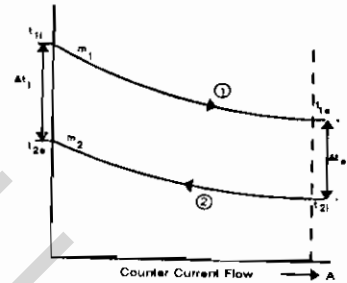
$$\Delta t_m = \frac{\Delta t_i + \Delta t_e}{2} \quad (9-44)$$

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

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

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 :

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

فإذا 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 في 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

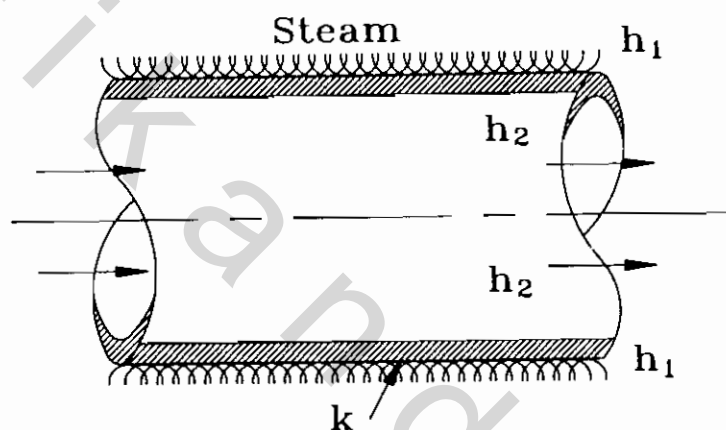
$$\Delta t_m = \frac{\Delta t_i - \Delta t_e}{\ln \frac{\Delta t_i}{\Delta t_e}} \quad (9-57)$$

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

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

تعبّر عن المتوسط اللوغاريتمي للفرق في درجات الحرارة (9-57) ومعادلة
وهو بطبيعة الحال مختلف عن المتوسط العددي أو الحسابي والذي يعبر عنه .

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



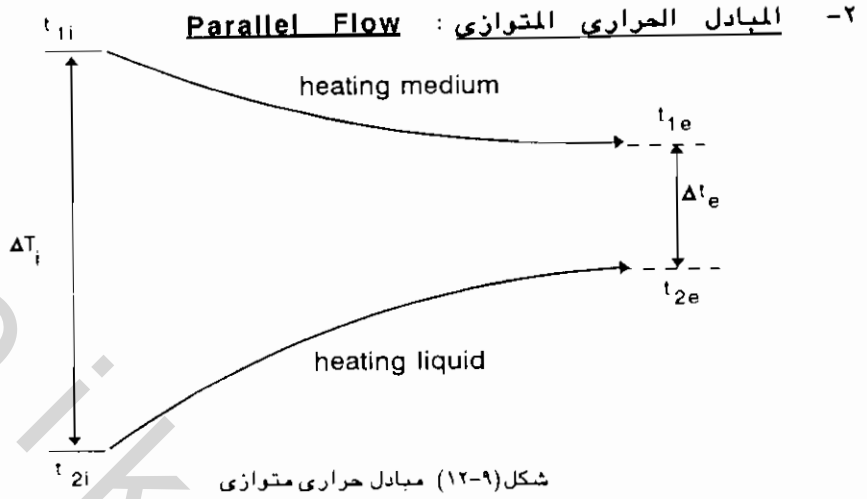
شكل رقم (٩-١١) انتقال الحرارة في تكثيف البخار داخل اسطوانة

ويجب حساب المعامل الكلي المكافئ، للتبادل الحراري منسوباً إلى مساحة
السطح المنتقلة منه الحرارة إلى السائل المراد تسخينه فمثلاً إذا كان التسخين يتم
بواسطة تكثيف بخار على السطح الخارجى لانبابيب 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 :

- A_1 = مساحة السطح الخارجى لانبابيب المبادل الحرارى .
- A_2 = مساحة السطح الداخلى لانبابيب المبادل الحرارى .



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 - يحسب الفرق المتوسط لدرجات حرارة المبادل فاذا كان :

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

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

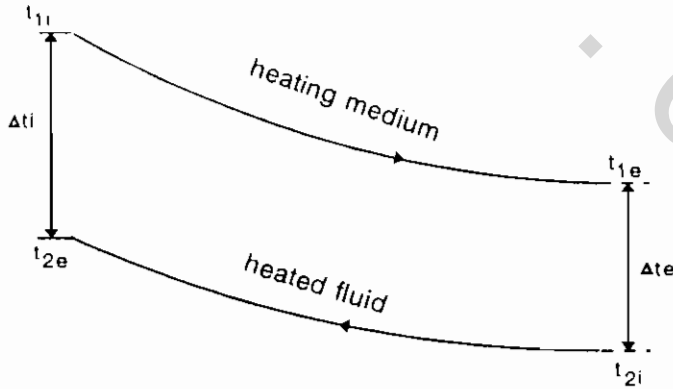
$$\Delta t_m = \frac{\Delta t_i - \Delta t_e}{\ln \frac{\Delta t_i}{\Delta t_e}} \quad (9-63)$$

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

د- تحسب المساحة السطحية للتبادل الحرارى من المعادلة الآتية :

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

٣- المبادل الحرارى العكسى او المتعاكس : Counter Flow



شكل (٩-١٣) مبادل حرارى متعاكس

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 ب سطح 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 منسوية 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	٩٣ ر ٧ °م
درجة حرارة دخول الماء	١٠ °م
درجة حرارة خروج الماء	٢٧ °م
معدل سريان السائل المراد تبريده	٤٥٠ كجم/ساعة
معدل سريان ماء التبريد	٩٠٠ كجم/ساعة
الحرارة النوعية للسائل	٢٥٥٠ جول/جم °م
الحرارة النوعية للماء	٤١٨٠ جول/جم °م

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 :

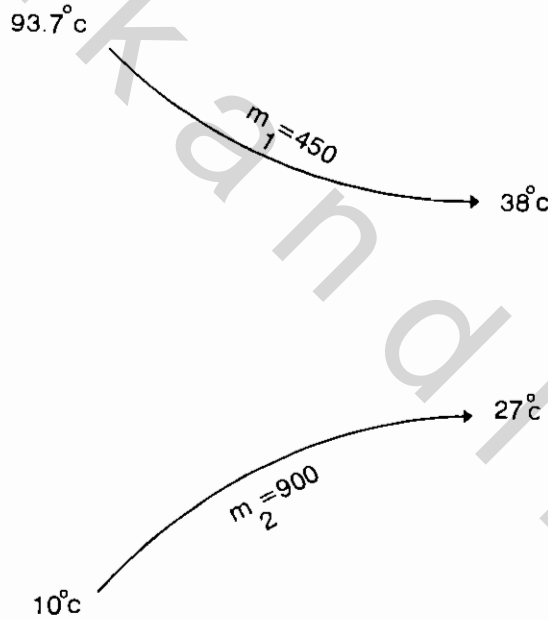
$$U = 1700 \text{ Watt/m}^2 \cdot \text{K}$$

الحل

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

$$\therefore t_{1e} = 38^\circ \text{C}$$

١- في حالة مبادل متوازي :



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

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

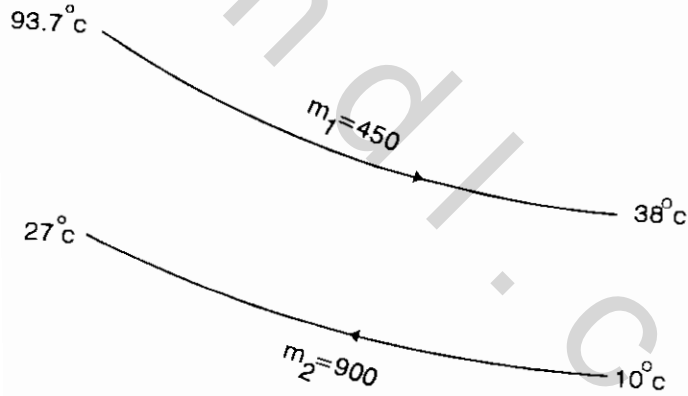
$$\frac{\Delta t_i}{\Delta t_e} = 7.6 > 2$$

وحيث أن

نستخدم المتوسط اللوغاريتمى للفرق فى درجات الحرارة

$$\begin{aligned}\therefore \Delta t_m &= \frac{\Delta t_i - \Delta t_e}{\ln \frac{\Delta t_i}{\Delta t_e}} \\ &= \frac{83.7 - 11}{\ln \frac{83.7}{11}} = \frac{72.7}{\ln 7.6} \\ &= \frac{72.7}{2.03} = 35.8 \text{ } ^\circ\text{C} \\ \therefore Q &= UA \Delta t_m \\ 63954 &= (A) (1700) (35.8) \\ \therefore A &= 1.05 \text{ m}^2\end{aligned}$$

ب- فى حالة مبادل عكسى :



$$\begin{aligned}\Delta t_i &= 93.7 - 27 = 66.7 \text{ } ^\circ\text{C} \\ \Delta t_e &= 38 - 10 = 28 \text{ } ^\circ\text{C} \\ \frac{\Delta t_i}{\Delta t_e} &= 2.38 > 2\end{aligned}$$

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 فى 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 جوده التوصيل الحرارى كالحديد والنحاس وما شابهها .

٢- عندما تكون الماده المنتقله اليها او منها حراره حجمها صغير نسبيا بحيث يمكن اهمال التغير فى درجة حرارتها من نقطه على سطحها مثلا مع نقطه فى منتصفها مثال ذلك عند معامله بذرة القطن حراريا لقتل حيويه 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:

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

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 :

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

حيث :

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

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

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 ٧٥ سم وطوله ٣٠ سم اذا وضع فجأة فى فرن درجة حرارته ثابتة عند ٣١٥°م بعد مضى ٤٠ دقيقة اذا كانت درجة حرارته الابتدائية ٢٠°م . علما بأن :

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

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

$$= ١٢ ر . كيلوكالوري/كجم.°م$$

$$= ٧٢٠٠ كجم/متر مكعب$$

الحرارة النوعية للصلب
كثافة الصلب

الحل

نقوم اولا بحساب مقدار المقاومة الحرارية النوعية على السطح لمعرفة مدى
امكاننا استخدام المعادلة 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 المعادلة المذكورة .

$$\text{المساحة الاجمالية للسطح} = \text{مساحة الاسطوانة} + \text{مساحة الطرفين}$$

$$2\pi r^2 + 2\pi r L =$$

$$\text{or Area} = 2\pi \left(\frac{7.5}{2 \times 100} \right)^2 + 2\pi \left(\frac{7.5}{2 \times 100} \right) \left(\frac{30}{100} \right)$$

$$= 0.0088 + 0.0707$$

$$= 0.0795 \text{ m}^2$$

$$\text{Volume} = \pi r^2 L$$

$$= \pi \left(\frac{7.5}{200} \right)^2 \left(\frac{30}{100} \right)$$

$$= 0.001325 \text{ m}^3$$

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

$$= - 0.347$$

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

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

الحالة الثانية :

١- عندما تكون المقاومة الحرارية للمادة المنتقلة منها أو إليها الحرارة كبيرة نسبياً إذا ما قورنت بالمقاومة الحرارية عند حدود المجموعه أى أنه يوجد تغيير سريع فى درجة حرارة سطح المادة وبالتالي لاتظل درجة حرارة سطح المادة ثابتة عند كل نقطة فيها .

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

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

وقد وجد أن :

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

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

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

ملحوظة :

Thermal Diffusivity

عادة ما نستخدم معامل الانتشار الحرارى

فى حسابات انتقال الحرارة ومقداره :-

$$\text{معامل الانتشار الحرارى} = \frac{\text{معامل انتقال الحرارة بالتوصيل}}{\text{الحرارة النوعية} \times \text{الكثافة}}$$

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

وحداته قدم مربع/ساعة بالوحدات الانجليزیه او متر مربع/ساعة بالوحدات المتريه .

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 = ١٣٥ كيلو كالورى/ساعه متر^٢ م°
 معامل انتقال الحرارة بالتوصيل لمادة الحائط = ٤ كيلو كالورى/ساعه متر م°
 الكثافه النوعيه لمادة الحائط = ٢٥٩٠ كجم/متر^٣
 الحرارة النوعيه لمادة الحائط = ٠.٣ كيلو كالورى/كجم م°

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

الحل

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

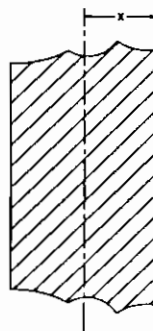
ونلاحظ هنا ان قيمة x تساوى نصف سمك الحائط تساوى ٣.٠ سم

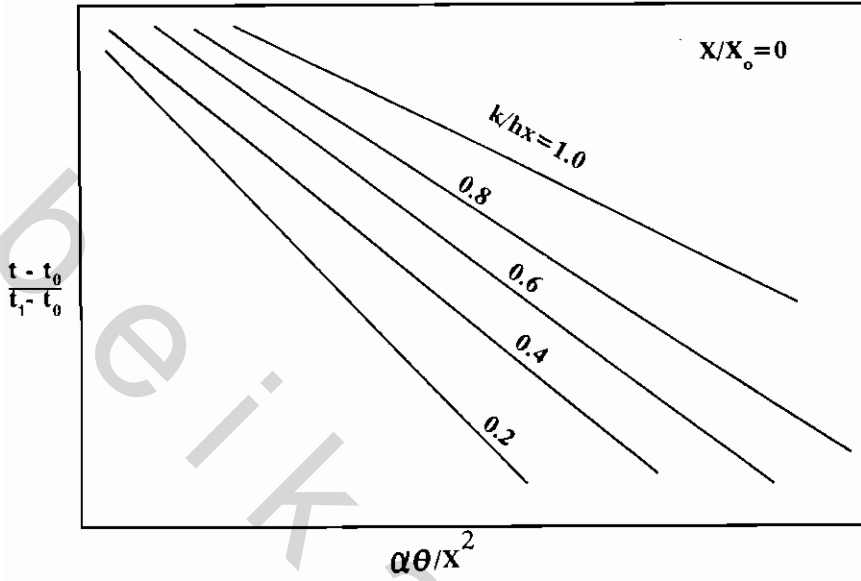
$$\alpha = \frac{k}{C_p \cdot \rho}$$

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

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

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





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 .

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

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

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

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

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

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

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

وهى درجة حرارة منتصف الحائط (t)

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

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

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

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

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°م ودرجة حرارة الجو المحيط -٤°م وتعرضت هذه الثمار لها مدة ٢٥°ساعة مع اعتبار الخصائص الآتية :

معامل انتقال الحرارة بالنقل على سطح الثمار = ٢ كيلو كالورى/ساعة متر^٢ م°
 معامل انتقال الحرارة بالتوصيل لداخل الثمار = ١٥.٠ كيلو كالورى/ساعة متر^٢ 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 للأشكال 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 لحو الفرن = ٣٠٠ كيلو كالورى/ساعة متر^٢ م°

معامل انتقال الحرارة بالتوصيل للانشون = ١٣.٠ كيلو كالورى/ساعة متر^٢ 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 بالنسبة للقطر .

نستخدم خرائط انتقال الحرارة فى اسطوانه لانهاية الطول لايجاد درجة

$$\left(\frac{r}{r_o}\right) = 0 \quad \text{حرارة المنتصف اى اننا نستخدم الخريطة الاولى حيث}$$

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

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

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 :

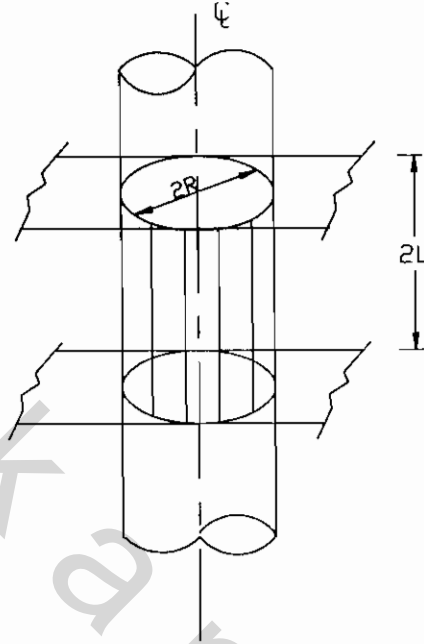
$$\frac{t - t_o}{t_1 - t_o} = 0.35$$

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

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

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

∴ درجة حرارة المنتصف (t)



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

نلاحظ من الامثلة السابقة 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 الاسطوانة كبير بالنسبة لقطرها او ان طول الحائط في الاتجاهين الاخرين كبير بالنسبة لسماك الحائط . ولكن عادة مانقابل من الناحية العملية ان انتقال الحرارة يكون في اكثر من اتجاه مثال ذلك عندما نعقم المعلبات الغذائية باشكالها المختلفة سواء على شكل اسطوانى او على شكل متوازى اضلاع شكل (٩-١٥) حيث ان اطوال المعلبات في الاتجاهات (الاحداثيات) المختلفة تكون متقاربة وعلى ذلك لايمكننا اهمال الانتقال الحراري فيها ويمكن ايجاد الحلول الرياضية لهذه الحالات ولكن من الوجهة العملية فاننا نعتبر ان الشكل الموجود مكون من عدة مستويات متقاطعة مع بعضها لتشكلية . ونقوم بحساب قيمة معامل درجة الحرارة .

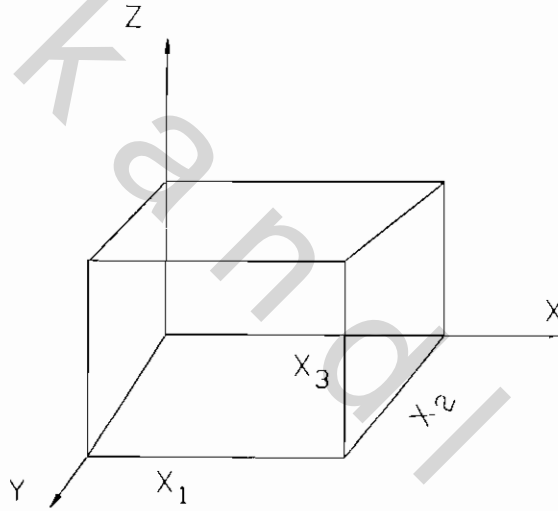
$$\frac{t - t_0}{t_1 - t_0}$$

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 :

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

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 المضلع في الاتجاهات
الثلاثة .

وتحسب درجة الحرارة من المعادلة الآتية :

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

مضلع Slab 1 Slab 2 Slab 3

مثال (١) :

عُبئت مادة غذائية ذات محتوى رطوبى مرتفع فى علب رقم ٢ (القطر الصافى ٨ر٤ سم والارتفاع الصافى ١٠ر٦ سم) وكانت المادة الغذائية تملأ العلب تماما وكثافتها ١.٩٠ كجم/متر^٣ ودرجة حرارتها الابتدائية ٨٢° م. وضعت المعلبات فى معقم يستخدم بخار درجة حرارته ١١٥° م لمدة ثلاثة ساعات وذلك بغرض معاملة المعلبات حراريا - احسب درجة حرارة منتصف الغذاء المعبأ اذا علمت ان :

الحرارة النوعية للمادة الغذائية المعبأ = ٨٤٠ كيلوكالورى/كجم.°م
معامل انتقال الحرارة بالنقل للبخار = ١٥٠٠ كيلوكالورى/ساعة.متر^٢.°م
معامل انتقال الحرارة بالتوصيل للمادة الغذائية = ١١٤٠ كيلوكالورى/ساعة.متر^٥

الحل

معامل الانتشار الحرارى (α) Thermal diffusivity,

$$\alpha = \frac{k}{C_p \cdot \rho} = \frac{(0.114)}{(0.84) (1090)} = 0.000125 \text{ m}^2/\text{hr.}$$

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

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

وبعد ذلك يتم الحل على مرحلتين :

الاولى باعتبار ان الاسطوانه ذات طول لانهاى والمرحلة الثانیه 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 المقلب الغذائي من حاصل ضرب النتيجة في كل من (أ) ، (ب) .

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

Can

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

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

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

مثال (٢) :

إذا استبدلت العلبة الاسطوانية الشكل في المثال رقم (١) بأخرى على شكل متوازي أضلاع بالمقاسات الآتية $72 \times 86 \times 25$ سم إحسب درجة حرارة المنتصف تحت نفس الظروف السابقة .

الحل

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

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

$$\text{Half-length of can in the third direction} = \frac{15.25}{200} = 0.0762 \text{ m}$$

أ- الاتجاه الأول: (First direction)

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

~ Zero

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

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

ب- الاتجاه الثاني: (Second direction)

Reciprocal Biot number =

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

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

$$\therefore \left(\frac{t - t_o}{t_1 - t_o} \right) = 0.72$$

x_2

ج- الاتجاه الثالث : (Third direction)

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

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

$$\therefore \left(\frac{t - t_o}{t_1 - t_o} \right) = 0.96$$

x_3

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

$$\therefore \left(\frac{t - t_o}{t_1 - t_o} \right) = (0.6)(0.72)(0.96) = 0.415$$

Can

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

$$\therefore t = 115 - 13.7$$

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

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 ايزوسيرمالى . 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 كيلو جرام من الهواء عند ضغط مطلق مقداره ٦٨٩ كيلو باسكال تشغل حجم مقداره ٣ر . متر مكعب . تمددت هذه الكمية الى حجم مقداره ١ر٤ 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 ايزوسيرمالى (درجة حرارة ثابتة).

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

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

٧- ١ متر مكعب من الهواء تحت ضغط مانومتري ١٢٣ ميجاباسكال ودرجة حراره ١٥°م تعدد الى ٢٥٠ ر. متر مكعب بدون امتصاص او فقد اى كمية من الحراره اى ان الاجراء ادياباتيكي (١٤ = ٧). اوجد وزن الهواء والضغط ودرجة الحراره بعد التمدد ما مقدار الشغل الناتج عن هذا التمدد ؟

٨- اسطوانه من الحديد الصلب مساحة قاعدتها ٠.٦ ر. متر مربع وارتفاعها ٤٥ سم بها كمية من الهواء تحت ضغط مانومتري مقداره ٦٨٩ كيلو باسكال وفى درجة حراره ١٥°م اذا كان الثابت النوعى للهواء ٢٨٩ نيوتن . متر/كجم . °م احسب كمية الهواء الموجوده داخل الاسطوانه .

٩- ٣ ر. متر مكعب من الهواء تحت ضغط مطلق مقداره ٢٧٥ كيلو باسكال تمددت الى ٧ ر. متر مكعب اوجد الشغل الناتج عن هذا التمدد فى كل من الحالات الآتية :-
 أ - تحت ضغط ثابت .
 ب- تحت درجة حراره ثابتة (ايزوسيرمالى) .
 ج- ادياباتيكي .

١٠- ضاغط هواء ذو وجه واحد واسطوانه واحده قطرها ٢٢ سم وطول مشوار الضاغط ٢٢ سم ويدخل الهواء الاسطوانه عند ضغط ١.٢ كيلوباسكال ودرجة حراره ١٥°م ثم يضغط ادياباتيكا الى ٦٢٠ 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 التغير فى الطاقه الكامنه ر. كجم من الهواء عند درجة حراره ١-°م اذا ضغط الهواء الى $\frac{1}{5}$ حجمه الاصلى وكانت عملية الضغط تتبع القانون $p v^{1.3} = C$ علما بان :

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

١٢- ١ ر. متر مكعب من الهواء تحت ضغط مطلق ١٤٣ ميجاباسكال ودرجة حراره ١٥°م تعدد تحت ضغط ثابت الى ٢٥٠ ر. متر مكعب . اوجد درجة الحراره فى نهايه عملية الضغط وكذلك مقدار الشغل الناتج عن تمدد الهواء ومقدار التغير فى الطاقه الكامنه علما بان :

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

١٣- غاز ما يتبع القانون الآتى :

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

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

١٤- ضاغط هواء ذو وجه واحد واسطوانة واحدة قطرها ٧٥سم وطول مشوار الضاغط ١٥سم ، يدخل الهواء اسطوانة الضاغط عند ضغط مطلق ١.٣ كيلوباسكال ودرجة حرارة ١٥°م ويخرج الهواء المضغوط عند ضغط مطلق مقداره ١٤ ر 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 المحطة بالهواء المضغوط ويدخل الهواء الى الضاغط عند ضغط مطلق مقداره ١.٣ كيلوباسكال وكانت عملية الضغط ادياباتيكية ($\gamma = 1.4$) مامقدار اقل قدرة حصانية تلزم لادارة هذا الضاغط ؟ .

١٦- هواء عند ضغط مطلق مقداره ١.٣ كيلوباسكال ودرجة حرارة ١-°م يراد ضغطه الى ١.٣٤ كيلوباسكال بواسطة ضاغط هواء ترددى ذو اسطوانة واحدة 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 التى اكتسبتها مياه التبريد لكل ١ كجم من الهواء .
- ٣- اذا استخدم رذاذ ماء داخل اسطوانة الضاغط لتبريد الهواء اثناء عملية الانضغاط حتى تكون درجة حرارته ثابتة عند درجة دخول الهواء الى الضاغط ماذا تكون كمية الشغل المتوفرة من هذه العملية ؟

٤- إذا 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 ركجم/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 ر كجم/سم^٢ .

٢١- ماهى كمية البخار اللازم لتسخين ١٨٠٠ كجم من محلول ملهى حرارته النوعيه ٨٨ ر 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 ر . وكفاءة جهاز التسخين ٨٠٪ وحرارة الماء المكثف ٥٤°م .

٢٣- ماهى كمية الوقود وتكاليفه اللازمه لعملية بسترة ٧٥٢٠ كجم من اللبن على درجة 65°C بواسطة بخار ضغطه ٢ر٤ كجم/سم^٢ وجفافه ٩٥٪ اذا علمت ان حرارته النوعيه ٩ وان كفاءة جهاز البسترة ٧٢٪ ويخرج الماء المكثف عند درجة حرارة 64°C وان الغلايه كفاءتها ٧٠٪ وتعمل بوقود قيمته الحراريه ١٠٠٠٠ كيلوكالورى/كجم وثمان الكيلو جرام الواحد منه ٦٠ قرشا وان حرارة اللبن قبل البسترة تماثل حرارة الجو اى حوالى 26°C .

٢٤- باستخدام جداول البخار اوجد كمية الحراره اللازمه لتحميص واحد كجم من البخار الجاف عند ضغط مطلق مقداره ٧ كجم/سم^٢ الى درجة حرارة 200°C . احسب الحراره النوعيه للبخار المحمص.

٢٥- احسب الحراره الكليه لبخار محمص عند ضغط مطلق ١٤ كجم/سم^٢ ودرجة حرارة 222°C اعتبر ان الحراره النوعيه للبخار المحمص = ٥٥٠ ر. قارن النتيجة باستخدام جداول البخار .

٢٦- احسب الحراره اللازمه لتحويل ٢ كجم من بخار رطب عند ضغط ٢ر٥ كجم/سم^٢ ونسبة جفافه ٨٠٪ الى بخار محمص درجة حرارته 200°C .

٢٧- احسب وزن بخار رطب حجمه ١ر٠٠ متر مكعب عند ضغط مطلق ٨ر٠ كجم/سم^٢ وجودته ٧٠٪. ماهى الحراره 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 260°C .

٢٩- احسب حجم واحد كجم من بخار محمص عند ضغط مطلق مقداره ١٠ كجم/سم^٢ ودرجة حرارة 280°C مستخدما :
أ - القانون العام للغازات .
ب- قانون كالنذر.

٣٠- اوجد الطاقة الكامنه لكجم واحد من بخار محمص عند ضغط مطلق مقداره ١٠ كجم/سم^٢ ودرجة حرارة ٢٨٠°م . 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 ٤٩ كجم/سم^٢ ودرجة الحرارة ١٤٠°م اوجد:
 أ - وزن الهواء الموجود مع كل كجم بخار .
 ب- الضغط فى الاناء المغلق عندما تصل درجة حرارة المخلوط ١٩٠°م علما بأنه مازال يوجد بعض الماء فى الاناء .

٣٢- حجم غلاية تجارب صغيرة ١٧ م^٣ تحتوى على ٥٠ كجم من الماء عند ضغط مطلق ١٠٢ كيلوباسكال ودرجة حرارة ١٥°م ويشغل الهواء باقى حجم الغلاية . وعند تشغيل الغلاية وصلت درجة حرارة المخلوط ١٤٠°م وكان لايزال محبس البخار العمومى مغلق تماما . احسب الضغط الموجود فى الغلاية عند هذه الدرجة .

٣٣- يتم الحصول على البيانات التالية للزوجة الظاهرية لعصير الخوخ المصفى عند ٣٠°م وذلك باستخدام ريومتر انبوى قطره ٢٨ ر . سم وطوله ١٠٠ سم.

اللزوجة الظاهرية ٤.٦ . ٣.١ . ٢.٥٥ . ٢.٩ . ١.٧٤ . ١.٦٤ . ١.١٠ . ٠.٧٥ .
 (باسكال - ثانيه)

معدل القص ١٢١ ٢.٥ ٢٨٥ ٢٨ ٥.٥ ٧٢ ١٣٠ ٢١٥
 (١/ثانيه)
 احسب كل من n ، k .

٣٤- قارن بين الفقد فى الضغط الناتج عن الاحتكاك عند سريان كلا من الماء ومركز الموز المصفى كل على حده ، فى انبوب قطره الداخلى ٢٥ ر سم ومعدل التصريف ٢٥ ر كجم/ثانيه وطول الانبوب ٢ امتار وخصائص مركز الموز $k = ٦$ باسكال . ثانيهⁿ ، $n = ٤.٥٤$. والكثافه ٩٧٥ كجم/متر مكعب . علما بان لزوجة المياه النقيه تساوى ١٤٨٨ x ١٠^{-٢} باسكال . ثانيه .

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

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

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

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

احسب كل من k , n .

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 k , n .

٢٨- احسب قيمة رقم رينولدز Re لتحديد نوع السريان لمركز الطماطم ٢٠٪ مواد صلبة ذو الخصائص الآتية : $k = 18 \text{ Pa.s}^n$, $n = 0.4$ اذا كان مركز الطماطم يسرى فى انبوب قطره ٢ سم عند سرعة سريان تساوى ١.٢ متر/ث ماذا تكون قيمة Re في حالة استخدام مياه

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

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

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

٤٠- يلزم تشغيل مروحة هواء بالمواصفات الآتية : ١٧ م^٣/ق عند ضغط ٥ سم ماء .

فاذا فرض انها تشابه من ناحية التصميم مروحة هواء تعمل عند المواصفات الآتية :

٢٨ م^٣/ق عند ضغط ٢٧ سم ماء وعدد لفاتها ١٠٠٠ لفة/دقيقه وقطر قرص الريش ٩٠ سم ومقدار القدرة الحصانية اللازمه لادارتها ٢٧ 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 الذي يدور عند ١٠٠٠ لفة/دقيقه . إذا أريد تقليل تصرفها إلى ٣م^٣/ق . ما مقدار السرعة والقدرة الجديدة للمروحة . احسب النسبة المئوية في تخفيض قدرتها الحصانية .

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

٤٣- احسب القدره الحصانية اللازمه لرفع ٧٥ لتر/ق من الماء من خزان الى آخر على ارتفاع ٦٥م علما بان مقدار الفقد في الرفع نتيجة لاحتكاك السائل في المواسير يوازي ٥٪ من مقدار الرفع المانومتري ، ومقدار سرعة سريان الماء في المواسير ٢م/ثانيه .

٤٤- اوجد مقدار التصريف بوحدات م^٣/دقيقه لظلمية تردديه مكونه من اسطوانه واحدة لدفع لبن وقطر الاسطوانه ١٠سم وطول مشوار المكبس ١٥سم والكفاءه الحجميه للظلميه ٩٥٪ ، وعدد لفات عمود المحرك ١٠٠ لفة/دقيقه .

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

٤٦- آلة تجنيس لبن تعمل عند ضغط ١٧ ميجاباسكال سعتها ٢٢ لتر/ق اذا كانت كفاءة الظلميه المستخدمه في الجهاز ٨٢٪ اوجد القدره الحصانية للموتور اللازم لإدارة الظلميه . ماذا تكون القدره الحصانية اللازمه لإدارة نفس الظلميه اذا انخفض ضغط التشغيل الى ١٠ ميجاباسكال اهمل الاحتكاك داخل ماسورة التوصيل . (٤ لتر لبن في الدقيقه = ٢٣ كجم لبن في الساعه) .

٤٧- مضخه تدور بسرعه ١٧٦٠ لفة/دقيقه ومقدار تصرفها ٤٧٢ لتر/ق عند رفع مانومتري مقداره ١٥م ويلزم لإدارتها ١٦٢ حصان ميكانيكي . إذا زادت السرعه الى ٢١٠٠ لفة/دقيقه . اوجد كل من مقدار التصريف 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:-

قطر ماسورة التصريف الخارجى لمياه الطلمبه	٥سم
سرعة المياه فى ماسورة الخروج	٤م/ث
الارتفاع الاستاتيكي	١١متر
مقدار الفقد فى الرفع	٠.٦ متر
سرعة الموتور اللازمه لادارة الطلمبه	١٤٥٠ لفه/دقيقه
القدرة الحصانيه للموتور	٢ حصان
كفاءة الموتور	٩٥٪
كفاءة توصيل الحركه الميكانيكيه للمضخه	٨٥٪
احسب الكفاءة الهيدروليكيه للمضخه .	

٥٠- اذا زادت السرعه فى المسائله السابقه الى ٢٠٠٠ 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 (كثافته ١.٢٦ كجم/م^٣) الى جهاز تجنيس تحت ضغط مرتفع مقداره 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 طللمبه مياه من النوع الطارد المركزيه وجد الآتى :

قطر ماسورة تصريف المياه	٥سم
سرعة المياه فى ماسورة التصريف	٨م/ث
الرفع الاستاتيكي	١٢م
مقدار الفقد فى الرفع نتيجة احتكاك السائل	٥سم
سرعة الموتور اللازمه لادارة الطلمبه	١٤٥٠ لفه/دقيقه
القدرة الحصانيه للموتور	٧ حصان ميكانيكي

كفاءة الموتور ٩٥٪
الكفاءة الميكانيكية لتوصيل الحركة للطلطمه ٨٥٪

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

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

٥٤- غرفة تبريد درجة حرارتها ٤٥°م معزوله بطبقة من الفلين بسمك ٥سم ومساحتها السطحيه ٤م^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 ٢٠سم ومعامل توصيلها ١٨ر. فاذا كانت درجة حرارة السطح الداخلى ٩٨°م ، والخارجى ٣٢°م - احسب كمية الحراره المفقوده فى الساعه .

٥٦- قدر نسبة الانخفاض فى الفقد فى كمية الحراره نتيجة لوضع الطبقة الثانيه فى المساله 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 الداخل ١٥°م ومن الخارج ٢٥°م . اعتبر ان معامل انتقال الحراره بالتوصيل للصوف الزجاجى ١٢ كيلوكالورى/ساعه.متر.°م

٥٨- حائط من الحديد سمكه ٢٥ر سم ($k = ٠.١٢$ كيلوكالورى/ساعه.متر.°م) يفصل طبقتين من الهواء الساخن كل منهما عند درجة حرارة ٣١٥°م ، ٥٠°م على

الترتيب ، ومعامل انتقال الحرارة بالحمل لكل منهما هو $h = ٢٠$ كيلو كالورى/ساعة.متر^٢.
احسب معدل انتقال الحرارة فى الحائط لكل متر مربع من السطح .

٥٩- طبقه من الهواء ($k = ٠.١$ كيلو كالورى/ساعة.متر^٢.م) بسمك ٠.٠١ سم تفصل حائط مصنوع من الحديد بسمك ١٢ سم عن حائط مصنوع من الالومنيوم بسمك ٢٥ سم . احسب معدل انتقال الحرارة لكل متر مربع اذا كانت درجة حرارة حائط الحديد من الخارج ٢٠.٥ °م ودرجة حرارة حائط الالومنيوم من الخارج ٢٨ °م 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 : ٢٢ سم طوب حرارى ، ١٢ سم مادة عازله ، ١٠ سم من طوب احمر اذا كانت درجة حرارة السطح الداخلى والخارجى للحائط ١٠٠ °م ، ٤٠ °م على الترتيب علما بان :
 k للطوب الحرارى = ١٠٠ ، k للطوب الاحمر = ١٤٩ و k للمادة العازله = ١٢ . كيلو كالورى/ساعة.متر^٢ .

٦١- احسب درجة حرارة السطح الخارجى لحائط مساحة سطحه ١٠ متر مربع ، اذا كان معدل الفقد فى الحرارة منه الى الجو الخارجى ٨٠٠ كيلو كالورى/ساعة ، درجة حرارة الجو الخارجى ٢٠ °م 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 = درجة حرارة السطح الخارجى للماسورة (°م)

t_o = درجة حرارة الجو الملامس للسطح الخارجى للماسورة (°م).

D = 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 الماسورة لكل متر طولى منها ٢٠٥ كيلوكالورى/ساعه .متر طولى . احسب الاس " n " فى المعادله السابقه .

٦٣- ماسورة بخار قطرها الخارجى ١٧سم مغطاه بطبقة من مادة عازله سمكها ٥سم (k للمادة العازله = ٠.٨ ر كيلوكالورى/ساعه.متر.°م). ومغلفه بطبقة اخرى من مادة عازله بسمك ٤سم (k للمادة العازله = ٠.٦ ر كيلوكالورى/ساعه.متر.°م). احسب كمية الحرارة المفقوده من سطح الماسورة اذا كان طولها ١٢٠ متر ، علما بان درجة حرارة السطح الداخلى والخارجى للمواد العازله ٢٦°م ، ٢٨°م على الترتيب اهمل مقاومة سمك جدار الماسورة 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 المسأله السابقه رماديه ونسبة اشعاعها ٨ ر ، ٦ ر . ماهى كمية الاشعاع الحرارى المتبادل لكل متر مربع من الاسطح .

٦٧- احسب كمية الحرارة المشعه من سطح ماسورة إذا كان نسبة اشعاعه ٨ ر . ، قطرها الخارجى ٩ سم ودرجة حرارة سطحها الخارجى ١٠٠°م وتمر 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 اللازمة للتبريد ٣٥٤ كجم/ساعة
الحرارة النوعية للزيت ٥ ر كيلوكالورى/كجم.°م
أوجد :

أ - درجة حرارة خروج الزيت.

ب- المساحة السطحية لكل ماسوره من مواسير مرور الزيت .

اعتبر ان المعامل الكلى المكافى لانتقال الحرارة $U = 300$ كيلوكالورى/ساعة.°م.^٢

٦٩- مبادل حرارى يستخدم لتبريد سائل بواسطة ماء بارد بالخواص 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/ساعة

معدل ماء التبريد ٩٠٧ كجم/ساعة

الحرارة النوعية للسائل ٦ كيلوكالورى/كجم.°م
احسب :

أ- درجة حرارة خروج السائل .

ب- المساحة السطحية 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 رطباً ودرجة جفافه ٩٦٪ عند ضغط مطلق مقداره ٣٥ 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 المسائله السابقه لتسخين ٥٠٠

كجم من اللبن من درجة حرارة ٣٥°م الى ٨٥°م علماً بان كفاءة جهاز البسترة

٨٥٪ والحرارة النوعية للبن ٩٣ ر . كيلو كالورى/كجم.°م.

٧٢- مبادل حراري يستخدم لتبريد سائل بواسطة ماء بارد بالمواصفات الآتية :-
درجة حرارة دخول السائل 93°C ، درجة حرارة دخول الماء 7°C ، ودرجة حرارة خروج الماء 22°C ، وزن السائل المراد تبريده 354 كجم/ساعة ، كمية الماء اللازم للتبريد 725 كجم/ساعة : الحرارة النوعية للسائل 72 ر. كيلوكالوري/كجم. $^{\circ}\text{C}$. 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°C ويشغل الهواء باقى حجم الغلاية . احسب :

١- وزن الهواء الموجود بالغلاية مع كل كجم بخار .

٢- الضغط الكلى فى الغلاية عندما تصل درجة حرارة المخلوط الى 150°C .
علما بان محبس البخار العمومى كان لا يزال مغلقا .

٣- الحرارة الكلية للبخار اذا كانت جودته 90%

(اعتبر ان الثابت العام للغازات 298 كجم متر/كجم $^{\circ}\text{C}$).

٧٤- مصنع صغير لجسترة 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°C الى 65°C

ويتكثف البخار المستخدم على درجة 36°C . احسب :

١- جودة البخار الناتج من عملية الخلط .

٢- كمية اللبن التى يمكن تسخينها بمخلوط البخار .

علما بان $c_p = 0.93 \text{ kcal/kg. }^{\circ}\text{C}$

٧٥- ضاغط هواء يعمل بقوة الطرد المركزيه لضغط ٣ر. 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 بسرعة ١٠٠٠ لفة فى الدقيقه واريد زيادة ضغط الهواء بالضاغط الى ٨٢٧ كيلوباسكال فما مقدار الزيادة المنتظرة فى سرعة دوران عمود ادارة الضاغط ($\gamma = ١٤$) .

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 ٣٢° م . فاذا كان المعامل الكلى المكافى لانتقال الحرارة بين الماء الساخن وجدار مواسير المبادل الداخليه والماء البارد يساوى ٤٤٨ كيلو كالورى/ساعه.متر^٢. م° .
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 ٣٢° م الى ٢١° م وبقيت درجة حرارة دخول الماء الساخن ثابتة عند ٨٨° م مع عدم تغير مقدار سريان كل من الماء البارد والساخن ، احسب درجة حرارة خروج الماء البارد من المبادل (اعتبر ان المعامل الكلى المكافى لانتقال الحرارة ظل ثابتا كذلك) .

٧٧- جهاز بسترة يستخدم لتسخين كمية من اللبن من درجة ٢١° م الى ٦٦° م (الحراره النوعيه للبن ٩٣ كيلو كالورى/كجم° م) وكفاءته ٨٥٪ - فاذا كان البخار المستخدم فى التسخين هو عباره عن مخلوط من ثلاثة انواع من البخار :
الاول مقداره ١٠ كجم/ساعه بخار محمص عند ضغط مطلق ١٠ كجم/سم^٢ ودرجة حرارة ٢٠٠° م ، والثانى مقداره ١٥ كجم/ساعه بخار جاف ومشبع 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 التى يمكن تسخينها بمخلوط البخار .

٧٨- مبادل حرارى يستخدم لبسترة واحد كيلوجرام فى الدقيقة من عصير البرتقال وذلك بواسطة تكثيف بخار رطب فى الغلاف الخارجى المحيط بمواسير المبادل الحرارى . فإذا كان ضغط البخار المستخدم فى المبادل الحرارى يساوى نصف كجم/سم^٢ ونسبة جفافه ٩٠٪ وطول مواسير المبادل خمسة امتار، القطر الداخلى لكل منها ٢سم والخارجى ٢.٥سم ومصنوعه من النحاس الاحمر ذو معامل انتقال حرارة بالتوصيل مقداره ٢٠٠ كيلوكالورى/متر.ساعة. °م. وإذا كان معامل انتقال الحرارة بالحمل لعصير البرتقال ٢٠ كيلوكالورى/متر مربع.ساعة. °م ، ومعامل انتقال الحرارة بالحمل للبخار المستخدم ١٥ كيلوكالورى/متر مربع.ساعة. °م ودرجة حرارة دخول عصير البرتقال الى المبادل ٢٥°م ودرجة حرارة خروجه ٦٠°م وحرارته النوعيه ٨٠. كيلوكالورى/كجم °م. احسب :

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

ب- كمية البخار المتكثفه فى الساعه .

ج - كمية الوقود المستخدم فى الغلايه لتوليد هذا البخار اذا علمت ان القيمه الحراريه للوقود ١٠.٠٠٠ كيلوكالورى/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 فى 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 التى يمكن تسخينها بمخلوط البخار .

٨٠- استخدمت علب على شكل متوازي مستطيلات مقاس $7 \times 35 \times 10$ سم لتعبئة

لحم اللانشون بدون ترك أى فراغ ، وكانت درجة حرارة اللحم الابتدائية 82°م ، وضعت المعلبات فى معقم يستخدم بخار درجة حرارته 115°م لمدة ساعتين وذلك بغرض معاملة المعلبات حراريا . احسب درجة حرارة منتصف اللحم المعلب اذا علمت ان :

$$\begin{aligned} \text{الحرارة النوعية للحم} &= 0.84 \text{ كيلو كالورى/كجم.}^{\circ}\text{م} \\ \text{كثافة اللحم} &= 1.88 \text{ كجم/متر مكعب} \end{aligned}$$

$$\text{معامل انتقال الحرارة بالتوصيل للحم} = 0.11 \text{ كيلو كالورى/ساعة.متر.}^{\circ}\text{م}$$

$$\text{معامل انتقال الحرارة بالنقل للبخار} = 1490 \text{ كيلو كالورى/ساعة.متر مربع.}^{\circ}\text{م}$$

٨١- استخدمت علب رقم ٢ (القطر الصافى ٨ سم والارتفاع الصافى ١٠.٢٥ سم) فى تعبئة لبن مكثف ومحلى كثافته ٨٨ ر. كجم/متر مكعب ودرجة حرارته الابتدائية 60°م . وضعت المعلبات فى معقم يستخدم بخار درجة حرارته 92°م لمدة ساعة واحدة وذلك بغرض معاملة المعلبات حراريا ، فاذا كان فراغ العلبة ٦ رسم ، احسب درجة حرارة منتصف الغذاء المعلب اذا علمت ان :

$$\text{الحرارة النوعية للبن المكثف} = 0.94 \text{ كيلو كالورى/كجم.}^{\circ}\text{م}$$

$$\text{معامل انتقال الحرارة بالنقل للبخار} = 1490 \text{ كيلو كالورى/ساعة.متر مربع.}^{\circ}\text{م}$$

$$\text{معامل انتقال الحرارة بالتوصيل للبن المكثف} = 0.11 \text{ كيلو كالورى/ساعة.متر.}^{\circ}\text{م}$$

٨٢- قطعة من اللانشون على شكل اسطوانة قطرها ٧.٣٥ سم وطولها ١٤.٧ سم وضعت فى فرن درجة حرارته 115°م بغرض معاملتها حراريا ولمدة ساعتين . فاذا كانت درجة حرارة اللانشون الابتدائية 21°م احسب درجة حرارة منتصف اللانشون اذا كان :

$$\text{معامل انتقال الحرارة بالنقل لحو الفرن} = 298 \text{ كيلو كالورى/ساعة.متر مربع.}^{\circ}\text{م}$$

$$\text{معامل انتقال الحرارة بالتوصيل للانشون} = 0.12 \text{ كيلو كالورى/ساعة.متر.}^{\circ}\text{م}$$

$$= 0.7 \text{ ر}$$

الوزن النوعي للانشون

$$\text{الحرارة النوعية للانشون} = 0.8 \text{ كيلو كالورى/كجم.}^{\circ}\text{م}$$

٨٣- بطيخه على شكل كرة قطرها ٢٢سم ودرجة حرارتها الابتدائية 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 الحرارة بالنقل لجو الثلاجه = ٧٥. كيلوكالورى/ساعة.متر مربع.°م

معامل انتقال الحرارة بالتوصيل للبطيخه = ١١. كيلوكالورى/ساعة.متر.°م

الحرارة النوعية للبطيخه = ٩. كيلوكالورى/كجم.°م

كثافة البطيخه = ١٠٠١ كيلوجرام /متر مكعب

٨٤- ملعب بيوريه بسلة على شكل اسطوانه قطرها ٢٦سم وارتفاعها ٩٨سم ودرجة حرارتها الابتدائية 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 الملعب كاسطوانه لانهايه.

ب- اذا اعتبرت الملعب اسطوانه محددة الارتفاع

علما بان :

معامل انتقال الحرارة بالنقل لوسط التسخين=٥٢٣ كيلوكالورى/ساعة.متر مربع.°م

معامل انتقال الحرارة بالتوصيل للبسله = ٢٢. كيلوكالورى/ساعة.متر.°م

الحرارة النوعية للبسله = ٩١. كيلوكالورى/كجم.°م

كثافة بيوريه البسله = ١.٨٨ كجم /م^٣

وقت المعامله الحراريه = ٤٥ دقيقه

الباب العاشر

الهواء الرطب HUMID AIR

خواص الهواء الرطب

يحتوى الهواء الجوى على كمية من الرطوبة تختلف باختلاف درجة الهواء ومدى تعرضه للاسطح الباردة . فالهواء له خاصية حمل بخار الماء معه وتزداد هذه الخاصية كلما ارتفعت درجة حرارته ولكن عند درجة حرارة معينة نجد ان الهواء يستطيع حمل بخار الماء معه الى ان تصل كمية البخار الى حد معين لا يستطيع بعدها ان يحمل الهواء مزيدا منه وهذه الحالة يطلق عليها حالة التشبع Saturation اي ان تركيز البخار قد وصل الى تركيز التشبع . فاذا ارتفعت درجة حرارة الهواء نجد ان قابليته على حمل البخار تزداد فيصبح تركيز البخار اقل بكثير من تركيز التشبع مما يتيح للهواء فرصة حمل مزيدا من البخار معه الى ان يصل الى تركيز التشبع . ولكن اذا انخفضت درجة حرارة الهواء نجد ان قابليته على حمل بخار الماء تقل وبالتالي تزداد كمية البخار به عن تركيز التشبع فيبدأ بخار الماء فى التكثف عند اللحظة التى تصل فيها درجة حرارته الى الدرجة التى يكون فيها تركيز التشبع معادل لكمية بخار الماء الموجود بالهواء وهذه الدرجة تعرف بنقطة الندى Dew Point .

ولكى نستخدم الهواء الرطب فى عمليات التصنيع المختلفه نبدأ بالتعاريف الآتية :

الرطوبة المطلقة : Absolute Humidity

هى نسبة وزن الرطوبة (الماء) العالق فى الهواء الرطب الى وزن الهواء الجاف ، وتستخدم عادة وحدة وزنية من الهواء الجاف (رطل او كيلو جرام) كأساس لهذه النسبة حيث انها ثابتة لا تتغير بتغير حالة الهواء ، وعلى ذلك تكون وحدات الرطوبة المطلقة : رطل رطوبة/رطل هواء جاف بالوحدات الانجليزية او كجم رطوبة/كجم هواء جاف بالوحدات المتريه . وحيث ان وزن الرطوبة فى كل وحدة وزنيه للهواء الجاف تكون صغيرة الى حد ما وحتى يمكن حساب الرطوبة المطلقة من الجداول او الخرائط تستخدم عادة وحدات الجرين فى حساب كمية الرطوبة بدلا من الرطل فى الوحدات الانجليزية والرطل يساوى ٧.٠٠ جرين وعلى ذلك نجد ان جميع بيانات الرطوبة المطلقة يعبر عنها بوحدات جرين/رطل هواء جاف فى الخرائط بالوحدات الانجليزية اما بالنسبة للخرائط بالوحدات المتريه أو الوحدات الدوليه فيتم التعبير عنها بوحدات كيلوجرام رطوبة لكل كيلوجرام هواء جاف .

الرطوبة النسبية : Relative Humidity

وهى نسبة ضغط بخار الماء الموجود فى الهواء الرطب عند درجة حرارة معينة الى ضغط بخار الماء لو كان الهواء الرطب مشبعاً عند نفس درجة الحرارة .

او نسبة تركيز بخار الماء بالهواء عند درجة حرارة معينة الى تركيز التشبع لبخار الماء عند نفس درجة الحرارة .

درجة الحرارة الجافة : Dry Bulb Temperature (D.B.T).

هى درجة حرارة الهواء العاديه التى تقاس بترمومتر عادى.

درجة الحرارة الرطبة : Wet Bulb Temperature (W.B.T).

هى درجة حرارة الهواء الناتجة عن قدرة تبخيره للماء ، وتعتمد على مقدار تشبعه ببخار الماء . ويمكن قياسها بوضع الترمومتر ذو القطن المبلل امام تيار من الهواء وتكون درجة الحرارة فى هذه الحالة هى درجة الحرارة الرطبة . ومرور الهواء المحمل ببخار الماء على مستودع الترمومتر يسبب تبخر الماء الموجود بالقطن المبلل ينتج عنه انخفاض فى درجة حرارة الماء نتيجة لتبخره ، فتكون دائماً درجة الحرارة الرطبة للهواء اقل من درجة حرارته الجافة وتساويها فى حالة واحدة عندما يصل تركيز بخار الماء الى تركيز التشبع فى الهواء .

ويوجد عادة جهاز خاص يثبت به ترمومترا ، احدهما يغطى مستودعه بقطعه قطن مبللة لقياس درجة الحرارة الرطبة ، والاخر عادى لقياس درجة الحرارة الجافة . ويتصل هذا الجهاز بذراع يمكن بواسطتها تحريك الترمومترا بسرعة مناسبة وذلك عند استخدامها فى غرف او انفاق ذات هواء ساكن ويسمى هذا الجهاز Sling Psychrometer .

حجم الهواء الرطب : Humid Volume

ويمكن حسابه بدون خطأ يذكر لمجموع احجام وحدة وزنيه واحدة من الهواء الجاف وحجم بخار الماء (الرطوبة) الموجود فى الهواء الرطب .

كمية الحرارة الكلية للهواء الرطب : Total Humid Heat

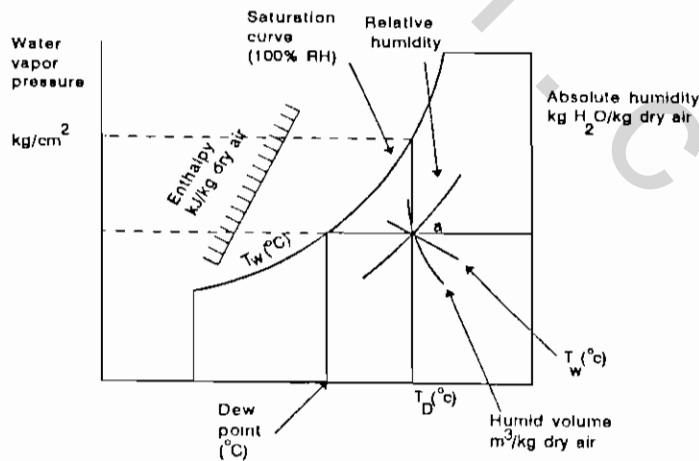
وهي عبارة عن مجموع كمية الحرارة الموجودة في وحدة وزنيه واحدة من الهواء الجاف عند درجة حرارة معينه وكمية الحرارة الكامنه Latent heat لبخار الماء الموجود في الهواء الرطب عند نفس درجة الحرارة .

وجميع هذه الخواص مبينه على الخريطة السيكرومتريه Psychrometric Chart في صورته خاصه يمكن بها حساب كمية الرطوبه مثلا الموجودة في وحدات التصنيع المختلفه (مثل المجففات او غرف التخزين بالتبريد) ويمكن الاستعانه بهذه الخريطة لتحديد حالة الهواء الرطب داخل وحدات التصنيع اذا عرفت خاصيتين من خواص هذا الهواء .

وعادة تستخدم درجتى الحرارة الجافه والرطبه لتحديد حالة الهواء وذلك لسهولة قياسها .

طريقة استخدام الخريطة السيكرومتريه :

لنفرض اننا استخدمنا جهاز Sling Psychrometer في قياس درجات حرارة هواء غرفة تخزين بالتبريد مثلا . وكانت درجة الحرارة الجافه للهواء الغرفه 20°C ودرجة الحرارة الرطبه للهواء 15°C ، فانه يمكن تحديد حالة الهواء داخل غرفه التخزين على الخريطة السيكرومتريه بالنقطه "a" في الشكل (١-١٠) :



شكل (١-١٠) الخريطة السيكرومتريه

وهي عبارة عن تقاطع الخط الرأسى الممثل لدرجة الحرارة الجافة مع الخط المائل الذى يمثل درجة الحرارة الرطبة ، وعلى ذلك يمكننا قراءة الخواص الاخرى لحالة الهواء الرطب الممثل بالنقطة "a" ونجدها كالاتى :

$$\begin{aligned} \text{الرطوبة المطلقة} &= ٠.٠٨٧ \text{ كجم رطوبة/كجم هواء جاف} \\ \text{كمية الحرارة الكلية} &= ٤٢ \text{ كيلو جول/كجم هواء جاف} \end{aligned}$$

ونلاحظ ان الخط الدال على كمية الحرارة ينطبق تقريبا مع الخط المائل الذى يمثل درجة الحرارة الرطبة ، فاذا امتد هذا الخط حتى يتقاطع مع مقياس كمية الحرارة الكلية يمكن قراءتها مباشرة من هذا المقياس .

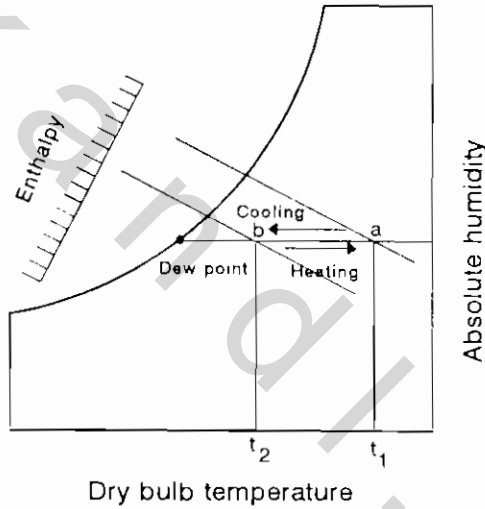
ويمكن الحصول على نقطة الندى لحالة الهواء المذكور وذلك بمد الخط الافقى الذى يمر بالنقطة "a" حتى يقطع منحنى التشبع ، ونجد انها تكون ١٢°م .

$$\begin{aligned} \text{الحجم الرطب} &= ٠.٨٤ \text{ متر مكعب/كجم هواء رطب} \\ \text{الرطوبة النسبية} &= ٦٠\% \end{aligned}$$

العمليات المختلفة التى قد تحدث للهواء اثناء اجراءات التصنيع

أولاً : التبريد والتسخين :

يمكن تمثيل التبريد والتسخين الذى قد يحدث فى هواء غرفة تخزين مثلاً ،
محكمة الغلق وبدون تغيير فى كمية الرطوبة داخلها بخط افقى مستقيم على الخريطة
السيكرومترية من حالة الهواء "a" الى الحالة "b" كما هو مبين فى الشكل (٢-١٠) :

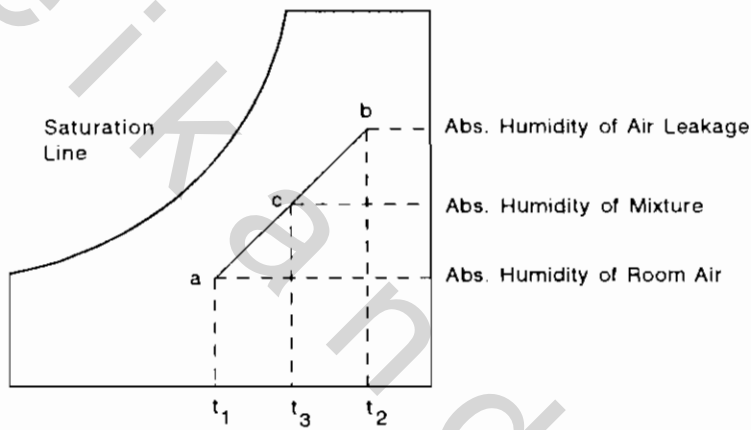


شكل (٢-١٠) تمثيل اجراء التسخين والتبريد على الخريطة السيكرومترية

وتكون كمية الحرارة المزالة (تبريد) او المكتسبة (تسخين) تساوى الفرق بين كمية
الحرارة الكلية فى الحالتين "a" ، "b" وفى حالة تبريد هواء الغرفة يجب مراعاة عدم
خفض درجة حرارتها عن درجة حرارة الانابيب المبخر والا قد يحدث تكثيف لرطوبة
الهواء على الانابيب او بعبارة اخرى يجب عدم خفض درجة حرارة هواء غرفة التخزين
عن درجة حرارة نقطة الندى كما هو مبين فى الشكل السابق .

ثانيا : خلط الهواء :

عادة مايتمسرب هواء من خارج غرفة التخزين الى داخلها عن طريق عدم احكام غلق باب الغرفة او نتيجة فتح الباب لتحميل الغرفة او تفريغها ، وبذلك تختلط كمية من الهواء الخارجى مع هواء الغرفة ويتسبب عن ذلك تغير فى الرطوبة المطلقة ودرجة حرارة هواء الغرفة . نفرض ان حالة كمية الهواء الداخلى تمثلها النقطة "a" على الخريطة السيكرومتريه كما هو مبين فى الشكل (١٠-٣) :



شكل (١٠-٣) تمثيل خلط الهواء الرطب على الخريطة السيكرومتريه

النقطة "b" تمثل حالة الهواء المتسرب الى داخل الغرفة ، فتحدث عملية الخلط على الخط الذى يصل بين النقطتين "a" ، "b" وحتى تسهل طريقة الحسابات ، نعتبر ان هذا الخط يكون مستقيما تقريبا بدون خطأ يذكر .

ولتحديد حالة الهواء الجديد بعد الخلط نأخذ فى الاعتبار مايتأتى :

- ١- وزن الهواء المخلوط يساوى مجموع اوزان الهواء المتسرب الى الغرفة وهواء الغرفة .
- ٢- كمية الرطوبة فى الهواء المخلوط تساوى مجموع كمية الرطوبة فى الهواء داخل الغرفة وكمية الرطوبة فى الهواء المتسرب .

أى ان :

وزن الهواء المخلوط = وزن هواء الغرفة + وزن الهواء المتسرب .
 وزن الهواء المخلوط × رطوبته المطلقة = وزن هواء الغرفة × رطوبته المطلقة
 + وزن الهواء المتسرب × رطوبته المطلقة .

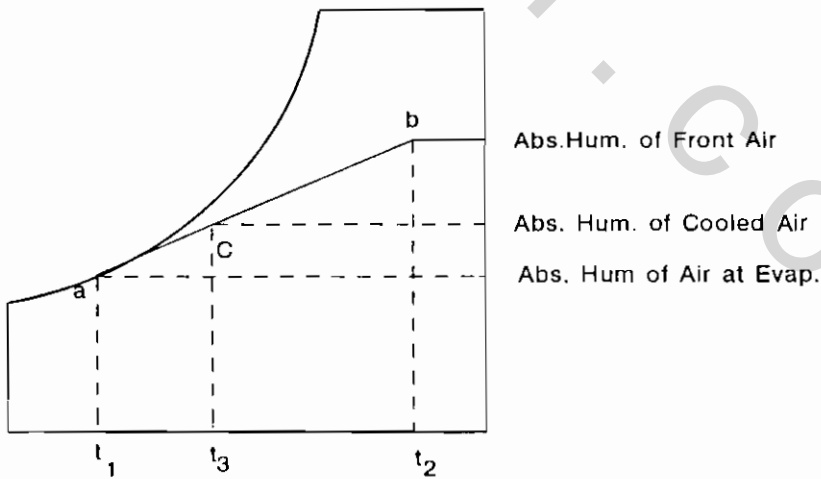
ومن المعادلتين السابقتين نجد أن :

الرطوبة المطلقة للهواء المخلوط =

$$\frac{\text{وزن هواء الغرفة} \times \text{رطوبته المطلقة} + \text{وزن الهواء المتسرب} \times \text{رطوبته المطلقة}}{\text{وزن هواء الغرفة} + \text{وزن الهواء المتسرب}}$$

وبذلك يمكننا حساب الرطوبة المطلقة للهواء المخلوط ونرسم عندها خط أفقى مستقيم نمده الى ان يقطع الخط "a b" فى النقطة "c" وبذلك تتحدد درجة حرارة هواء الغرفة بعد عملية الخلط كما هو موضح فى الشكل السابق .

ثالثا : التبريد والترطيب :



شكل (١٠-٤) تمثيل التبريد والترطيب على الخريطة السيكمرومترية

تشبه هذه العملية الى حد كبير عملية خلط الهواء ، فعادة ماتزود غرف التخزين بمراوح لتقليب الهواء حتى تكون درجة حرارة الغرفة ثابتة . فاذا فرض ان t_2 هى درجة الحرارة الجافة للهواء الموجود امام مروحة التقليب عند بدء تشغيل وحدة التبريد، وأن درجة حرارة الهواء الملامس لانايب المبخر تكون t_1 (نقطة الندى) وبذلك تقع درجة الحرارة الجافة للهواء المبرد على الخط المستقيم a b الواصل بين الحالتين وتمثلها (c) كما هو مبين فى الشكل (١٠-٤) .

أى انه يمكن القول ان جزء من هواء الغرفة يبرد ويصل الى درجة حرارة سطح مواسير المبخر t_1 والجزء الآخر يكون عند درجة الحرارة الجافة t_2 ونتيجة لخلط هذين الجزءين ببعضهما تصل درجة الحرارة الجافة للهواء الغرفة الى t_3 ، ونطبق عليها نفس خطوات الحسابات الخاصة بخلط الهواء التى سبق شرحها .

وتعرف درجة اداء عملية التبريد والترطيب على هذا النحو بما يسمى عامل التمرير By Pass Factor وتوجد قيمته كالاتى :

$$\text{By Pass factor} = \frac{t_3 - t_1}{t_2 - t_1} = \frac{30 - 20}{45 - 20} = \frac{10}{25} = 0.4 \quad (10-1)$$

عامل التمرير =

$$\frac{\text{الرطوبة المطلقة للهواء المبرد} - \text{الرطوبة المطلقة للهواء الملامس لسطح المبخر}}{\text{الرطوبة المطلقة للهواء امام المروحة} - \text{الرطوبة المطلقة للهواء الملامس لسطح المبخر}}$$

ويمثل عامل التمرير الجزء الذى مر من الهواء الملامس لسطح انايب المبخر مع الهواء الموجود امام مروحة التقليب .

الباب الحادى عشر

التجفيف

DRYING OR DEHYDRATION

حفظ الاغذية بالتجفيف

التجفيف Drying أو التنشيف Dehydration هو عبارة عن عملية ينتج عنها خفض المحتوى الرطوبى للمادة نتيجة لتبخر الماء منها وبالتالي تركيز ما تحتوى عليه من المكونات الصلبة الذائبة وبذلك يمكن حفظها لفترات طويلة دون خوف من سرعة تعرضها للتلف حيث انه كلما كانت نسبة الرطوبة بالمادة مرتفعه كلما كانت مجال خصب لنمو الكائنات الدقيقة ونشاط الانزيمات .

وصناعة التجفيف تعتبر من اكثر الصناعات الغذائية ممارسة واهمية ، فهى من الصناعات القديمة التى ادت الحاجة الطبيعى للانسان لقيامها . وقد كانت عملية التجفيف - وما زالت فى كثير من الاحيان - تتم طبيعيا بتعريض المادة المراد تجفيفها للشمس والهواء لخفض نسبة الرطوبة بها كما هى الحالة فى تجفيف البلح او العنب وبعض الخضروات . وقد استحدثت عملية التجفيف الصناعى نظرا لانه يمكن فيها التحكم فى العوامل المؤثرة على المادة المجففة مثل سرعة الهواء والتحكم فى درجة حرارته ونسبة رطوبته .

ويشترط فى تجفيف الاغذية المحافظة على مركباتها بدون أى تلف او تحلل اثناء عملية التجفيف او اثناء تخزين المواد المجففة ، كما يشترط فى المادة الغذائية الجافة سرعة تشربها ثانية للرطوبة عند نقعها فى الماء حتى تسترجع اكبر قدر ممكن عمليا من صفات وخواص مادتها الطازجة .

وعملية تجفيف المنتجات الزراعيه والغذائيه تعتبر ذات أهمية كبيرة فى الحفظ لانتقل اهمية عن طرق الحفظ الاخرى مثل التبريد أو التجميد بل تفوقها فى بعض الاحيان خاصة اثناء الحروب . واهم مميزات الاغذية المجففة :

- ١- ارخص طرق الحفظ لانخفاض تكاليف الانتاج والعبوات وعدم الحاجة الى اضافة مواد حافظه اخرى او تخزينها فى غرفة التبريد .
- ٢- انخفاض تكاليف النقل والشحن والتخزين نتيجة لقله وزنها وحجمها .
- ٣- تواجد الاغذية المحفوظة بالتجفيف على مدار السنه .
- ٤- يمكن الاحتفاظ باكبر قدر ممكن من صفات المواد الغذائية الطازجة وذلك طالما كان هناك عناية كافيه فى تصنيعها وتخزينها .

الخطوات الرئيسية فى تحضير ثمار الفاكهه والخضر للتجفيف :

- ١- انتخاب اصناف الفاكهه والخضر التامة النضج اذ ان تجفيف الثمار الغير تامه النضج يتسبب عنها لون غير مغرى ومذاق غير مستحب وانكماش ظاهر فى شكلها الخارجى .
- ٢- العناية بقطف ثمار الفاكهه حتى لايتسبب ذلك فى قلة جودتها .
- ٣- مراعاة انتخاب اصناف الفاكهه والخضر التى بها نسبة مرتفعه من المواد الصلبه . اى نسبة الرطوبه بها قليله وبذلك يمكن زيادة نسبة التجفيف وتقليل كمية الماء الواجب تبخيرها من المادة الطازجه .
- ٤- مراعاة الصفات الخاصه فى الثمار التى تحدد جودة المنتجات المجففه مثل ارتفاع نسبة الكاروتين فى الجزر والبطاطا ونسبة فيتامين C فى الفواكه وانخفاض نسبة السكريات المختزله وما اليها من صفات مشابهه .
- ٥- مراعاة عدم تلف الثمار فى الفترة بين جمعها وتجفيفها ، فبعض الخضروات تتعرض للتلف بسرعة بمجرد حصادها ، لذلك يجب نقلها وتجفيفها فى اقصر وقت ممكن . وكثير من ثمار الفاكهه يمكن تخزينها داخل غرف تبريد اثناء هذه الفترة حتى يتم تجفيفها .
- ٦- تغسل جميع الخضروات وخاصة الجذرية منها غسلا جيدا لازالة الأتربه والمواد العالقه بها . ولاينصح بغسل الفاكهه الا اذا كانت معامله باحدى المواد المبيده للحشرات أو اذا جمعت من الارض .
- ٧- لتسهيل عملية التجفيف ولانتاج فواكه او خضر مجففه ذات مظهر افضل ومذاقا احسن تتم عمليات الفرز والتنظيف والتقطيع وازالة النقى والتقشير . وتتم عملية التقشير للخضروات الجذرية وبعض انواع الفاكهه كالتفاح والخوخ اما بواسطة آلات التقشير بالاحتكاك كما فى البطاطس والبطاطا ، او بالمحاليل القلويه كما فى الخوخ .

٨- الغمر بالقلوى : Dipping

تغمر ثمار الفاكهة قبل عملية التجفيف فى محلول قلوى مثل الصودا الكاوية ٥.٠٪ وذلك لازالة الاتربه الملتصقه بالثمار ، والطبقة الشمعيه الموجوده على سطحها مع تليين قشور الثمار وتشقيقها حتى تسهل عملية تبخير الماء من الثمار .

٩- الكبريت Sulfuring

والمقصود بهذه العملية هو معاملة المادة المعده للتجفيف بغاز ثانى اكسيد الكبريت واهم اغراض هذه العمليه مايتأتى :-

- أ - إيقاف عمل الانزيمات خاصة المؤكسدة .
- ب - تمنع اكسدة سطح الثمار بالهواء .
- ج - تساعد على المحافظة على اللون والطعم الطبيعى للفاكهه او الخضر .
- د - تساعد على استخدام درجات حرارة عاليه فى عملية التجفيف .
- هـ - تأخر معدل فقد الفيتامينات خاصة فيتامين أ ، ج .
- و - اطالة مدة التخزين نتيجة لتأثير غاز ثانى اكسيد الكبريت على نشاط الاحياء الدقيقه .

١٠- التبخير : Fumigation

تبخر الفاكهة كالبطخ ومعظم الخضروات قبل او بعد عملية التجفيف للتخلص من الآفات الحشريه .

نظرية التجفيف الصناعى

عندما تتعرض المادة المراد تجفيفها للجو يفقد السطح المبلل لهذه المادة كمية كبيرة من رطوبته وذلك نتيجة لتبخر الماء منه . وحيث ان عملية تبخير الماء يلزم لها اضافة كمية حرارة كافية لاتمامها فاننا نجد ان عملية التجفيف ينتج عنها الآتى :

- ١- انخفاض نسبة الرطوبة فى سطح المادة المعرضه للجو نتيجة لتبخر الماء منها .
- ٢- انخفاض فى درجة حرارة سطح المادة وذلك لامتناس كمية الحرارة منها لاحداث التبخير .
- ٣- ارتفاع تركيز بخار الماء فى الجو المحيط بـ سطح المادة .
- ٤- انخفاض معدل التبخير كـنتيجة للآتى :

أ - انخفاض نسبة الرطوبة بـ سطح المادة المعرضه للجو يؤدى الى الاقلال من معدل التبخير .

ب- انخفاض درجة حرارة السطح المعرض وعلى ذلك ينخفض معدل التبخير كـنتيجة لصعوبة الحصول على الحرارة الكافية منه لاحداث التبخير .

ج- وجود طبقة راكده من الهواء على سطح المادة يتسبب عنها مقاومه مرور الرطوبة من داخل المادة الى الجو الخارجى اى انه يسبب تشبع سطح المادة ببخار الماء .

وحيث ان عملية التجفيف الصناعى تتحكم اساسا فى سرعة مرور الهواء على السطح الخارجى وخلال انسجة المادة المراد تجفيفها ، وكذلك يتحكم فى درجة حرارة ونسبة رطوبة الهواء ، فانه يمكن الاقلال من انخفاض معدل التبخير بواسطة التجفيف الصناعى وذلك كما يأتى :-

١- تزود المجففات الصناعية بالطاقة الحرارية اللازمة للتجفيف عن طريق التسخين المباشر (حرق الوقود مباشرة في المجففات) أو الغير مباشر (كاستخدام مبادلات حرارية يمر بداخلها بخار وخارج أسطحها هواء التجفيف) وينتج عن ذلك ارتفاع درجة حرارة السطح المعرض للمادة وبذلك يسهل انتقال الحرارة من الجو الملامس للمادة إلى داخلها وبالتالي يرتفع معدل التبخير منها. ويجب مراعاة عدم رفع درجة حرارة الهواء إلى الحد الذي ينتج عنه ضرر للمادة المراد تجفيفها. غير أنه يمكن استخدام درجات حرارة أعلى لهواء التجفيف في حالة ما إذا كانت أسطح المواد المراد تجفيفها بها نسبة عالية من الرطوبة.

٢- تستخدم مراوح لدفع هواء التجفيف داخل المجففات وبذلك تكون سرعة الهواء مرتفعة يتسبب عن ذلك إزاحة تيارات الهواء الساخن لطبقة الهواء المشبعة ببخار الماء الراكدة على أسطح المادة المراد تجفيفها والتي تقاوم تبخير الرطوبة من داخل المادة نفسها، ويختلف سمك الطبقة الراكدة باختلاف سرعة الهواء المستخدم. فكلما كانت السرعة بطيئة كلما كان سمك هذه الطبقة كبيرة ويقل هذا السمك بازدياد سرعة الهواء كذلك يجب أن يكون الهواء المار داخل المجففات به نسبة منخفضة من الرطوبة حتى يزيد من قدرته على امتصاص كمية كبيرة من الرطوبة.

وتتم عملية التجفيف على مرحلتين :

١- المرحلة الأولى وتعرف بمرحلة معدل التبخير الثابت :

Constant Rate Period :

فأى مادة بها كمية من الرطوبة، يوجد عادة على سطحها طبقة ذات سمك صغير من الماء. وإزالة هذه الطبقة بالتجفيف يماثل تماماً تبخير الماء من سطح إناء محتوئ على ماء ومعرض للهواء الساخن. والمدة اللازمة لانتهاء من المرحلة الأولى تعتمد مباشرة على سمك طبقة الماء على سطح المادة وتكون هذه المدة قصيره. والمحتوي الرطوبي للمادة الذي تصل إليه بعد المرحلة الأولى يعرف بالمحتوى الرطوبي الحرج (M_c) Critical Moisture Content وبعده تبدأ عملية التجفيف في المرحلة الثانية.

٢- المرحلة الثانية وتعرف بمرحلة معدل التبخير المتناقص :

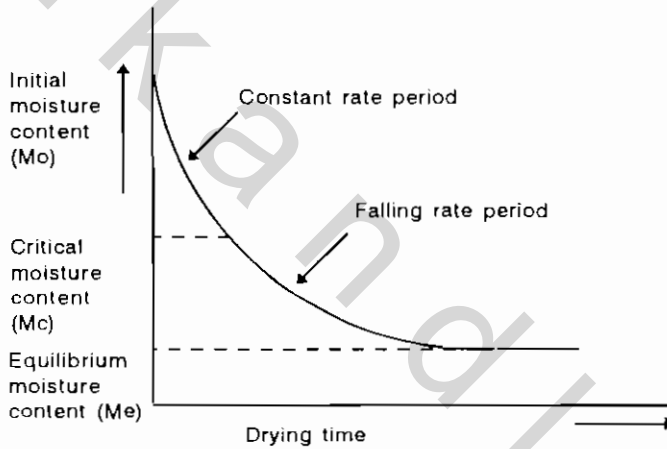
Falling Rate Period :

وتتم هذه المرحلة على الوجه التالي :

أ - تحرك الرطوبة (الماء) داخل المادة المراد تجفيفها الى ان تصل الى السطح الخارجى .

ب- ازالة هذه الرطوبة من السطح الخارجى .

والتحرك الداخلى للرطوبة فى المواد الغذائيه (سواء بها خلايا وانسجة تجعلها مساميه) يماثل تحرك السوائل فى الانابيب الشعريه او تحركها بالجاذبيه مثل تحرك المياه الجوفيه فى الاراضى المساميه . واذا كان المحتوى الرطوبى للمادة اقل من درجة التشبع يكون تحرك الرطوبة بطريقه الانتشار Liquid Diffusion



شكل (١١-١) منحنى التجفيف

والرسم البيانى شكل (١١-١) يمثل العلاقه بين المحتوى الرطوبى للمادة المراد تجفيفها والزمن الذى تستغرقه عملية التجفيف خلال مروره بمرحلتى التجفيف المذكورتين ، ونلاحظ ان المحتوى الرطوبى للمادة لا يقل عن حد معين مهما طال مدة التجفيف حيث يكون عندها ضغط بخار الماء داخل المادة فى حالة اتزان كامل مع ضغط بخار الماء الموجود فى هواء التجفيف ويسمى بالمحتوى الرطوبى المتوازن Equilibrium Moisture Content (M_e).

الحسابات الخاصة بالتجفيف

تعريف :

تعتبر كمية المياه المتشربة في المادة الغذائية من أهم المهام الرئيسية لإجراء عملية التجفيف لخفضها . ويعبر عن ذلك بالمحتوى الرطوبي للمادة أما منسوبا للوزن الكلى الرطب أو الوزن الجاف فقط ويسمى في هذه الحالة كذلك بنسبة الرطوبة في المادة كما يلي :

المحتوى الرطوبي للمادة على الأساس الرطب :

Moisture content, wet basis % (m)

ويرمز لها بالرمز m ، وهي النسبة بين وزن الرطوبة بالمادة والوزن الكلى للمادة أى أن :

$$m = \frac{W_m}{(W_m + W_d)} \times 100 \quad (11-1)$$

حيث :

W_m = وزن الرطوبة بالمادة

$W_m + W_d$ = الوزن الكلى للمادة

W_d = الوزن الجاف للمادة Weight of bone-dry material

المحتوى الرطوبي للمادة على الأساس الجاف:

Moisture content, dry basis, % (M)

ويرمز له بالرمز M ، وهي النسبة بين وزن الرطوبة بالمادة والوزن الجاف تماما للمادة وعادة ماتسمى نسبة الرطوبة في المادة Moisture Ratio .

$$M = \frac{W_m}{W_d} \times 100 \quad (11-2)$$

والعلاقة الآتية تربط المحتوى الرطوبي على الأساس الرطب والمحتوى الرطوبي على الأساس الجاف

$$M = \frac{100m}{100 - m} \quad (11-3)$$

ويفضل عند عمل حسابات التجفيف استخدام المحتوى الرطوبى على الاساس الجاف (M) اذ انه منسوب الى الوزن الجاف تماما بالمادة وهو ثابت لايتغير اثناء عملية التجفيف بعكس المحتوى الرطوبى على الاساس الرطب (m) فهو منسوب الى الوزن الكلى للمادة وهو يعتبر كمية متغيره يتغير اثناء فترة التجفيف وحسب درجته .

حساب كمية الرطوبة الواجب التخلص منها بالتجفيف :

ويمكن حساب كمية الرطوبة التى يجب التخلص منها بالتجفيف وذلك باستخراج المحتوى الرطوبى أولا قبل عملية التجفيف ثم المحتوى الرطوبى بعد عملية التجفيف ويكون الفرق بينهما يساوى كمية الرطوبة الواجب طردها منسوبه الى الوزن الجاف تماما للمادة. ولما كانت هذه الطريقة مطوله فقد استخرجت بعض المعادلات التى يمكن بواسطتها ايجاد وزن الرطوبة الواجب طردها مباشرة وهذه المعادلات هى :

١- وزن الرطوبة الواجب ازالتها (تبخيرها) من وحدة وزنيه واحده من الماده الطازجه:

$$\frac{\text{Weight of moisture}}{\text{Weight of fresh material}} = \frac{M_1 - M_2}{100 + M_1} = \frac{m_1 - m_2}{100 - m_2} \quad (11-4)$$

حيث (1) يرمز للحاله قبل اجراء عملية التجفيف ، (2) يرمز للحاله بعد اجراء عملية التجفيف .

٢- وزن الرطوبة الواجب ازالتها (تبخيرها) للحصول على وحدة وزنيه واحده من الماده المجففه :

$$\frac{\text{Weight of moisture}}{\text{Weight of dried material}} = \frac{M_1 - M_2}{100 + M_2} = \frac{m_1 - m_2}{100 - m_1} \quad (11-5)$$

٣- تقدير نسبة التجفيف Drying Ratio
وهى وزن الماده الطازجه اللازمه لانتاج وحدة وزنيه واحده من الماده المجففه :

$$\text{Drying Ratio} = \frac{\text{Weight of fresh material}}{\text{Weight of dried material}} = \frac{100 - m_2}{100 - m_1} = \frac{100 + M_1}{100 + M_2} \quad (11-6)$$

ولحساب معدل التجفيف فى اجراء عملية التجفيف ذو الطبقة الرقيقة
Thin-layer يوجد بعض المعادلات التى تستخدم لهذا الغرض ونذكر منها :

a- Lewis equation (General exponential equation)

وهى معادلة أسية تحتوى على معامل واحد وتسمى ايضا one term model
أو logarithmic model أو time based model

$$MR = \frac{M - M_e}{M_o - M_e} = \exp.(-\alpha t) \quad (11-7)$$

وبصيغة أخرى

$$MR = -\ln MR = \alpha t \quad (11-8)$$

حيث :

M = المحتوى الرطوبى بعد فترة من زمن التجفيف ، kg H₂O/kg DM

M_e = المحتوى الرطوبى الاتزانى ، kg H₂O/kg DM

M_o = المحتوى الرطوبى الابتدائى (عند بداية عملية التجفيف) kg H₂O/kg DM

t = وقت التجفيف ، min.

α = ثابت الانتشار الكلى drying rate parameter, min⁻¹

ويعتبر هذا النموذج ان عملية التجفيف تتم بالانتشار وتكون مقاومه
للانتشار على سطح المادة المراد تجفيفها .

b- Page equation

وهى معادلة أسية تحتوى على معاملين وهى اكثر دقة لحساب معدل التجفيف
(MR) عن المعادلة السابقة وتسمى Two terms model

$$MR = \frac{M - M_e}{M_o - M_e} = \exp.(-Kt^N) \quad (11-9)$$

وبصيغه اخرى لتعطى معادلة على صورة خط مستقيم

$$\ln [-\ln (MR)] = \ln K + N \ln t \quad (11-10)$$

حيث :

K = ثابت التجفيف التجريبي ويعتبر intercept بمعادله Page min^{-1}
 N = ثابت تجريبي ويعتبر ميل Slope بمعادله Page، لا بعدى dimensionless

وتصف هذه المعادلة معدل فقد الرطوبة اثناء التجفيف بالطبقة الرقيقة Thin-layer للمادة الغذائية .

٤- كمية الحرارة اللازمة لتسخين الهواء (Q)
 أو (كمية الحرارة التي يكتسبها الهواء فى وحدة الزمن) =

$$\text{معدل السريان الحجمى للهواء فى وحدة الزمن} \times \left[\frac{\text{المحتوى الحرارى للهواء عند النقطة (٢)}}{\text{الحجم الرطب للهواء عند النقطة (٢)}} - \frac{\text{المحتوى الحرارى للهواء عند النقطة (١)}}{\text{الحجم الرطب للهواء عند النقطة (١)}} \right]$$

$$Q = \dot{V} \times \left(\frac{H_2}{v_2} - \frac{H_1}{v_1} \right) \quad (11-11)$$

أو

$$\text{معدل السريان الوزنى للهواء فى وحدة الزمن} \times \left[\text{المحتوى الحرارى للهواء عند النقطة (٢)} - \text{المحتوى الحرارى للهواء عند النقطة (١)} \right]$$

$$Q = \dot{m} \times (H_2 - H_1) \quad (11-12)$$

٥- كمية الرطوبة المزالة فى وحدة الزمن (W) =

$$\text{معدل السريان الحجمى للهواء فى وحدة الزمن} \times \left[\frac{\text{المحتوى الرطوبى للهواء عند النقطة (٢)}}{\text{الحجم الرطب للهواء عند النقطة (٢)}} - \frac{\text{المحتوى الرطوبى للهواء عند النقطة (١)}}{\text{الحجم الرطب للهواء عند النقطة (١)}} \right]$$

$$W = \dot{V} \times \left(\frac{X_3}{v_3} - \frac{X_2}{v_2} \right) \quad (11-13)$$

أو

$$\text{معدل السريان الوزنى للهواء فى وحدة الزمن} \times \left[\text{المحتوى الرطوبى للهواء عند النقطة (٢)} - \text{المحتوى الرطوبى للهواء عند النقطة (١)} \right]$$

$$W = \dot{m} \times (X_3 - X_2) \quad (11-14)$$

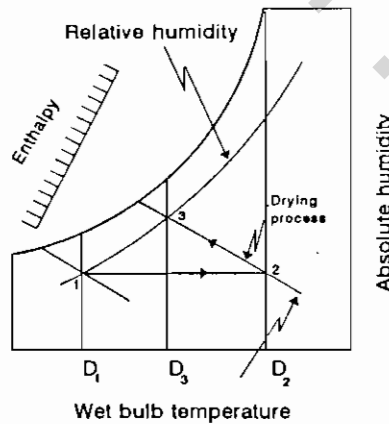
$$\text{Drying time} = \frac{\text{Total moisture to be removed}}{\text{Moisture removed per unit time}} \quad (11-15)$$

$$\text{Heat energy required for the heating process} = \frac{\text{Total heat required to heat the air}}{\text{Conversion factor of heat energy to electrical energy}} \quad (11-16)$$

تمثيل عملية التجفيف على الخريطة السيكرومتريه :

عند مرور الهواء الجوى داخل مجفف يتم تسخينه اى رفع درجة حرارته الى درجة الحرارة المناسبه لاجراء عملية التجفيف ويمر بعد ذلك الهواء الساخن على سطح المادة الرطبه المراد تجفيفها فيعمل على تبخير الماء منها ويتصاعد بخار الماء ويختلط بالهواء وفى نفس الوقت نجد أن الهواء يفقد كمية من حرارته وبالتالي تنخفض درجة حرارته الجافه . ولما كانت قدرة تشبع الهواء ببخار الماء تقل كلما قلت درجة حرارته فاننا نجد أن الرطوبة النسبيه للهواء تزداد حتى تصل الي تركيز التشبع اى اننا نجد ان معدل التجفيف يكون سريعا أولا ثم يقل تدريجيا حتى يصل الى حد معين يبدأ فى التدهور سريعا بعدها حتى ينعدم نهائيا عند تركيز التشبع .

وبذلك تظل درجة حرارة الهواء الرطبه ثابتة تقريبا اثناء مرور الهواء داخل المجفف على سطح المادة المراد تجفيفها بينما تنخفض درجة حرارته الجافه حتى تتساوى مع درجة الحرارة الرطبه عند تركيز التشبع . وعمليا يخرج الهواء بعد مروره على سطح المادة المراد تجفيفها على درجة حرارة مرتفعه عن درجة حرارة الهواء الخارجى ورطوبة نسببيه عاليه نتيجة لتبخر الرطوبه من المادة المجففه ، وعلى ذلك يمكن خلط كمية من الهواء الخارج من المجفف مع الهواء الجوى الداخلى الى مسخن المجفف لزيادة كفاءة عملية التجفيف مع توفير فى الحاره المضافه فى مسخن المجفف وتسمى هذه الطريقه باعادة تمرير هواء التجفيف Recirculation .



شكل (١١-٢) تمثيل عملية التجفيف على الخريطة السيكرومتريه

وتمثل النقطة (a) حالة الهواء الجوى قبل دخوله الى مسخن المجفف عند درجة حرارة جافه D_a ، والنقطة (b) تمثل حالة الهواء بعد خروجه من مسخن المجفف عند درجة حرارة جافه D_b وتتم عملية التسخين a-b داخل مسخن المجفف بدون تغير فى المحتوى الرطوبى للهواء ويمر الهواء بعد تسخينه ووصوله الى نقطة b على سطح المادة المراد تجفيفها وتتم عملية التجفيف تحت درجة حرارة رطبه ثابتة ويخرج الهواء بعد اتمام عملية التجفيف من المجفف عند النقطة C وتكون درجة حرارته D_c اقل من درجة حرارته عند بدء عملية التجفيف D_b .

ويمثل المثال الآتى طريقة استخدام الخريطه السيكرومتريه فى الحسابات الخاصه بالتجفيف :

مثال :

مجفف صوانى يستخدم ٢٤٠ متر مكعب من الهواء فى الدقيقه ، عند درجة حرارة 50°C لتجفيف شرائح من البصل من محتوى رطوبى ٩٠٪ الى محتوى رطوبى ٤٪ ومقدار ماينتجه من البصل المجفف يوميا ٢٢٥ كيلوجرام ، فاذا كان الهواء يدخل المجفف عند درجة حرارة جافه 27°C ورطوبة نسبیه ٦٠٪ ويسخن إلى درجة حرارة 50°C ويخرج الهواء من المجفف عند درجة حرارة جافه قدرها 40°C . احسب:

- ١- نسبة الرطوبه فى المادة قبل وبعد التجفيف.
- ٢- وزن البصل قبل عملية التجفيف.
- ٣- كمية الرطوبه الواجب ازالته.
- ٤- كمية الحرارة الواجب اضافتها للهواء الجوى .
- ٥- الوقت اللازم لاتمام عملية التجفيف .

الحل

١- نسبة الرطوبه قبل عملية التجفيف (M_1)

$$M_1 = \frac{100 \cdot m_1}{100 - m_1} = \frac{100 \times 90}{100 - 90} = 900\%$$

نسبة الرطوبه بعد عملية التجفيف (M_2)

$$M_2 = \frac{100 \cdot m_2}{100 - m_2} = \frac{100 \times 4}{100 - 4} = 4.170\%$$

$$2- \frac{\text{Weight of fresh material}}{\text{Weight of dried material}} = \frac{100 - m_2}{100 - m_1} = \frac{100 - 4}{100 - 90} = \frac{96}{10} = 9.6$$

$$\text{or} \quad = \frac{100 + M_1}{100 + M_2} = \frac{100 + 900}{100 + 4.17} = \frac{1000}{104.17} = 9.6$$

$$\therefore \text{Weight of fresh onion} = 225 \times 9.6 = 2160 \text{ kg/day}$$

$$3- \text{Weight of bone dry matter} = \text{weight of dried material} \times \left(\frac{100 - m_2}{100} \right)$$

$$= 225 \times \left(\frac{100 - 4}{100} \right) = 216 \text{ kg/day}$$

$$\therefore \text{Weight of moisture to be removed} = \text{Weight of bone dry matter} \times (M_1 - M_2)$$

$$= 216 \times \left(\frac{900 - 4.17}{100} \right) = 1935 \text{ kg/day}$$

او يمكن حسابها كالآتي :

$$\frac{\text{Weight of moisture to be removed}}{\text{Weight of fresh material}} = \frac{m_1 - m_2}{100 - m_2} = \frac{90 - 4}{100 - 4} = \frac{86}{96} = 0.896$$

$$\therefore \text{Weight of moisture to be removed} = 2160 \times \left(\frac{86}{96} \right) = 1935 \text{ kg/day}$$

من الخريطة السيكمترية نوجد المعلومات الآتية :

- الرطوبة المطلقة للهواء الداخل الى المجفف عند النقطة (a) = ١٣ . . كجم ماء/كجم هواء جاف
 الرطوبة المطلقة للهواء الخارج من المجفف عند النقطة (c) = ٢ . . كجم ماء/كجم هواء جاف
 الحجم الرطب للهواء الداخل الى المجفف عند النقطة (a) = ٨٧ . . متر مكعب/كجم هواء جاف
 الحجم الرطب للهواء الخارج من مسخن المجفف عند النقطة (b) = ٩٣٥ . . متر مكعب/كجم هواء جاف
 الحجم الرطب للهواء الخارج من المجفف عند النقطة (c) = ٩١ . . متر مكعب/كجم هواء جاف
 الحرارة الكلية في الهواء الداخل الى المجفف عند النقطة (a) = ٦١ كيلو جول/كجم هواء جاف
 الحرارة الكلية في الهواء الخارج من المجفف عند النقطة (c) = ٨٥ كيلو جول/كجم هواء جاف

٤- كمية الحرارة المضافه = معدل السريان الحجمى للهواء فى وحدة الزمن ×

$$\left[\frac{(\text{المحتوى الحرارى للهواء})_a}{(\text{الحجم الرطب للهواء})_a} - \frac{(\text{المحتوى الحرارى للهواء})_b}{(\text{الحجم الرطب للهواء})_b} \right]$$

4- $Q = \dot{V} \times \left(\frac{H_b}{v_b} - \frac{H_a}{v_a} \right) = 340 \times \left(\frac{85}{0.935} - \frac{61}{0.87} \right) = 7070.01 \text{ kJ/min}$

كمية الرطوبه المزاله فى الدقيقه = معدل السريان الحجمى للهواء فى وحدة الزمن ×

$$\left[\frac{(\text{المحتوى الرطوبى للهواء})_c}{(\text{الحجم الرطب للهواء})_c} - \frac{(\text{المحتوى الرطوبى للهواء})_b}{(\text{الحجم الرطب للهواء})_b} \right]$$

$$W = \dot{V} \times \left(\frac{X_c}{v_c} - \frac{X_b}{v_b} \right) = 340 \times \left(\frac{0.02}{0.91} - \frac{0.013}{0.87} \right) = 2.39 \text{ kg/min}$$

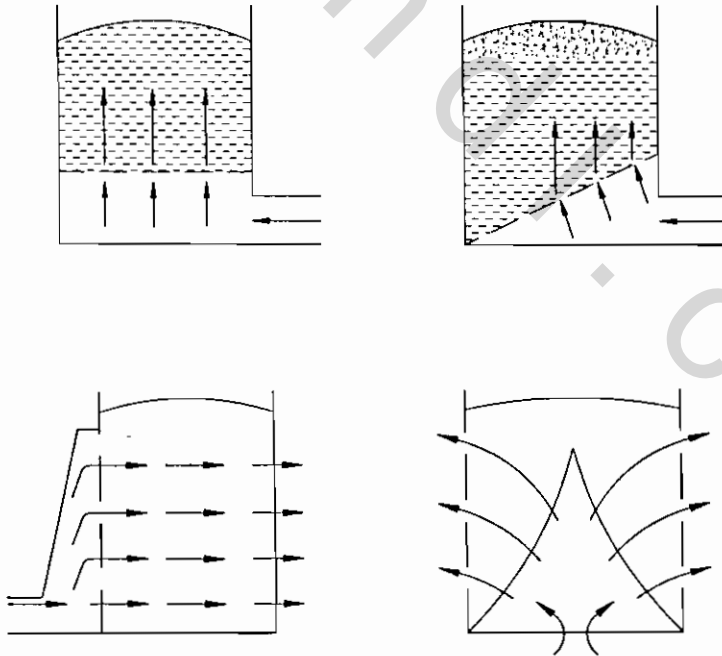
5- Drying time = $\frac{\text{Total evaporated moisture}}{\text{Moisture removed per hour}} = \frac{1935}{1.39 \times 60} = 13.5 \text{ hrs.}$

أنواع المجففات

توجد تصميمات متعددة للمجففات المستخدمة في تجفيف الأغذية والمنتجات الزراعية . وتختلف أنواعها باختلاف المادة المراد تجفيفها وطبيعة ناتج التجفيف والعوامل الاقتصادية التي يتوقف عليها تصريف المنتج . فتستخدم مجففات النفق Tunnel Driers في تجفيف ثمار الفاكهة والخضر ، ومجففات الرذاذ Spray Driers في تجفيف اللبن والبيض وعصير بعض الفواكه والخضروات مثل عصير الطماطم . وتضاف الحرارة داخل المجففات إما باستخدام التسخين المباشر Direct Heating أو التسخين الغير مباشر Indirect Heating . ففي طريقة التسخين المباشر تستخدم الغازات الناتجة عن احتراق الوقود مباشرة في تجفيف الاعلاف كما هي الحالة في المجففات الدوارة Rotary Driers وتستخدم طريقة التسخين الغير مباشرة في غالبية مجففات اغذية الانسان حيث يمر الهواء المستخدم في التجفيف على الاسطح الخارجية لافران يحترق داخلها الوقود او بملامسة الاسطح الخارجية لمواسير البخار او امرار هواء التجفيف على مسخنات كهربائية وتتوقف الطريقة المستخدمة في التسخين على العوامل الاقتصادية وجودة المنتج .

ونذكر فيما ياتي بعض انواع المجففات الشائعة الاستعمال :-

١- مجففات الحبوب والفلال على دفعات Batch or Bin Grain Driers

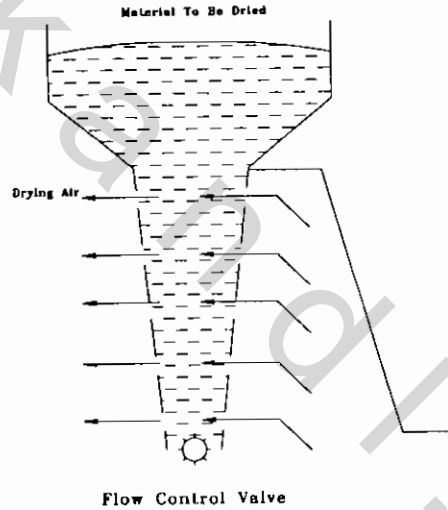


شكل (١١-٣) نظم المجففات على دفعات

وتستخدم لتجفيف الحبوب والغلل التى تحتوى على نسبة بسيطة من الرطوبة . وعادة يكفى استعمال الهواء العادى بدون تسخين فى فترة الصيف او اضافة كمية قليلة من الحرارة للهواء فى موسم الشتاء . وتتكون من خزان كبير او قادوس Bin على شكل اسطوانة او يأخذ مقطعه شكل مستطيل ، يوجد به فاصل او قاطوع به ثقب لاتسمح بمرور الغلل خلاله . ويدفع الهواء داخل القادوس خلال الغلل بواسطة مروحة دفع Air Blower ويمكن توجيه الهواء عند مروره داخل المجففات بحيث يتم توزيعه بانتظام حتي تتم عملية التجفيف بكفاءة عالية كما هو مبين فى الشكل (١١-٢) :-

٢- التجفيف المستمر للحبوب والغلل

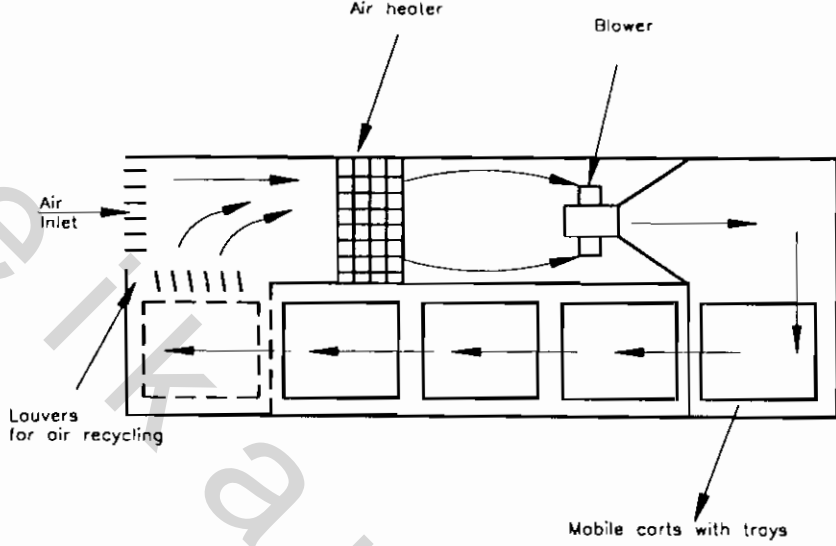
Continuous Gravity Flow Drlers:



شكل (١١-٤) نظام التجفيف المستمر للحبوب

ويستخدم لتجفيف المواد الحبيبه التى يسهل تحركها بالجاذبيه الارضيه . ويستعمل الهواء الجوى فى التجفيف سواء كان ساخنا أو طبيعيا حسب موسم الحصاد . ويتكون المجفف من قادوس اسطوانى على ارتفاع عالى يتصل باسفله ماسورة ذات قطر مناسب ومثقبه من جوانبها لتسهيل امرار هواء التجفيف ، وتنتهى الماسورة بقرص به ريش مستقيمه لتنظيم عملية تفريغ الحبوب بعد تجفيفها . وعادة ماتستخدم سيور ناقله او روافع السواقى لتغذية القادوس بالحبوب من اماكن تخزينها والشكل (١١-٤) يبين كروكي للفكره الرئيسيه المستخدمه فى التجفيف المستمر .

Cabinet and Tray Driers:

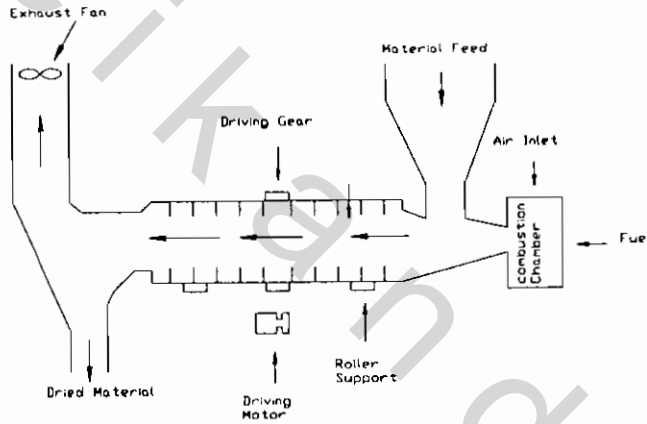


شكل (٥-١١) قطاع في مجفف المقصورة

وتستخدم هذه المجففات عادة في تجفيف المواد الغذائية الصلبة مثل الفواكه والخضروات واللحوم . وهي عبارة عن حجرة مقسمة من الداخل بواسطة فواصل الى كبائن يوضع بداخلها عدد من صواني المجفف مصفوفة فوق بعضها ومحمولة على عربات ، وقد تكون الصواني ثابتة داخل المقصورات او الكبائن كرفوف متحركة او غير متحركة معتمدة على نوع المادة المراد تجفيفها وهل يلزم تقليبها بين فترة واخرى او لا تتطلب التقلب كما هو مبين في شكل (٥-١١) . وتقوم مراوح الهواء بسحبته لمراره على اسطح المسخن وتوجيهه بواسطة مواسير او مجارى فرعية ليتخلل المادة المراد تجفيفها داخل كل مقصوره . ويكون مرور الهواء اما خلال الصواني او رأسيا عليها، ولو انه يفضل مروره خلال الصواني حتى لا تتعرض المادة الموضوعه علي الصواني القريبه من دخول الهواء الى سرعة جفافها عن المواضع البعيدة عنها . ويمر الهواء بعد عملية التجفيف الى خارج المجفف عن طريق ماسوره على شكل مدخنة مزودة بفتحات يمكن التحكم في اغلاقها او فتحها يدويا وبذلك يمكن الاستفادة من جزء من الحرارة الخارجه مع الهواء في تسخين الهواء الداخل الى المسخن حتي يمكن الاقلال من تكاليف التسخين . ويفضل استخدام مواسير البخار في مسخنات هواء التجفيف الا انه في بعض المناطق التي لا يتوفر فيها توليد البخار (مثل الواحات والمناطق الصحراوية) تستخدم اقتران

لاحراق وقود مثل السولار او المازوت لتزويد مسخنات الهواء بالحراره اللازمه لعملية التجفيف. ويجب فى هذه الحالة مراعاة ان تكون مداخن الافران مرتفعه عن مداخل ومخارج الهواء بمسافة كافيه حتى لاتختلط نواتج الاحتراق مع هواء التجفيف متسببه فى تغير لون ورائحة المادة المجففه كما هى الحال فى مجففات البلع فى الواحات. وتعتبر طريقة التجفيف بالمقصورات طريقة متقطعه Intermittent على دفعات وبذلك يكون انتاجها محدود. وتتميز بكبر مساحة جدران المجفف بالنسبه لسعته العمليه، ويؤخذ عليها ارتفاع تكاليف نظام الدورة الهوائيه وما تتطلبه من منظمات آليه.

٤- المجففات الدواره : Rotary Driers



شكل (١١-٦) قطاع فى مجفف دوار

وتستخدم هذه المجففات للمواد التى لايسهل حركتها بالجاذبيه الارضيه والتى بها نسبة رطوبه عاليه كالكسب ومخلفات العلف وتستعمل كذلك فى تجفيف الحشائش وعلى ذلك فهى تصلح لتجفيف البرسيم، وعامة تستخدم هذه المجففات لتجفيف اعلاف للحيوانات والدواجن.

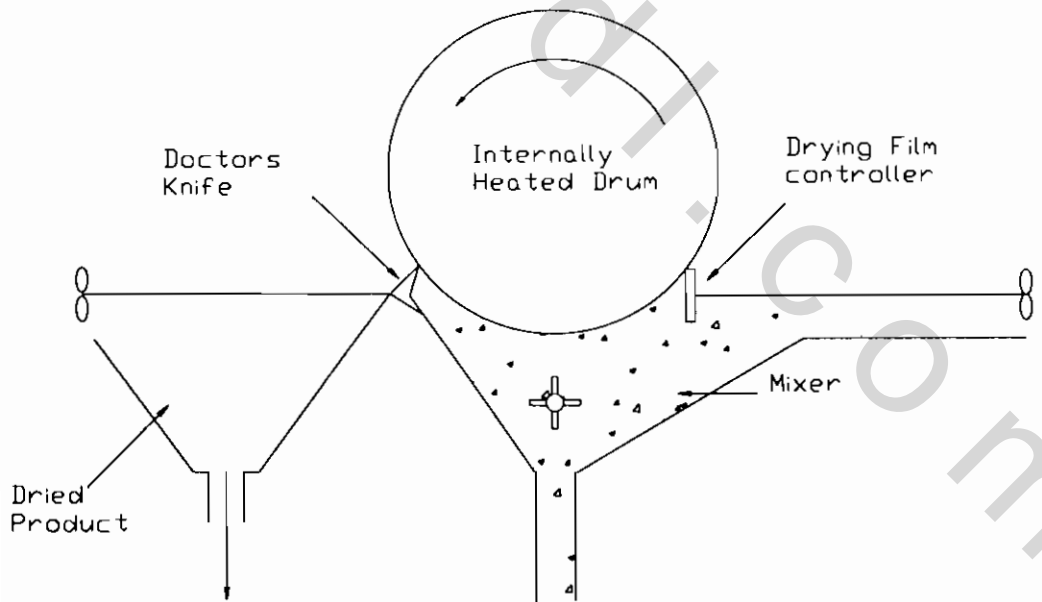
وتتكون هذه المجففات من اسطوانة بها ريش تقلب مئبته على طول محيطها الداخلى. وتدور الاسطوانه حول محورها الطولى افقيا بواسطة ترس مثبت حول محيطها الخارجى وعند منتصفها ومتصل بترس آخر على عمود ادارة موتور كهربائى. وتحمل الاسطوانة على بكرتين او اكثر من الحديد الزهر عند طرفيها. ويتم تغذية المجفف بالمادة المراد تجفيفها بواسطة قمع تلقى مخروطى الشكل عند احد طرفيها (الطرف الرطب)، ويتم نقل المادة داخلها مع تقليبها بصفه مستمره نتيجة للريش الداخليه. وكذلك يمكن التحكم فى سعته بواسطة تعديل زاوية ميل محورها الطولى على المستوى الافقى كما هو مبين فى شكل (١١-٦). وهناك طرق اخرى

لإدارة اسطوانة المجفف مثل طريقة استخدام بكرات احتكاك وفى هذه الطريقة تثبت كمرات مجرى عند طرفى الاسطوانة حول محيطها الخارجى ، وتدار البكرات بواسطة موتور كهربائى ويتم نقل الحركة الدائرية للأسطوانة عن طريق احتكاك البكرات على أسطح كمرات المجرى.

وعادة ماتستخدم نواتج الاحتراق مباشرة فى تسخين الهواء اللازم لتجفيف الاعلاف مما يؤدى الى خفض التكاليف اللازمه للوقود وفى كثير من البلاد مثل كندا وأوربا تصنع هذه المجففات بحيث يمكن نقلها على مقطورات من مكان الى آخر حتى تتم عملية تجفيف الاعلاف فى نفس المنطقة الموجودة فيها ، وبذلك يمكن الاقلال من مصاريف النقل التى تمثل جزءا كبيرا من تكاليف انتاج الاعلاف المجففة ، اذ ان مواد العلف الخضراء تحتوى على نسبة عالية من الرطوبة تصل احيانا الى ٩٠ - ٩٢٪ وبذلك يمكن انتاج اعلاف مجففة رخيصة .

٥- المجففات ذات الاسطوانات : Drum Driers

هذه المجففات شائعة الاستعمال فى تجفيف المواد الغذائية السائلة والشبه سائلة مثل اللبن الكامل او الفرز ، عصير بعض انواع الفواكه والخضروات مثل الطماطم التى كثر استعمالها بمعدل كبير خصوصا فى الولايات المتحدة الامريكىة ، كما انها تستخدم فى تجفيف انواع الحساء (الشوربه) المختلفه وتحويلها على شكل مساحيق .



شكل (٧-١١) قطاع فى المجفف الاسطوانى

وتتكون هذه المجففات من اسطوانه معدنيه واحدة او اثنين ، يختلف معدنها باختلاف المادة الغذائية المراد تجفيفها . وعادة ما تصنع من الحديد الزهر او من الصلب الغير قابل للصدأ خاصة عند تجفيف عصير الخضر والفواكه حتى لاتتفاعل مع الاحماض الموجودة بهذه المواد . وتتم عملية التجفيف بان تتساقط المادة المراد تجفيفها على السطح الخارجى للأسطوانات بحيث يتكون غشاء او طبقة رقيقه جدا من المادة المراد تجفيفها والتي تستمد الحرارة اللازمه لعملية التجفيف من سطح الاسطوانات التى يمر داخلها بخار . ويمكن كذلك تكوين طبقة السائل الرقيقه بان توضع المادة الغذائية السائله فى حوض او اناء اسفل الاسطوانات بحيث يمس سطح الاسطوانات الخارجى السائل عند دورانها ، ويتم تجفيفها على سطح الاسطوانات وتستخدم سكينه او حافه حادة على الاسطح لفصل الطبقة المجففة وتجميعها فى حوض المنتج كما هو مبين فى شكل (١١-٧). وهناك بعض التصميمات يمكن فيها احدثات تفرغ داخل الاسطوانه ، وهى احدث النظم المستخدمه فى انتاج المواد الغذائية المجففة حيث تحتفظ بمعظم صفات المادة الطازجه . وتتوقف مدة التجفيف ومعدله على سرعة دوران الاسطوانات وضغط البخار داخلها وكذلك على سمك طبقة المادة المجففة على السطح الخارجى للأسطوانات .

ويتميز هذا النوع من المجففات بان تكاليف انتاج المواد المجففة تكون قليلة اذ انه فى المتوسط تحتاج مثل هذه المجففات الى ٢-٣ كيلوجرام بخار لكل كيلوجرام رطوبه متبخره من المادة الغذائية . ونظرا لان مساحة سطح انتقال الحرارة يكون كبير (مساحة السطح الفعال تكون حوالي ثلاثة ارباع سطح الاسطوانه الواحده) فان معدل التبخير يرتفع ويتراوح بين ٢ - ٤ كجم رطوبه متبخره لكل مترمربع من سطح التبادل الحرارى فى الساعه .

٦- مجففات الرذاذ : Spray Driers

تستخدم هذه المجففات فى تجفيف المواد الغذائية السائله والمحاليل والمستحلبات مثل البيض واللبن وعصير الفواكه والخضروات وتحويلها الى مساحيق . وتتم عملية التجفيف بتذرية السائل على هيئة ذرات دقيقه فى صورة ضباب معلق فى الهواء الساخن وبذلك يتم تبخير الرطوبه بسرعة فائقه يترتب عليها ترسيب المادة الجافه فى القاع على صورة مسحوق حيث يتم سحبها بواسطة مراوح خاصه الى سيكلونات الترسيب . ويتم تفتيت السائل الى جزئيات باحدى طريقتين:

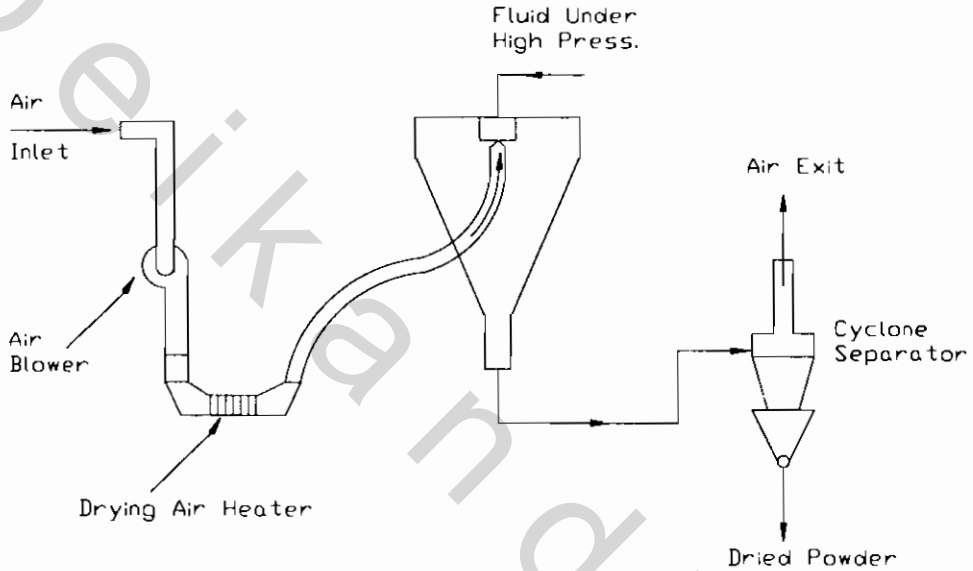
أ- استخدام طلمبات ذات ضغط مرتفع لدفع السائل داخل ثقب ضيقه (٢٠٠٠

- ٤٠٠٠ رطل/بوصه^٢ أو ١٤٠ - ٢٨٠ كجم/سم^٢).

التجفيف

ب- استخدام هواء مضغوط فى ادارة اقراص بسرعه عاليه يتسبب عنها دفع السائل بالقوه الطاردة المركزيه لاحداث التفتيت المطلوب .

أما السيكلونات فهى عبارة عن اوعيه مخروطية الشكل بها اسطح داخليه ملساء يمكن بواسطتها تقليل سرعة الهواء المحمل بالمسحوق الجاف ، فتسمح بترسيب المسحوق على الاسطح الداخليه للسيكلونات وبذلك يسهل عملية فصلها .



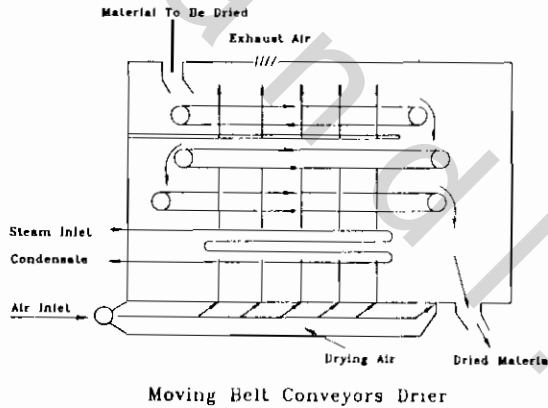
شكل (٨-١١) رسم تخطيطى لوحدة تجفيف بالرداذ

ويتكون مجفف الرذاذ من حجرة رئيسيه من المعدن (غالباً من الصلب الغير قابل للصدأ) على شكل مخروطى اسطوانى كما هو مبين فى شكل (٨-١١) . وتستخدم مروحة فى دفع الهواء داخل هذه الحجرة بعد اتمام تسخينه أما بواسطة مسخن بخار او كهرباء او غاز البوتاجاز ، حيث يتم اختلاطه بذررات السائل وتستغرق مدة التجفيف حوالى ٢٠ ثانيه للحصول على مسحوق السائل المتجمع علي اسطح الحجرة الداخليه . ويعاب على هذا النوع من المجففات انخفاض الكفاءة الحراريه للتجفيف اذ يحتاج الكيلوجرام الواحد المتبخر من الرطوبه الى حوالى ٢٣٥٠ كيلوكالورى فى حين لا يحتاج الى اكثر من ١٤٠٠ كيلوكالورى فى حالة استخدام مجففات النفق . الا ان هذا النوع من المجففات يتميز بسرعة التجفيف التى رغم ارتفاع درجة حرارة هواء التجفيف فيها (حوالى ١٢٠°م) فتنخفض درجة حرارة المادة وهى فى حالة رذاذ الى درجة منخفضه جدا وذلك نتيجة لسرعة عملية التبخير (قد تصل درجة حرارة ذرات المادة الى حوالى ٤٠°م).

٧- مجففات النفق Tunnel Driers

وهذه المجففات تعمل بطريقة النظام المستمر Continuous Driers وتمتاز بكبر سعتها وامكانية التحكم فى العوامل التشغيلية المختلفه اللازمه للتجفيف . وحتى يمكن استخدامها بدون انقطاع فانه يلزمها مدة تسخين ابتدائيه Come-Up time حتى يمكن الوصول الى الظروف الهوائيه المستقره لعملية التجفيف . وتتراوح هذه المدة من ٦ - ٨ ساعات على الاقل . وتستعمل هذه المجففات فى تجفيف الفاكهه والخضر واحيانا اللحوم والاسماك .

ومجففات النفق تتكون من حجرات طويلة مقطعتها مستطيل اذ يبلغ ارتفاعها حوالى ١.٥ - ٣ متر وطولها حوالى ١٠ - ١٢ متر وتوضع المادة المراد تجفيفها على صوانى التجفيف التى تحملها عربات يمكن قطرها بواسطة جنازير او احبال بسرعة مناسبة داخل النفق ، تتراوح عدد صوانى كل عربه من ٢٠ الى ٣٠ صنيه مرتبه بحيث تكون هناك مسافه كافيه بين كل صينيه واخرى تسمح بمرور هواء التسخين خلال المادة الرطبه . وتدخل العربات المحمله بصوانى التجفيف من احد طرفي المجفف ويسمى بالطرف الرطب Wet side وتخرج من الطرف الآخر ويسمى بالطرف الجاف



شكل (٩-١١) مجفف ذو سيور

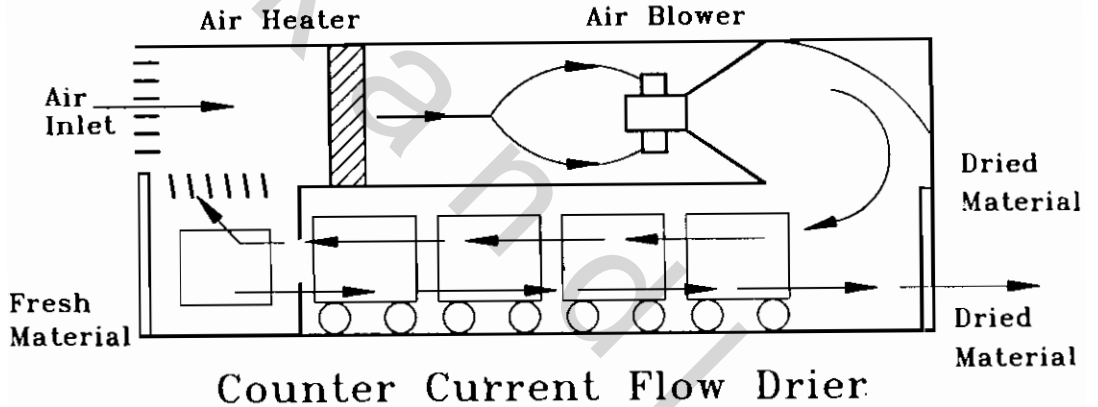
Dry side . وفى بعض التصميمات شكل رقم (٩-١١) تتكون المجففات من حصيره متحركة او سيور لانهايه تتحرك داخل نفق التجفيف ، وتصنع من الشبك المعدنى او من سدايات خشبيه رقيقه تتباعد عن بعضها بمسافات صغيره بحيث لاتسمح للمادة المراد تجفيفها بالسقوط من خلال هذه الفتحات . والمجففات ذات السيور الناقله مرتفعه فى تكاليف الانشاء وقليله فى معدل انتاجها ، وهى غير منتشره الاستعمال ولا تصلح فى تجفيف ثمار الفاكهه لتعرضها للتهشم عند سقوطها من سير الى آخر . وتوضع مواسير البخار (سربنتينات) عادة بين كل سير وآخر . ويدفع

التجفيف

هواء التجفيف من اسفل الى اعلى فيمر على اسطح المواسير الساخنة ثم خلال السيور المحملة بالمادة المراد تجفيفها . ويفضل عليها مجففات النفق ذات العربات والصواني اذ يمكن التحكم فى معدلات التجفيف بتغيير اتجاه مرور هواء التجفيف التى تتحدد سرعته على اسطح المادة المراد تجفيفها بالتحكم فى المسافات بين الصواني وبعضها حتى لا يحدث جفاف سطحى خصوصا لثمار الفاكهه عند ما تزيد سرعة التجفيف عن الحد المناسب .

ويمر هواء التجفيف الساخن على اسطح الصواني المحملة بالمادة الرطبه باحدى الطرق الآتيه :

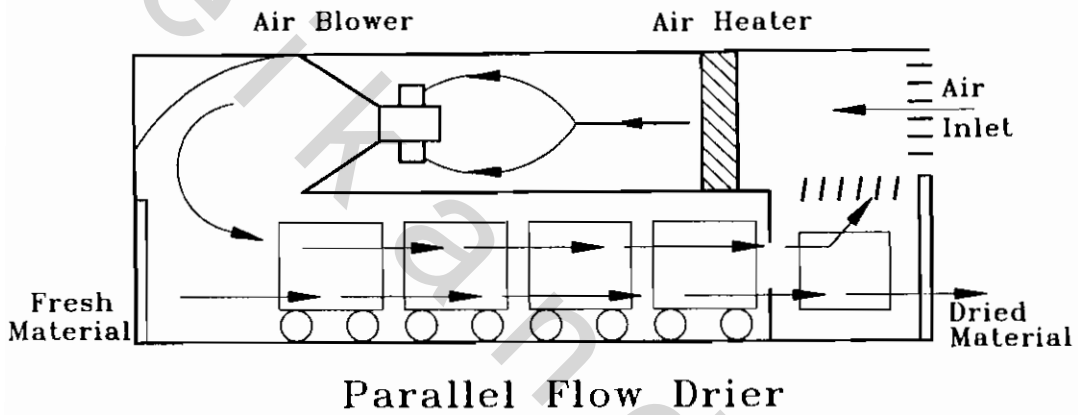
١- النظام العكسى : Counter-current flow



شكل (١١-١٠) مجفف نفق متعاكس

وفيه يمر هواء التجفيف فى اتجاه مضاد لاتجاه حركة العربات فيدفع الهواء بعد تسخينه بواسطة مروحة دفع Air Blower من الطرف الجاف لنفق التجفيف الى الطرف الرطب وبذلك يلامس الهواء الاكثر سخونه والاكثر جفافا المادة الغذائيه التى قاربت على انتهاء تجفيفها وعلى ذلك نجد انه يمكنها تحمل درجات الحرارة المرتفعه نسبيا دون حدوث حالة الجفاف السطحى لها كما هو مبين في الشكل (١١-١٠). ويفضل استخدام هذا النظام فى تجفيف ثمار الفاكهه خاصة العنب وعلى عكس الخضر فيجب تجفيف ثمار الفاكهه ببطء حتى لاتتعرض لحالة الجفاف السطحى.

ب- النظام المتوازي : Parallel flow

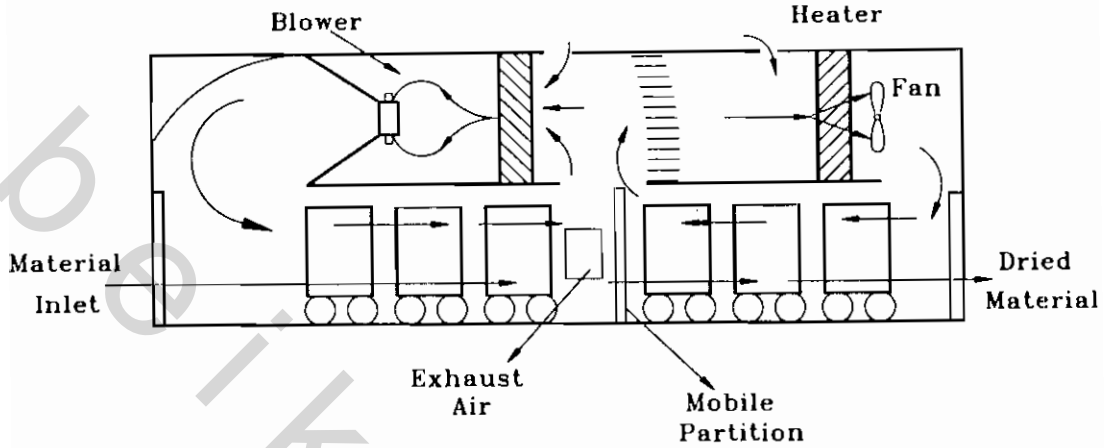


شكل (١١-١١) مجفف نفق متوازي

وفى هذا النظام يتحرك الهواء فى اتجاه موازى لتحرك العربات المحملة بالمواد المراد تجفيفها ، فيدخل الهواء بعد تسخينه مع المادة الرطبة من الطرف الرطب لنفق التجفيف كما هو مبين فى الشكل (١١-١١) وحيث ان الهواء الساخن يقابل المادة ذات الرطوبه المرتفعه فانه يمكن استعمال درجات حرارة عاليه فى التجفيف عن النظام العكسي بدون تعريض المواد المجففه الى التلف نتيجة للتلف السطحى لها . ولايفضل استخدام هذه الطريقه فى التجفيف فى المواد التى تجف ببطء مثل القراصيا الا اذا كانت حمولة الصوانى ضعيفه جدا . وتستعمل بنجاح تام فى الخطوات الاولى من التجفيف خاصه فى حالة تجفيف الخضر المجزءه الى قطع سميكة نوعا حيث يقابل الهواء الجاف الساخن فى بداية عملية التجفيف فيفقد السطح المعرض للهواء رطوبته بسهولة وسرعه .

ج- النظام الثنائي ذو المداخل الوسيطة

Mixed flow-central suction:



Dual Drier With Intermediate Ports

شكل (١١-١٢) مجفف نفق مركب

اذا استخدم فيها الطريقتين السابقتين معا ، فيتم تجفيف المادة الغذائية على مرحلتين . المرحلة الابتدائية ويمر فيها هواء التجفيف المسخن ذو درجة الحرارة المرتفعة فى اتجاه موازى لمرور العربات ، والمرحلة الثانية يمر فيها الهواء فى اتجاه عكسى لمرور العربات . وتستخدم فى هذا النظام حواجز او فواصل مرنة من المطاط او الخشب او القماش السميكة لتنظيم حركة الهواء داخل النفق . ويدخل هواء التجفيف من فتحة وسطى فى نفق التجفيف ويمر فى اتجاه طرفى النفق ، موازىه عند الطرف الرطب وعكسيه عند الطرف الجاف للنفق كما هو مبين فى شكل (١١-١٢) .

ويتم فى المرحلة الاولى تبخير حوالى ٩٠٪ من رطوبة المادة بسبب استخدام درجات حرارة عالية . ويجب استخدام درجات حرارة منخفضة فى هواء تجفيف المرحلة الثانية حتى لا يعرضها للاحتراق او التشقق السطحى وعلى ذلك يزود نفق التجفيف بسخانين احدهما يعطى كمية حرارة محدودة عند الطرف الجاف والاخر يولد كمية عالية من الحرارة عند الطرف الرطب . ومن المعروف ان سرعة التبخير فى المرحلة الثانية تكون بطيئه وبذلك تنخفض نسبة الرطوبة فى الهواء الخارج من تجفيف هذه المرحلة مما يساعد على استخدام هذا الهواء بخلطه بهواء تجفيف المرحلة الاولى حتى يمكن الاستفادة من حراره الموجوده فيه والاقلال من تكاليف عملية التسخين .

الباب الثانى عشر

التبريد والتجميد COOLING AND FREEZING

نظريات التبريد

الحفظ باستخدام درجات الحرارة المنخفضة :

ويقصد بذلك حفظ المواد الغذائية سواء الخام او بعد تجهيزها ، فى وسط ذو درجة حرارة منخفضة وبحيث تصل درجة حرارة المادة المراد حفظها الى درجة حرارة الوسط المحيط بها ، مع استمرار درجات حرارة كل من الوسط والمادة المحفوظة على الدرجة المراد تخزينها عليها، اى الدرجة المناسبه . هذا وقد استخدمت هذه الطريقه من طرق الحفظ فى حفظ الكثير من الاغذية لبيعها فى كثير من المناطق القطبيه ، الا انه فى المناطق الاخرى التى لاتتوفر فيها هذه الظروف فتستخدم عمليات تبريد صناعية . ويمكن تعريف التبريد بأنه عملية امتصاص الحرارة من جسم فى درجة حرارة اقل من درجة حرارة الجو المحيط به ، او هو عملية نقل الحرارة من جسم ذو درجة حرارة منخفضة الى جسم ذو درجة حرارة مرتفعه .

ونتيجة للتفاوت فى درجات الحرارة التى يمكن الوصول اليها واستخدامها فى حفظ الاغذية فانه يختلف التأثير الحافظ لهذه الدرجات على الاغذية المختلفه تبعاً لعوامل فسادها . فاذا استخدمت درجات حرارة تبلغ حداً من الانخفاض يكفى لتجميد المادة الغذائية ولن يتم ذلك الا باستخدام درجات حرارة اكثر انخفاضاً من درجات تجميد هذه المواد ويطلق على هذه الطريقة اسم الحفظ بالتجميد Freezing Preservation وعادة تتراوح درجات حرارة تجميد الاغذية بين -2°C الى -28°C .

الوسائل المستخدمة فى خفض درجات الحرارة :

تختلف الوسائل التى تصلح لخفض درجات حرارة كل من وسط التبريد والمادة المراد حفظها عن طريق استخدام درجات الحرارة المنخفضه باختلاف ظروف عملية التبريد ذاتها والمادة المراد حفظها ودرجات الحرارة المنخفضة المطلوب الوصول اليها وكذلك باختلاف امكانيات العمليه ذاتها . ويقسم التبريد الى نوعين اساسيين هما :

أولا : التبريد الطبيعي :

١- استخدام الثلج العادي :

يستخدم الثلج كوسيط تبريد فعال عند درجات حرارة انصهاره تحت الظروف الآتية :

- ١- عندما يراد احداث التبريد على فترات قصيرة .
- ٢- بعد المكان المراد عمل التبريد به عن اماكن توليد الطاقة الكهربائية .
- ٣- رخص سعر الثلج .

ودرجة حرارة انصهاره حوالى الصفر المئوى ، فاذا وجد فى جو حار فينصهر بامتصاص كمية من حرارة الجو وبالتالي يتم تبريده . الا انه غالبا لا يمكن ، عن طريق استخدام الثلج وحده مهما زادت الكمية المستخدمة بالنسبة للحيز المراد تبريده ، الوصول بدرجات الحرارة الى درجات اقل من صفر الى -4°C . لذلك فانه لا يوفى باغراض التبريد لمدة طويلة نسبيا او لحيازات كبيرة نوعا بطريقة يمكن استخدامها فى التبريد تجاريا ، هذا الى جانب الحاجة الى استمرار استخدام كميات من الثلج بصفه مستمره مع ضرورة التخلص من الماء الناتج عن الانصهار كذلك فان وصول جزء من الماء المنصهر الى المادة المراد تبريدها يؤدي الى رفع نسبة الرطوبة بها الى جانب اعتبار الثلج نفسه أحد مصادر التلوث لبعض الأغذية ، لذلك فان هذه الوسيلة لاتفى باغراض التبريد التجارى الا انها لازالت تستخدم فى بعض الحالات المحدودة فى تبريد الفاكهه والخضروات لامتناس حرارة الحقل وكذلك فى تبريد اللحوم والاسماك للتخلص من الحرارة المنبعثة منها .

ملحوظة :

وتقدر الحرارة الكامنه اللازمه لانصهار رطل واحد من الثلج العادى ١٤٤ وحدة حراريه بريطانيه ، وتلك اللازمه لكيلوجرام واحد من الثلج العادى ٧٩ . ٩ كيلو كالورى .

ب- استخدام المخليط المبرده :

والتي اهمها مخلوط الثلج والملح خاصة عند وجود كل من الثلج والملح فى حالة مجروش . وتعتمد درجة حرارة المخلوط على النسبه المئويه للملح فى المخلوط ، حيث انه من المعروف طبيعيا انه كلما زادت نسبة الملح بالنسبه للثلج كلما امكن الوصول الى درجات حرارة اكثر انخفاضا . وتفسير هذه الظاهرة على أساس الخواص

الطبيعيه لبلورات الثلج مما يجعل الماء المنصهر المتخلف فى حالة مرتبطة وبذلك يلزم وجود طبقة اخرى من الماء لتغليف بلورات الثلج وهذا لن يحدث الا نتيجة لانصهار كمية اخرى من الثلج الذى لا يتم الا بامتصاص كمية مناسبة من الحرارة سواء من الثلج المجاور او من الوسط المحيط بصفه عامه مما يؤدى فى النهايه الى امكان الوصول الى درجات الحرارة المنخفضه ويساعد ذلك كما سبق زيادة سطح الثلج المعرض اى وجوده فى صورته مجروش .

والجدول الآتى جدول (١٢-١) يبين علاقه بين النسبه المئويه للملح فى المخلوط ودرجة حرارة المخلوط :

جدول (١٢-١) درجة حرارة تجمد مخاليط الثلج والملح

درجة حرارة المخلوط		النسبه المئويه للملح فى المخلوط (نسبه وزنيه)
م°	ف°	
صفر	٣٢	صفر
٢٨-٢٠	٢٧	٥
١٨-٦	٢٠	١٠
١١٧-١١	١١	١٥
١٦٨-١٠	١٠	٢٠
٢٣٢-١٠	١٠	٢٥

الثلج الجاف (ثانى اكسيد الكربون) : Dry Ice

ويحدث التبريد بامتصاص الثلج الجاف للحرارة من المواد المراد تبريدها ويتحول الثلج الجاف من حالته الصلبه الى حالة غازيه مباشره وبدون تحوله الى سائل فلا يترك آثار من الماء كما يحدث عند استعمال الثلج . وقدرت الحرارة الكامنه اللازمه لتحويل رطل واحد من الثلج الجاف الى غاز (بين درجة حرارة - ١٠٦ الى - ١٢٣°ف) فوجد انها تساوى ٢٤٦٢ وحدة بريطانيه . والحراره الكامنه اللازمه لتحويل كيلوجرام واحد (بين درجة حرارة - ٧٧ الى - ٨٦°م) ، تساوى ١٣٦٧ كالورى .

ويستخدم الثلج الجاف بصفه خاصه فى نقل الخضر والفاكهه بالسيارات او بعربات السكك الحديدية اذ ان وزنه خفيف ولايتترك اثرا للماء ولا يتفاعل مع جدران السيارات كما انه عديم الرائحة وغير قابل للاشتعال .

ثانيا : التبريد الصناعى :

ويعتمد على استغلال الحرارة الكامنه للسوائل المتطايره التى تمتص عند تبخيرها جزءا من حرارة الهواء المحيط بها ويختلف مقدار هذا الجزء باختلاف كمية الحرارة الكامنه لهذه السوائل . ولكى تكون عملية التبريد اقتصادية فانه يلزم تحويل السوائل بعد تطايرها الى الحالة السائله حتى يمكن استخدامها مره اخرى . وهذا معناه انه يجب سحب الحرارة الكامنه لتكثيفها الى سائل مره اخرى وذلك يستلزم ملامستها لجسم درجة حرارته اقل من درجة حرارة تبخر هذه السوائل . ويمكن الوصول الى هذا الغرض باستخدام خواص السوائل الثرموديناميكيه فنجد انه عند ارتفاع الضغط الواقع على السائل ترتفع درجة حرارة تكثيفه عن درجة حرارة الجو المحيط به وينتج عن ذلك التخلص من الحرارة الكامنه به وتكثفه الى سائل تحت ضغط مرتفع .

ويمكن تلخيص نظرية التبريد الصناعى بالقوانين الآتيه :

- ١- تمتص السوائل عند تبخيرها الحرارة الكامنه اللازمه للتبخر من حرارة الهواء المحيط بها ، وبذلك يمكننا خفض درجة حرارة غرفة محدوده الحجم معزوله عن الخارج بان نمرر داخلها سائل يمتص حرارته الكامنه من الغرفه لكى يتحول الى غاز .
- ٢- تعتمد درجة حرارة تبخر السائل على الضغط الواقع عليه فترتفع درجة حرارة التبخر بارتفاع الضغط وتنخفض بانخفاضه وبذلك يمكننا ان نتحكم فى درجة حرارة الغرفه بان ننظم مقدار الضغط الواقع على سائل التبريد الذى يمر داخل الغرفه .
- ٣- تتحول الغازات الى سوائل عند تغيير الضغط الواقع عليها عند درجات حرارة معينه ، وبذلك يمكننا تحويل الغازات الناتجة عن تبخر سوائل التبريد داخل الغرفه الى سوائل مره اخرى وذلك بتغيير الضغط الواقع عليها والاستفاده منها مره اخرى بامرارها داخل الغرفه وهكذا . وتتم هذه العمليه بواسطه ضغط الغازات الناتجة عن تبخر السائل بواسطه مكابس خاصه وبذلك ترتفع درجة حرارة تكثيفها عن الجو المحيط بها فيسهل التخلص من حرارتها الكامنه وتحويلها الى الحالة السائله .

أنواع السوائل المبردة : Refrigerants

هى السوائل التى تتبخر عند تقليل الضغط الواقع عليها وهى متعددة الانواع ويشترط فيها :

- ١- انخفاض درجة حرارة التبخر والتكثيف .
 - ٢- يلزم لتبخرها او تكثيفها كمية كبيرة من الحرارة الكامنة .
 - ٣- سهولة ضغط ابخرتها لتحويلها الى الحالة السائلة .
 - ٤- ذات حجم نوعى صغير (كثافتها عالية) .
 - ٥- عديمة التأثير على المعادن الملامسه لها .
 - ٦- خلوها من الرائحة النافذه وعدم قابليتها للالتهاب او الانفجار .
 - ٧- سهولة اكتشاف مواضع تسربها .
 - ٨- اقتصاديه فى الثمن .
 - ٩- غير سامه .
 - ١٠- لا تتأثر بالرطوبه .
- والسوائل الشائع الاستعمال فى التبريد الصناعى تشمل مايتأتى :-
- ١- الفريون بجميع مركباته (فريون ١١ - ١٢ - ٢١ - ٢٢ - ١١٣ - ١١٤) .
 - ٢- ثانى اكسيد الكبريت .
 - ٣- ثانى اكسيد الكربون .
 - ٤- النشادر .
 - ٥- كلوريد الميثيل .
 - ٦- البيوتان .

وقد لاحظ علماء الفيزياء والبيئه على مدى نصف القرن الماضى أن هناك تغير ملحوظ فى درجات الحرارة وكمية الاشعاعات على سطح الكره الأرضيه . وحيث أنه من المعروف علميا بأن هناك طبقه كثيفه تسمى طبقه "الأوزون" تمثل غطاءً كيماويا فى الأجواء العليا . وهذه الطبقة تساهم فى حماية كوكب الأرض عن طريق تحديد حجم الأشعه فوق البنفسجيه التى تصل إليه من أشعه الشمس وأن أى زيادة فى هذه الأشعه تتسبب فى تهديد حياة الانسان والحيوان والنبات نتيجة للتغير الجذرى فى الطقس على سطح الأرض مع سقوط الأشعه الضارة من الشمس .

ومن خلال الدراسات التى أجريت على هذه الظاهره تبين أن هناك تفاعلات نتجت عن استخدام الأيروسولات عامة وغازات الفريون بأنواعها فى إحداث ثقب فى طبقه الأوزون .

وقد قامت الوكالة الدولية للأرصاء الجويه بمراقبة إتساع ثقب الأوزون على مدى الأربعين عاما الماضية والتي قد بلغت مساحته الآن حوالى عشرة ملايين كيلومتر مربع وهى توازى مساحة القارة الأوروبية تقريبا . وأكدت الوكالة أن مساحة الثقب الذى اخترق طبقة الأوزون فوق المنطقه القطبيه الجنوبيه قد تضاعف خلال العام الماضى وأنه فى اتساع مستمر بمعدل ١٪ يوميا .

ونتيجة لذلك إتخذت المنظمه الدوليه للبيئه التابعه للأمم المتحددة عدة قرارات والتي من بينها إيقاف استخدام غازات الفريون تدريجيا بحيث يتم ذلك الإيقاف نهائيا بنهاية القرن الحالى .

وقد تم التوصل إلى بدائل لهذا الغاز حديثا بغاز تبريد سمي R134a (Refrigerent 134a) تركيبه الكيماى Tetrafluoroethan 1, 1, 1,2 ورمزه CH_2F_2 وأعطى الاسم التجارى Reclin 134a وله نفس الخصائص الطبيعیه والكيماييه لموانع التبريد الأخرى ويتميز عن موانع مركبات الفريون من حيث الغازات والأبخرة الناتجه عنه لا يحدث عن تفاعلها مع طبقات الجو العليا إختراق لطبقة الأوزون الحاميه للأرض من الاشعاعات الضاره . وتوجد شركات متخصصة فى انتاج هذه الموانع وتأخذ رموز تعبر عن كل شركة مثل G, R

ويجب مراعاة النقاط الآتیه عند اختيار سائل معين لاستعماله بوحداث التبريد المختلفه :

١- التفاعلات الكيماييه :

ينعدم تأثير ثانى اكسيد الكبريت على الصلب والنحاس اذا كان جافا تماما ، اما اذا وجدت بعض الرطوبه فيتحول ثانى اكسيد الكبريت الى حامض الكبريتوز الذى يتسبب وجوده فى تآكل المواسير الصلب والنحاس والسبائك المشابهه ، غير ان وجود الرطوبه مع سائل النوشادر لا يؤثر بتاتا على المعادن المختلفه .

٢- وجود رطوبه بوحداث التبريد :

يذوب الماء فى ثانى اكسيد الكبريت وثانى اكسيد الكربون والنشادر وبذلك عند مرور الغاز المحمل ببخار الماء بالمناطق التى تنخفض فيها درجات الحرارة ، لايتجمد الماء فلا يحدث انسداد فى مواسير او صمامات التحكم الخاصه بوحدة التبريد . ويحدث عكس ذلك بالنسبه للفريون بجميع مركباته اذ ان الماء لا يذوب فى هذه المركبات ، ووجود الرطوبه يسبب انسداد المواسير حيث يتجمد ويهدد حدوث انفجار

بوحدة التبريد خصوصاً في المناطق التي يكون بها الضغط مرتفع ويوضع عادة في مواسير سائل الفريون مرشح لامتناس الرطوبة التي قد تكون عالقه به حتى لا تتعرض وحدة التبريد لاختار حدوث انسداد في المواسير .

ويعتبر سائل الفريون من اكثر السوائل استعمالاً ، ويوجد عدة مركبات له يرمز لها بارقام مختلفه هي في الواقع اسمائها التجارية مثل فريون ١١ ، ١٢ ، ٢١ ، ٢٢ ، ١١٣ ، ١١٤ وتمتاز جميع سائل الفريون بانها غير سامه وغير قابله للاشتعال او الانفجار الا انها تتسبب في اتساع ثقب الازون ويجري حالياً تعديلها واستبدالها بنوعيات اخري ليس لها هذا الاثر .

النظم الرئيسيه للتبريد الصناعي :

أولاً : التبريد الصناعي بالضغط : Compression System

ويعتبر من الطرق الشائعه الاستعمال في الاغراض المنزليه والتجاريه نظراً لكفاءتها العاليه وبساطه تصميمها ، وتتلخص دورة التبريد بالضغط في الخطوات الآتيه :

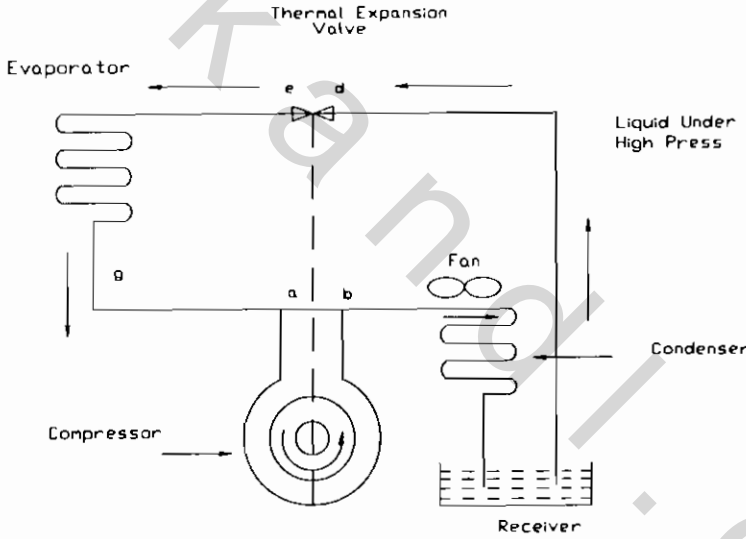
١- تبخر السائل المبرد تحت ضغط منخفض حيث يمر السائل في انابيب المبخر Evaporator (الجزء الذي توجد حوله ماده المراد تبريدها) ويكون ضغط السائل منخفضاً فتكون درجة حراره تبخيره منخفضه ولكن يتحول من الحاله السائله الى الحاله الغازيه يمتص الحراره اللازمه لتبخيره من الجو المحيط به وبذلك تنخفض درجة حراره ماده المراد تبريدها .

٢- ضغط الغاز الناتج لرفع درجة حراره تكثيفه ويتم ذلك بواسطه ضاغط الغاز ، وتكون وظيفه الضاغط خفض ضغط الغاز في المبخر من جهة ورفع ضغطه في الجهه الاخرى من الضاغط وبذلك ترتفع درجة حراره الغاز عند درجة حراره المنطقه المحيطه به .

٣- تكثيف هذا الغاز على درجة حراره مرتفعه حيث يمر الغاز داخل انابيب المكثف التي تكون محاطه بالماء او الهواء وينتج عن ذلك ان الغاز يفقد حرارته الكامله ويتحول الى سائل تحت ضغط مرتفع ويجمع السائل الناتج في مستودع او قابله Receiver ويكون الماء المستخدم في التكثيف عادة على شكل رذاذ من رشاشات (دش) ويمكن اعاده تمريره بواسطه طلمبه صغيره . ويكون المكثف في الوحدات الكبيره على شكل مبادل حرارى يحيط بمواسير السائل المبرد ويحدث تجديد

بصفه مستمره وسريعه لطبقة الماء الملامسه لسطح التبادل الحرارى . ويستخدم الهواء فى تكثيف السائل المبرد باستعمال مروحة دفع Blower لزيادة كفاءة التكثيف بزيادة سرعة مرور الهواء على اسطح مواسير المكثف .

٤- انقاص الضغط على السائل المبرد لخفض درجة حرارة غليانه وتبخيره ، وتتم هذه العملية بسحب السائل الموجود بالمستودع تحت ضغط مرتفع الى صمام خاص يفصل منطقة الضغط المرتفع بالمكثف والقابله عن منطقة الضغط المنخفض فى البخار ويسمى هذا الصمام بصمام التمدد الترموستاتيكي او صمام الانتشار Thermal Expansion Valve .



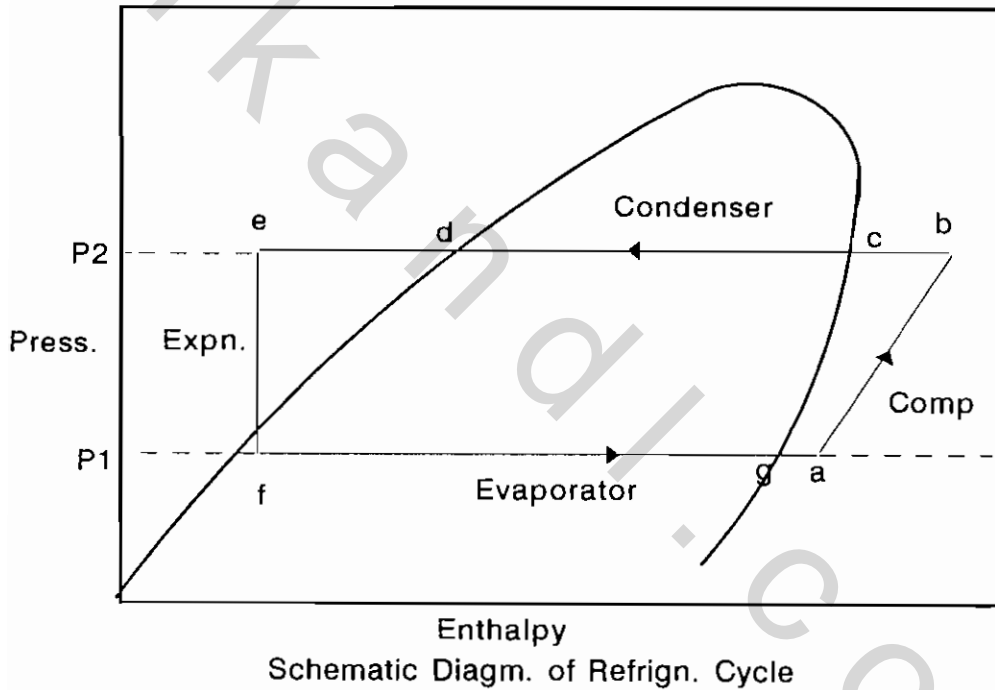
Compression Refrigeration System

شكل (١٢-١) نظام التبريد الصناعى بالضغط

ويمثل الشكل (١٢-١) رسم تخطيطى لاجزاء دورة التبريد الصناعى بالضغط ، كما يشير الرسم البيانى المقابل الى العلاقة بين الضغط وكمية الحرارة للسائل المبرد اثناء مروره بالاجهزة المختلفه لدورة التبريد ، وفيه يمر السائل المبرد من القابله فى حالة بين الحالتين d , e الى صمام الانتشار الترموستاتيكي عند الحالة e حيث يتحول السائل المبرد الى مخلوط من السائل والغاز الى ان يصل الى الحالة g حيث

يكون عندها غاز مشبع ، ويمتص هذا الغاز الحرارة من الجو المحيط به ليصبح محمضاً عند الحالة a حيث يدخل الغاز الى الضاغط ويضغط ليصل الى الحالة b . ويفقد الغاز مقدار حرارة تجميحه اثناء مروره داخل ماسورة التوصيل الى المكثف حيث يصل الى الحالة c فيتكثف الغاز عند ضغط مرتفع وثابت ليصل الى الحالة d وتكرر الدورة مره اخرى .

يتكون المبخر عادة من مجموعه من الانابيب يتحول فيها السائل المبرد من الحالة السائلة الى الحالة الغازية ، وتوجد داخل غرفة التبريد ووظيفته الاساسيه هو امتصاص الحرارة اللازمه لتبخير السائل المبرد من الجو المحيط به (المواد المراد تبريدها) .

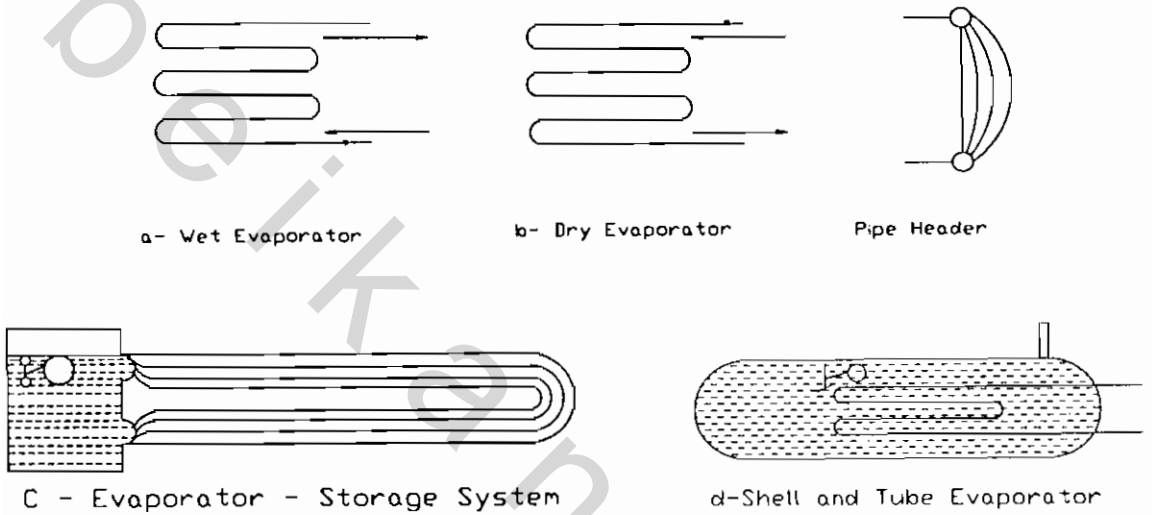


شكل (١٢-٢) تمثيل دورة التبريد على خريطة التبريد

شكل (١٢-٢) يمثل العلاقة بين الضغط الواقع على السائل المبرد وكمية الحرارة

الاجزاء الرئيسيه لدورة التبريد الصناعى بالضغط :

١- المبخر أو أنابيب التبخير :



شكل (١٢-٣) نماذج لأنواع مختلفه من المبخرات

وتصنع أنابيب (مواسير) التبريد عادة من النحاس الاحمر او الاصفر او الصلب او الالومنيوم، ويعتبر النحاس انسب المعادن فى حالة استخدام الفريون كسائل مبرد حيث انه لا يؤثر على النحاس ، فى حين تستعمل أنابيب من الصلب فى حالة استخدام النشادر او ثانى اكسيد الكبريت وذلك لتأثير النشادر على النحاس وذلك فى حالة الرغبة فى احدث تبريد فى غرفة ما الى درجة حرارة اعلى من 34°F أو 1°C وخاصة اذا كان الهواء هو الوسيط فى نقل الحرارة ويفضل استخدام مواسير مزودة بزعانف أو ريش من نفس معدن المواسير لزيادة سطح التبريد الملامس للجو المراد تبريده ، ولا تفضل الزعانف فى حالة التبريد لأقل من 34°F او الصفر المئوى وذلك لان الرطوبه الموجوده بهواء غرفة التبريد تتجمد على اسطح المواسير وزعانفها مما يتسبب عنه تقليل كفاءة التبادل الحرارى بين هواء الغرفه وسائل التبريد داخل المواسير .

وتقدر كمية التبادل الحرارى من اسطح مواسير التبريد عند ملامستها هواء ساكن بما يعادل $2.5 \text{ BTU./hr.}^{\circ}\text{F ft}^2$ من سطح المواسير أو $12 \text{ kCal/hr.}^{\circ}\text{C. m}^2$ ، اما اذا لامست المواسير محلول ملهى أو أى سائل ساكن فكمية التبادل الحرارى تزيد الى $10 \text{ BTU./hr.}^{\circ}\text{F ft}^2$ من سطح المواسير أو حوالى $50 \text{ kCal/hr.}^{\circ}\text{C. m}^2$ ويمكن زيادة كمية التبادل الحرارى باحداث اثاره للهواء أو السائل المحيط بمواسير التبريد بواسطة التقليب بمروحة أو طلمبه .

ويمكن استخدام بعض الانواع التالية كمبخرات :

أ- المبخر المبلل : Wet Evaporator

وهو يتكون من ماسوره واحدة أو عدة مواسير متصله بمجمع Header ويدخل السائل الى المواسير من اسفل ويمر الى اعلى كما هو مبين فى شكل (١٢-١٣).

ب- المبخر الجاف : Dry Evaporator

يمثل المبخر المبلل فيما عدا دخول السائل من اعلى ومروره فى المواسير الى اسفل ويتسبب مرور السائل من اسفل الى اعلى فى زيادة كمية التبادل الحرارى وذلك نتيجة لاختلاط السائل المبرد ببخاره فيكون توزيع الحرارة اكثر انتظاما داخل المخلوط كما هو مبين فى شكل (١٢-١٣ب). كما انه اذا حدث وجود زيوت مختلطه بالسائل المبرد تتجمع بواسطة الجاذبيه الارضيه بأسفل المواسير وذلك فى حالة مرور السائل المبرد من اعلى الى اسفل ويمكن فصلها عن سائل التبريد بسهولة لان وجودها يسبب فى التقليل من كفاءة وحدة التبريد .

ج- المبخر من النوع المغمور ذو خزان تجميع :

Flooded Evaporator With An Accumulator

صمم هذا النوع بحيث يعطى كفاءة عاليه فى كمية التبادل الحرارى بين سائل التبريد والجو المحيط بالمواسير وذلك بغمر جميع اسطح المواسير الداخليه بالسائل المبرد ، وتتم عملية الغمر بواسطة صمام خاص ينظم حركته عوامه تعمل على مستوى

داخل خزان التجميع وبمستوى اعلى من مواسير المبخر وبذلك يضمن غمر السائل لسطح المواسير كما هو مبين فى شكل (١٢-١٣ج).

د- المبخر من النوع الاسطوانى ذو الانابيب الداخليه :

Shell and Tube Evaporator:

وهو مماثل للنوع المغمور ، ويكون خزان التجميع فى هذه الحالة عبارة عن اسطوانة تمر بداخلها مجموعة من الانابيب تحمل السائل المراد تبريده كما هو مبين فى شكل (١٢-٢).

ويصلح هذا النوع فى تبريد السوائل مثل المحاليل الملحية التى قد تستخدم فى عمليات تبريد اخرى ، او تبريد الماء الذى يتم رشه على الفواكه والخضروات بعد جمعها كما هى الحالة فى عمليات التبريد العاجل أو المبدئى فى الحقل . Precooling .

٢- ضواغط غاز التبريد : Gas Compressors :

وقد سبق شرحها فى باب سابق ، وتوجد غالبا خارج غرفة التبريد ، وتنحصر وظيفة الضاغط فى وحدة التبريد فيما يأتى :-

أ- ايجاد منطقة ضغط منخفض داخل ملفات المبخر نتيجة سحبه للغازات المتولدة عن امتصاص سائل التبريد لحرارة التبخير .

ب- ايجاد منطقة ضغط مرتفع داخل ملفات المكثف نتيجة لضغط الغازات المسحوبه من المبخر . ويعتمد مقدار ضغط الغاز داخل الضاغط على القدرة المطلوبه للتبريد كما هو مبين فى الجدول (١٢-٢):

جدول (١٢-٢) علاقة الضغط بقدرة التبريد

القدرة حصان/(طن تبريد/ ساعة)	الضغط المانومتري كجم قوه /سم ^٢	القدرة حصان/(طن تبريد/ ساعة)	الضغط المانومتري رطل قوه /بوصه ^٢
١٠.٨	٢.٥	١٠.٠	٢.٠
١٢٨	٢.٠	١١٢	١.٥
١٥٧	١.٥	١٢٨	١.٠
١٩٧	١.٣٣	١٥٤	٥
٢٠.٠	١.٠	١٧٦	صفر
٢٤٥	٠.٧	٢٢٧	٥-

ج- ايجاد فرق فى مقدار الضغط الواقع على سائل التبريد وبذلك يعمل على استمرار دورة التبريد بانتقال السائل المبرد من مكان الى آخر ، فيقوم الضاغط بدفع الغاز المضغوط الى المكثف ثم الى المستودع ومنه الى المبخر عن طريق صمام الانتشار .

د- يتميز الضاغط بمقدار سريان حجم معين من غاز التبريد عند ضغط سحب الغاز الى داخل اسطوانة الضاغط وكذلك مقدار التغير اللازم فى الضغط خلال دورة التبريد .

٢- المكثفات : Condensers

وتوجد عادة خارج غرفة التبريد ، ووظيفتها امتصاص الحرارة الكامنه من الغاز المضغوط وتحويله من حاله الغازيه الى حاله السائله مرة اخرى . وتصنع انابيب المكثف من النحاس الاحمر باستثناء الحالات المستخدمه فيها سوائل تبريد كالنشادر وثانى اكسيد الكبريت فتكون من الصلب الغير قابل للصدأ . وتزود عادة مواسير المكثف بزعانف حتى تزيد من مساحة سطح التبادل الحرارى ، ويتم التبريد باحدى الطرق الآتية .

أ- التبريد بالهواء :

ويتكون المكثف فى هذه الحالة من مواسير افقيه ذات زعانف رأسيه لوحداث التبريد التى يلزم لها حوالى ٣ حصان كقوة محركه . ويدخل الغاز عادة من اعلى ويتكثف الغاز داخل المواسير والسوائل الناتجة من التكثف تمر الى اسفل بواسطة التثاقل الى مستودع تجميع . ويزود المكثف بمروحة لتجديد الهواء وذلك حتى تزيد كفاءة التبادل الحرارى .

ب- التبريد بالماء :

ويتخذ المكثف تصميم مماثل لتصميم المبخر من النوع الاسطوانى ذو الانابيب الداخليه والذى ذكر سابقا . والمكثفات ذات الاحجام الكبيرة وخصوصا الافقيه منها تستعمل عادة كمستودع بالاضافه الى عملها كمكثف ، وتستخدم انابيب المكثف فى هذه الحالة فى مرور الماء اللازم للتبريد او التكثيف .

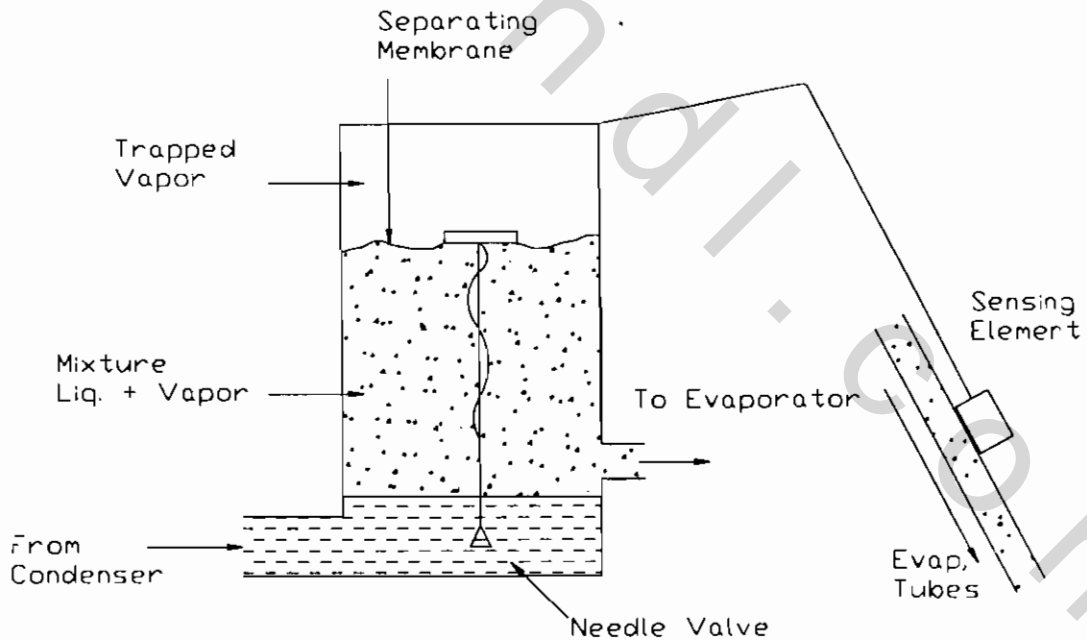
٤- مستودع السائل المبرد أو القابله : Receiver

خزان السائل المبرد ويصنع من الصلب الغير قابل للصدأ فى حالة استخدام سوائل تبريد مثل النشادر او ثانى اكسيد الكبريت ومن النحاس عامه لباقى سوائل التبريد السابق ذكرها .

٥- صمام التمدد أو الانتشار Thermal Expansion Valve

وتنحصر وظيفته فيما يلى :

- أ - يعمل كفاصل بين منطقة الضغط المنخفض والمرتفع .
- ب- يتسبب فى تخفيض الضغط المرتفع للسائل الموجود فى المستودع وذلك بان يقوم بتسريب جزء منه الى مواسير المبخر .
- ج- يعمل على تزويد المبخر بشحنه ثابتة متناسبه من السائل المبرد وذلك حسب احتياجات التبريد .



شكل (١٢-٤) قطاع فى صمام التمدد أو الانتشار الثرموستاتيكي

وصمام الانتشار المعروف بالثرموستاتيكي ، يعتمد اعتمادا كلياً على التغير في درجة حرارة الغاز المتبخر من السائل المبرد نتيجة لتحميصه عند نهاية انابيب المبخر .

ويتركب من جسم الصمام وبه فتحة لدخول السائل من المكثف على ضغط مرتفع وفتحة أخرى لخروج مخلوط من السائل والغاز المبرد الى المبخر تحت ضغط منخفض، ويفصل الفتحان عن بعضهما حاجز به ثقب رفيع يتحكم في مقدار فتحته صمام الابره Needle Valve مثبت على غشاء مرن Diaphragm يمكن تحريكها الى أعلى واسفل ويوجد خلف هذه القاعدة المرنة غرفة تتصل بجزء حساس Sensing Element بصمام للتحكم يوجد عند نهاية انابيب المبخر ، ويوجد بهذه الغرفة غاز معين محبوس داخلها ، ويكون عادة من نفس السائل المبرد ولكن لا يوجد اتصال بينه وبين السائل المبرد المار في انابيب المبخر . وتعتمد طريقة عمل صمام الانتشار على ارتفاع درجة حرارة الوسيط نتيجة لتحميصه فاذا ارتفعت درجة حرارة الغاز الموجود في المبخر عن الدرجة المصمم عليها فترتفع تباعاً درجة حرارة الغاز المحبوس مسبباً تمدده ضغطاً على القاعدة المرنة لصمام الابره وبذلك يفتح صمام الابره ويسمح بمرور شحنة من السائل المبرد المكثف فتقل درجة الحرارة وهكذا تستمر العملية .

وتتوقف درجة تحميص بخار سائل التبريد داخل انابيب المبخر على :-

أ- معدل التبخير بملفات المبخر وهذا يمثل الحمل الواقع على وحدة التبريد . فكلما زاد الحمل زادت درجة تحميص الغاز ، على ذلك يسمح صمام التمدد بدخول شحنة جديدة من الوسيط .

ب- معدل سريان السائل المبرد الداخل الى انابيب المبخر، فكلما زاد هذا المعدل كلما قلت درجة تحميصه ويؤدي ذلك الى تقليل او ايقاف دخول شحنة جديدة من السائل المبرد الى انابيب المبخر .

ج- يؤدي عدم تشغيل الضاغط الى توقف مرور السائل خلال صمام التمدد وبذلك تتوقف وحدة التبريد كلية .

وتعتبر عملية التحكم في معدل سريان السائل المبرد بواسطة صمام الانتشار هامة جداً وذلك لانه ، في نظام التبريد الصناعي بالضغط ، يصمم الضاغط على اساس ضغطه للغاز فاذا ماتسربت كمية من السائل المبرد الى اسطوانة الضاغط ادى ذلك الى تلف الضاغط وبالتالي تلف وحدة التبريد كلها نتيجة لزيادة كمية تصرفه عن مقدار الحمل على المبخر اللازم لتبخيره .

اقتصاديات التشغيل فى نظام التبريد الصناعى بالضغط :

يعتمد سريان السائل المبرد داخل دورة التبريد الصناعى بالضغط على ان يكون ضغط الطرد (الضغط المرتفع للغاز المبرد الخارج من الضاغط) أعلى من ضغط السحب (الضغط المنخفض للغاز المبرد الداخل الى الضاغط) . ويعتمد التشغيل الاقتصادى لوحدة التبريد على مدى النجاح فى ان يكون ضغط الطرد ثابت على اقل درجة ممكنة بالاضافة الى ثبوت ضغط السحب على اعلى درجة ممكنة بحيث يكون هناك فرق فى الضغطين حتى تتم دورة التبريد ويتحدد ضغط السحب على درجة الحرارة التى يراد الوصول اليها فى مواسير المبخر فكلما قل ضغط السحب كلما قلت درجة حرارة تشبع السائل المبرد . وبالتالي يمكن الوصول الى درجات تبريد منخفضة ويتحدد ضغط الطرد على درجة حرارة الوسيط (الهواء او الماء) فى مواسير المكثف فكلما كانت درجة حرارة جو المنطقة مرتفعة كلما زاد هذا من ضغط الطرد حتى ترتفع درجة حرارة تكثيف الغاز المبرد عن درجة حرارة المنطقة .

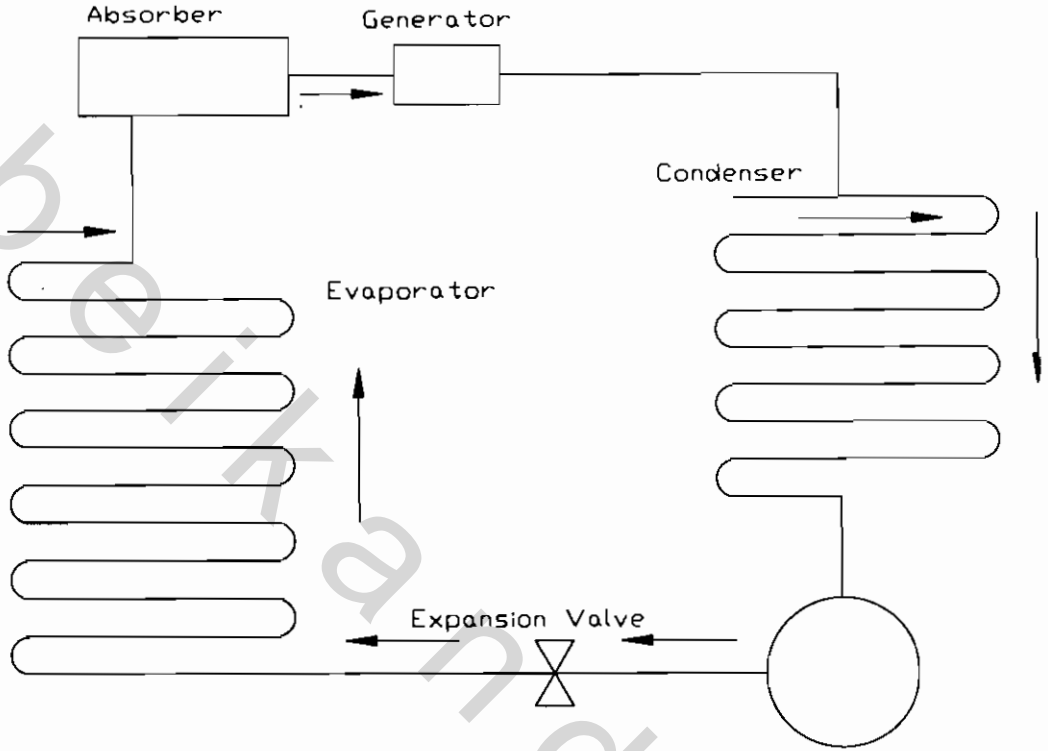
وهناك عدة عوامل تتسبب فى رفع ضغط الطرد وبذلك تقل كفاءة التشغيل :

- أ - وجود هواء او غازات غير قابله للتكثيف داخل مواسير المكثف .
- ب- وجود رواسب او اوساخ داخل مواسير المبخر وبذلك تقل كفاءة التبادل الحرارى
- ج- حجم مواسير المكثف اقل مما يجب .
- د - تسرب بعض الزيت المستخدم فى تزييت اسطوانة الضاغط الى داخل مواسير المكثف.
- هـ- تسرب جزء من السائل المبرد الى داخل الضاغط فى حالة سائله .

والعوامل التى تتسبب فى تقليل ضغط السحب هى :

- أ - صغر حجم مواسير المبخر فتقل قدرته على التبادل الحرارى الكامل لحمل وحدة التبريد .
- ب- تسرب بعض الزيت الى مواسير المبخر وخصوصا اذا كان النشادر هو السائل المبرد المستخدم فى دورة التبريد فيختلط الزيت بالنشادر مكونا مستحلبا درجة حرارة غليانه مرتفعه .
- ج- عدم ازالة طبقة الثلج التى قد تكون متكونه على اسطح انابيب المبخر مما يسبب تقليل كفاءة التبادل الحرارى .

ثانيا : التبريد الصناعي بالامتصاص : Absorption system



شكل (١٢-٥) التبريد الصناعي بالامتصاص

لا تختلف كثيرا النظرية الاساسيه للتبريد الصناعي بالامتصاص عن نظام الضغط باستثناء بعض النقاط التاليه :

١- يشترط في دورة التبريد الصناعي بالامتصاص استخدام سائل مبرد له قابلية الامتصاص داخل سائل آخر مثل استخدام النشادر كسائل مبرد له قابلية الامتصاص في الماء .

٢- لا يستخدم الضاغط في دورة التبريد الصناعي بالامتصاص ولكن يستخدم بدلا منه قابله ومولد يقومان بوظيفة الضاغط الرئيسيه كما يأتى :

أ- يوجد بالقابله سائل الامتصاص (الماء مثلا في حالة استخدام النشادر كسائل مبرد) وتكون مهمته امتصاص السائل المبرد المتبخر في مواسير المبخر وبذلك يترك خلفه منطقة الضغط المنخفض في مواسير المبخر .

ب- يقوم المولد بوظيفة الضاغط الأخرى وهى رفع درجة حرارة تكثيف السائل المبرد نتيجة لضغطه وذلك بأن تسخن محلول النشادر المركز القادم من القابله فيتكون غاز النشادر مره أخرى ويتصاعد بضغط مرتفع نتيجة لعملية التسخين وعلى ذلك يتسبب فى توليد منطقة ضغط مرتفع فى الدورة .

ملحوظة :

إنه من الأهميه أن نذكر أن استخدام مائع النشادر لا يؤثر على طبقة الأوزون ويعتبر ذلك ميزه إلا أن قابليته للإنفجار تحد من استخدامه على نطاق واسع.

طرق التبريد COOLING METHODS

تقسم عادة طرق التبريد داخل وحدات التخزين ومصانع الاغذية والالبان طبقا لطريقة مرور السائل المبرد وطريقة استخدامه داخل غرف التبريد وتشمل احدى الطريقتين التاليتين :

اولا : طريقة التبريد المباشر : Direct Cooling

وفى هذه الطريقة يمر السائل المبرد داخل ملفات المبخر الذى يوجد داخل المكان المراد تبريده ، ويتبخر السائل المبرد داخل ملفات المبخر نتيجة لامتنصاضه الحرارة مباشرة من الجو المحيط بالمواد المراد تبريدها . وتستخدم هذه الطريقة فى غرف التجميد السريع لارتفاع كفاءتها ، وفى غرف التبريد الصغيره لقله تكاليف انشائها، وفى الثلجات المنزلية الصغيرة لبساطة تصميمها .

وتتلخص عيوب هذه الطريقة فيما يلى :

١- يلزم تشغيل وحدة التبريد ٢٤ ساعه يوميا لانه فى حالة توقف وحدة التبريد لن يتم التبادل الحرارى وبالتالى تتوقف عملية التبريد .

٢- تتعرض المواد المراد حفظها بالتبريد للتلف اذا تسربت بعض السوائل المبرده الى غرف التبريد ، وكذلك احتمال اصابة العمال القائمين بتشغيل غرف التخزين وقد تتعرض وحدة التبريد الى الانفجار او الاشتغال فى بعض الحالات عندما يكون السائل المبرد المستخدم قابل للاشتعال .

٣- صعوبة الكشف عن مكان تسرب الغاز المبرد خصوصا وان مواسير وحدة التبريد تكون ممتدة بطول غرف التبريد ويؤدى ذلك الى ارتفاع تكاليف الصيانه .

٤- يؤدى وجود وحدة التبريد قريبة من اماكن التبريد الى الاقلال من عوامل الامان والنظافه .

٥- لايمكن استعمال نسبة رطوبة مرتفعه فى حفظ المواد وذلك لان وجود الرطوبه يسبب تجميدها على مواسير التبريد ويستلزم ازالتها بصفه مستمرة .

ثانيا : طريقة التبريد غير المباشرة : Indirect Cooling

يستخدم فى هذه الطريقة وسيط مبرد مثل محلول ملحي Brine Solution فيبرد المخلوط اولا بملامسته انابيب المبخر ، ثم ينقل هذا المحلول المبرد بواسطة طلمبات خاصه الى غرف التبريد التى يوجد بها المواد المراد تبريدها . وتزود مواسير المخلوط الملحي بخزانات احتياطية يوجد داخلها ملفات مبخر وحدة التبريد ، وتعتمد وظيفة هذه الخزانات الاحتياطيه على درجة تركيز المحلول الملحي .

ويمكن الوصول الى درجة حرارة منخفضه جدا اذا كان تركيز المخلوط مرتفع دون ان يتجمد ويكون له القدرة على امتصاص كمية كبيرة من الحرارة اثناء توقف وحدة التبريد نفسها ويسمى هذا الخزان فى هذه الحالة بخزان التبريد الاحتياطى .

واذا كانت درجة تركيز المخلوط الملحي منخفضه فانه يتجمد عند تبريده ويتحول الى بللورات صغيره من الثلج ويكون له القدرة على امتصاص كمية من الحرارة تعادل الحرارة الكامنه اللازمه لذوبان الثلج بالاضافه الى حرارته الظاهرية ، ويسمى الخزان فى هذه الحالة بخزان التجميد الاحتياطى.

وتستخدم عدة محاليل ملحيه اهمها كلوريد الصوديوم او كلوريد الكالسيوم . ويمكن الوصول الى درجات حرارة اقل (حوالى - ٥٨° ف أو - ٥٠° م) فى حالة استخدام كلوريد الكالسيوم ولذلك فانه يفضل استعماله عن كلوريد الصوديوم بالاضافه الى انخفاض تأثيره من جهة تآكل المعادن .

وتتميز طريقة التبريد غير المباشر بالآتى :

- ١- يمكن تشغيل وحدة التبريد ساعات محدوده فى اليوم وذلك لانه يمكن الاعتماد على كمية الحرارة التى تمتص بواسطة خزانات التبريد او التجميد الاحتياطيه.
- ٢- اذا حدث اى تسرب للغاز المبرد لا يحدث عنه تلف للاغذيه ولا تتعرض العمال الى الاصابه وذلك لان وحدة التبريد تكون منفصله تماما عن غرف التبريد.
- ٣- يسهل الكشف عن مكان تسرب الغاز المبرد وذلك لان وحدة التبريد تشغل حيزا محدودا .
- ٤- يمكن بسهوله الكشف عن مكان تسرب المخلوط الملحي .
- ٥- فصل وحدة التبريد عن غرف التبريد يكون سببا فى زيادة عامل الامان خصوصا ضد الانفجار وكذلك يزيد من عوامل النظافه فى الاستعمال .



أما عيوب طريقة التبريد غير المباشر فتتلخص فى الآتى :-

- ١- كفاءة التبريد تقل كثيرا عن طريقة التبريد المباشر وذلك لوجود وسيط مبرد (المحلول الملحى) بين السائل المبرد والمادة المراد تبريدها .
- ٢- ارتفاع تكاليف الانشاء والصيانة والتشغيل نتيجة لوجود عدد من الخزانات الاحتياطية واطوال كثيرة من مواسير المحلول الملحى ومايلزمها من طلمبات لدفع المحلول واجهزة لتنظيم دورة التبريد .

المواد العازلة المستخدمه فى التبريد

تقوم عملية التبريد الطبيعى او الصناعى بغرضين مهمين فى وقت واحد :-

- ١- امتصاص الحرارة من المادة المراد تبريدها وكذلك من غرفة التبريد بصفه عامة حتى تنخفض درجة حرارتها الى تبريدها .
- ٢- حفظ درجة حرارة غرفة التبريد ثابتة بدون ارتفاع الذى قد ينتج نتيجة لتسرب كمية من الحرارة من الخارج الى الداخل عن طريق جدران وجوانب واسقف غرف التبريد .

وتزود وحدات التبريد عادة بقاطع للحمل Relay تكون ضمن مهمته فصل التيار الكهربائى عن موتور الضاغط اذا ماوصلت درجة حرارة المادة المراد تبريدها أوغرفة التبريد الي درجة حرارة التبريد المطلوبه . وحتى لا تتحمل وحدة التبريد حملا كبيرا بدون داع ، فتصمم غرف التبريد على اساس ان يكون تسرب الحرارة خلال جدرانها اقل مايمكن وذلك حتى يتركز عمل وحدة التبريد بصفه اساسيه للغرض الاول وهو عملية امتصاص الحرارة من المواد المراد حفظها بالتبريد بغرض خفض درجة حرارتها .

وتغطى جوانب غرف التبريد بمواد خاصه بحيث تكون معزوله عن الجو الخارجى للغرف ذو درجة الحرارة المرتفعه .

الشروط الواجب توافرها فى المواد العازله :

- ١- رخص ثمنها حتى يمكن استخدامها تجاريا بطريقة اقتصادية.
- ٢- عديمه الرائحة حتى لاكتسب المواد المراد تخزينها ، خصوصا المواد الغذائيه ، رائحة غير مرغوب فيها .
- ٤- غير قابله للاشتعال والتشعث .

ونذكر فيما يلى بعض المواد الشائعة الاستعمال فى العزل الحرارى :

١- التفريغ التام :

يعتبر ازالة الهواء المحصور فى الفراغ بين اى جدارين من اكفأ الوسائل لعزل الحرارة ، ولكن استعمال هذه الطريقة من الناحية التجارية محدود وذلك لارتفاع تكاليف احداث التفريغ المطلوب . وتستعمل هذه الطريقة فى بعض عمليات العزل البسيطة كما فى زجاجات الحفظ (الترامس) التى تتكون من جدار مزدوج والحيز الموجود بين الجدارين مفرغ من الهواء .

٢- الهواء :

يعتبر الهواء الساكن من المواد العازله الجيده وطريقة استخدامه تنحصر فى عمل جدار مزدوج للمكان المراد حفظ درجة حرارته ثابتة ، يحصر الهواء فى التجويف الداخلى بين جدرانه ويجب مراعاة منع اى حركة للهواء . ولرفع كفاءة عزل الغرف وحتى لاتحدث بالهواء تيارات حمل ويمكن تنفيذ ذلك بعمل حواجز صغيره بين جوانب الجدران او بملأ الفراغات بين هذه الحواجز بمواد تحجز بينها فراغات هوائيه مثل نشارة الخشب او تراب الفلين .

٣- الفلين :

يستعمل بكثرة فى النواحى التجاريه لعزل غرف التبريد، وتزداد كفاءته فى العزل كلما زادت مساحة الفراغات الهوائيه المقفله . ويستخدم الفلين عادة على هيئة الواح لتلصق بالجدران على طبقة واحدة او عدة طبقات ، ويجب طلاء سطح الفلين الداخلى الملاصق للجدار بطبقة من الاسفلت السائل كعازل للرطوبة والسطح الخارجى بطبقة من الاسمنت المخلوط بمادة عازله للرطوبة .

وعموما تستخدم الواح الفلين بسلك ٧ سم اذا كانت درجة حرارة غرفة التبريد 2°C فاكثر ، وسلك ١٠ سم اذا كانت درجة الحرارة اقل من 2°C كما يستعمل على صورة حبيبات او على هيئة تراب تملأ به الفراغات الموجوده بين جدران غرف التبريد ويراعى بالاضافه دهان الجدران بالاسفلت السائل كعازل للرطوبة .

٤- الخشب :

تستعمل الواح الخشب فى عزل الحرارة بدرجة جيدة ويحد من استعمالها ارتفاع ثمنها وعلى النطاق التجارى لعزل ثلاجات الحفظ الصغيرة كما تستعمل الواح الخشب فى اقامة الجدران المزدوجة لغرف التبريد وتملأ الفراغات بمادة اقتصاديه مثل نشارة الخشب والتراب الفليني . ومن عيوب الخشب انه يمتص الرطوبة بسرعة مما يفقده خاصية العزل ويمكن معالجة هذا العيب بطلاء الواجه المعرضه للجو الرطب بطلاء خاص او تغليفها بمواد عازله اخرى مثل الورق المشمع .

٥- الصوف الزجاجى :

يعتبر افضل وارخص مواد العزل خاصة انه غير قابل للاحتراق . ويتواجد الصوف الزجاجى على هيئة مراتب هشة مقواه بالشبك السلك او على هيئة قوالب مضغوطة وفى هذه الحالة يجب طلائها بطبقة عازله مثل الاسفلت السائل لمنع تسرب الرطوبه داخل القوالب وخصوصا من الجانب الملاصق للسطح الاكثر ارتفاعا فى درجة الحرارة اذ ان بخار الماء يتسرب بمعدل اكثر من هذا الجانب فاذا ما وصلت الرطوبه الى الجانب الآخر الاقل فى درجة الحرارة تكثف بخار الماء مسببا فى تقليل او فقد الصوف الزجاجى خاصية العزل .

٦- الورق :

يتميز بخاصيته العاليه فى عزل الحرارة ولكنه قليل الاستعمال ويقتصر استعماله كمادة عازله مغلقة ، للمواد العازله الاخرى لحمايتها من الرطوبه .

٧- السيلوتكس : Celotex

وتعتبر هذه المادة من المنتجات المحلية المستحدثه وتختلف خاصيتها فى عزل الحرارة حسب طريقة انتاجها ، وهى عبارة عن الواح تنتج من ضغط الياف قصب السكر بعد فصل جميع المواد الغذائيه فى المصاص ، ويشابه الى حد ما الخشب الحبيبي الناتج من الساف الكتان وقش الارز وينتظر نجاح كبير من الناحيه التجاريه لهذه المواد كعازل للحرارة ويرجع ذلك الى انتاجها محليا وبثمن اقتصادى .

٨- السيلتون : Celton

يعتبر من المواد العازله الحديثه الاستعمال بالاضافه لرخص ثمنه غير انه اقل فى كفاءة العزل عن الفلين ويحضر من خلط الاسمنت والصودا الكاويه والسلت بنسبة معينه .

الاشتراطات الواجب توافرها فى الثلاثجات التجاريه عند انشائها:

يراعى عند انشاء الثلاثجات التجاريه عدة نقاط حتى يمكنها أداء وظيفتها بكفاءة عاليه وبصورة اقتصادية . وبيان هذه النقاط كما يلى :

- ١- ان يكون التصميم مرنا قابل للامتداد حتى يمكن التوسع فى اماكن التخزين مستقبلا .
- ٢- يجب مراعاة عزل الغرف المبردة بمواد جيدة العزل واقتصادية الثمن وخالية من الرائحة التى قد تنتقل للمواد المراد تخزينها .
- ٣- ان تكون ابواب غرف التبريد معزولة جيدا او يفضل ان تكون من النوع المزدوج حتى يقل تسرب الحرارة من الجو المحيط بالغرفة الى داخلها خصوصا عند فتح الابواب .
- ٤- عند تخزين ثمار الفاكهة والخضر يراعى أن تكون درجة حرارة الغرفة مناسبة للثمار المراد تخزينها حتى لاتتدهور .
- ٥- يشترط عند تصميم غرفة التبريد تزويدها بمراوح حتى يكون هناك حركة مستمرة للهواء تمنع تراكم الغازات الناتجة عن تنفس المواد المخزنة حول انسجة المحصول ويمكن عمل ذلك باحدى الطرق الآتية :-
 - أ- تقليب هواء غرفة التبريد بمراوح حتى يكون هناك حركة مستمرة للهواء تمنع تراكم الغازات الضارة حول انسجة المواد المبردة . وكذلك يساعد التقليب على ضمان احتفاظ جميع اجزاء الغرفة بدرجة الحرارة المطلوبة .
 - ب- تزويد غرف التبريد بأجهزة خاصة تحتوى على مواد كيميائية معينة لامتصاص هذه الغازات الضارة . وتستخدم مادة الاسكاريت Ascarite لامتصاص غاز ثانى اكسيد الكربون وهى عبارة عن اسبستوس مشبع ومغطى بمادة الصودا الكاوية وتستخدم مادة الفحم البرومى المنشط Activated brominated charcoal لامتصاص غاز الايثلين .
 - ج- تجديد الهواء بالتهويه Ventilation وذلك لطرد نواتج العمليات الحيوية من الغازات الضارة وامتدادها بهواء نظيف بصفه مستمرة .
 - د- تعديل هواء الغرفة والتحكم فى نسب مكوناته وذلك باستعمال غاز ثانى اكسيد الكربون او الاوزون الذى يتحد مع بعض الغازات الناتجة عن عملية التنفس وبذلك يمكن التخلص منها .

٦- يؤدي ارتفاع نسبة الرطوبة بغرف التخزين للثمار المراد تخزينها الى شدة اصابة المحاصيل بالفطريات والبكتريا ، وكذلك يؤدي انخفاض الرطوبة اكثر من اللازم الى تبخر الماء وذبول الثمار لذلك يجب مراعاة نسبة الرطوبة داخل الثلاجه ولكل محصول نسبة رطوبة معينه يمكن تخزينه عليها ، وتكون هذه النسبه عادة هى نفس نسبة ما يحتويه المحصول من ماء ، وبذلك لايفقد المحصول الماء بالتبخر نتيجة لتساميها الى الجو المحيط به .

و جدول (١٢-٣) يبين درجة حرارة التخزين المثلى والرطوبة النسبيه داخل غرف التبريد ودرجة حرارة التجميد الواجب حفظ ثمار الخضراوات والفاكهه عليها.

جدول (١٢-٢) انسب ظروف تخزين بعض ثمار الخضار والفاكهة

المحصول	درجة الحرارة المثلى (م°)	الرطوبة النسبية بالمخزن (%)	طول مدة التخزين بالتقريب	المحتوى الرطوبي (%)	الحرارة النوعية (ك. جول/كجم. م°)
البطاطس	١٣-٣	٩٠	٨-٤ شهر	٨١.٢	٨٥
الجزر	صفر	٩٥-٩٠	٥-٤ شهر	٨٨.٢	٩٠
اللفت	صفر	٩٥-٩٠	٥-٤ شهر	٩٠.٩	٩٣
الفجل	صفر	٩٥-٩٠	١٢-١٠ شهر	٧٣.٤	٧٨
البنجر بعروش	صفر	٩٥-٩٠	١٤-١٠ يوم	-	-
بدون عروش	صفر	٩٥	٥-٣ شهر	٨٧.٦	٩٠
البصل	صفر	٧٠-٦٥	٨-٦ شهر	٨٧.٥	٩٠
الثوم	صفر	٧٠-٦٥	٨-٦ شهر	٧٤.٢	٧٩
الكرنب	صفر	٩٥-٩٠	٤-٣ شهر	٩٢.٤	٩٤
القطبيط	صفر	٩٥-٩٠	٤-٢ أسبوع	٩١.٧	٩٣
كرنب بروكس	صفر	٩٥-٩٠	٤-٣ أسبوع	٨٤.٩	٨٧
البروكلي	صفر	٩٥-٩٠	١٠-٧ يوم	٨٩.٩	٩٢
الخرشوف	صفر	٩٥-٩٠	٢-١ أسبوع	٨٣.٧	٨٧
الخس	صفر	٩٥	٣-٢ أسبوع	٩٤.٧	٩٦
البقدونس	صفر	٩٥-٩٠	٢-١ شهر	٨٥.١	٨٨
الكرفس	صفر	٩٥-٩٠	٤-٢ شهر	٩٣.٧	٩٥
السيانخ	صفر	٩٥-٩٠	١٤-١٠ يوم	٩٢.٧	٩٤
الشليك	صفر	٩٥-٩٠	٧-٥ يوم	٨٩.٩	٩٢
الطماطم الخضراء	١٦-١٤	٩٠-٨٥	٣-٢ أسبوع	٩٤.٧	٩٥
الطماطم ناضجة	١٠-٧	٩٠-٨٥	٧-٢ يوم	٩٤.٧	٩٥
الباذنجان	١٠-٧	٩٠	٧ يوم	٩٢.٧	٩٤
الغفل	١٠-٧	٩٥-٩٠	٣-٢ أسبوع	٩٢.٤	٩٤
الخيار	١٠-٧	٩٥-٩٠	١٤-١٠ يوم	٩٦.١	٩٧
قرع الكوسة	١٣-٧	٨٥-٨٠	١٥-١٠ يوم	٩٥.٠	٩٦
القرع العسلي	١٣-١٠	٧٥-٧٠	٦-٢ شهر	٩٠.٥	٩٢
الكأنتلوب	صفر-٥	٩٠-٨٥	١٥-٥ يوم	٩٢.٠	٩٣
الشمام	١٠-٧	٩٠-٨٥	٢ أسبوع	٩٢.٧	٩٤
كيزان العسل	١٠-٧	٩٠-٨٥	٤-٣ أسبوع	٩٢.٦	٩٤
البطيخ	١٠-٥	٨٥-٨٠	٣-٢ أسبوع	٩٢.١	٩٧

أساسيات هندسة التصنيع الزراعي

تابع ماقبله

المحصول	درجة الحرارة المثلى (م°)	الرطوبة النسبية بالمخزن (/)	طول مدة التخزين بالتقريب	المحتوى الرطوبي (%)	الحرارة النوعية (ك.جول/كجم م°)
لبسله	صفر	٩٥-٩٠	١-٢ أسبوع	٧٤.٣	٠.٧٩
الفاصوليا	١٠-٧	٩٥-٩٠	٨-١٠ يوم	٨٨.٩	٠.٩١
الفول الرومي	صفر-٥	٩٠	١٠-١٥ يوم	٦٦.٥	٠.٧٣
لباميه	١٠-٧	٩٥-٩٠	٧-١٠ يوم	٨٩.٨	٠.٩٢
البطاطا	١٦-١٣	٩٠-٨٥	٤-٦ شهر	٦٨.٥	٠.٧٥
البرتقال	صفر-١	٩٠-٨٥	٨-١٢ أسبوع	٨٧.٢	٠.٩٠
الليمون الاصاليا	١٥-٩	٩٠-٨٥	١-٤ شهر	٨٩.٣	٠.٩٢
المالح اليلدي	١٠-٩	٩٠-٨٥	٦-٨ أسبوع	٨٦.٠	٠.٨٩
الجريب فروت	١٠	٩٠-٨٥	٤-٨ أسبوع	٨٨.٨	٠.٩١
اليوسفي	صفر-٤	٩٠-٨٥	٢-٤ أسبوع	٨٧.٣	٠.٩٠
المانجو	١٣	٩٥-٨٥	٢-٣ أسبوع	٨١.٤	٠.٨٥
الموز	صفر	٩٥-٨٥	-	٧٤.٨	٠.٨٠
الزيتون	١٣-٧	٩٥-٨٥	٤-٦ أسبوع	٧٥.٢	٠.٨٠
الزبدية	١٣-٧	٩٥-٨٥	٤ أسبوع	٦٥.٤	٠.٧٢
الباياظ	٧	٩٥-٨٥	٢-٣ أسبوع	٩٠.٨	٠.٨٢
لكمثرى	٢-صفر	٩٥-٩٠	٢-٧ شهر *	٨٢.٧	٠.٨٦
التفاح	١-صفر	٩٠	٢-٨ شهر *	٨٤.١	٠.٨٧
السفرجل	صفر	٩٠	٢-٣ شهر	٨٥.٣	٠.٨٨
الكريز	صفر	٩٠	١٠-١٤ يوم	٨٣.٠	٠.٨٧
المشمش	صفر	٩٠	١-٢ أسبوع	٨٥.٤	٠.٨٨
الخوخ	صفر	٩٠	٢-٤ أسبوع	٨٦.٩	٠.٩٠
البرقوق	صفر	٩٥-٩٠	٢-٤ أسبوع	٨٥.٧	٠.٨٨
التين	صفر	٩٠-٨٥	٧-١٠ يوم	٨٧.٠	٠.٨٢
العنب	١-صفر	٩٥-٩٠	١٥-٦ شهر *	٨١.٦	٠.٨٦
الرمان	٢-١	٩٠	٢-٤ شهر	-	-
لكاكي	١-	٩٠	٢-٤ شهر	٧٨.٢	٠.٨٤
لثقل	صفر-١٠	٧٥-٦٥	٨-١٢ شهر	٦-٣	٠.٢٢-٠.٢٥
التماز المجففه	صفر	٦٠-٥٠	٩-١٢ شهر	٢٦-١٤	٠.٤١-٠.٤٦

* حسب الصنف

المصدر : الحاصلات البستانيه (أ.د. صلاح النجوي وآخرون)

حمولة التبريد REFRIGERATION LOAD

وتعرف حمولة التبريد بأنها مقدار كمية الحرارة التى يجب التخلص منها فى الثلاجات أو غرف التبريد لحفظ مادة معينة عند درجة حرارة مناسبة طوال فترة التخزين. وتعتمد حمولة التبريد على عدة عوامل أهمها مايتى :

- ١- مدى كفاءة اجهزة وحدات التبريد .
- ٢- حجم غرف التخزين .
- ٣- نوع وصنف المحصول المراد تخزينه (حرارته النوعيه ، حرارته الكامنه ، درجة حرارة التخزين) .
- ٤- درجة حرارة الجو الخارجى المحيط بغرف التبريد وعدد المرات التى يفتح ويقفل فيها ابواب الثلاجات .

وتحدد سعة وحدة التبريد باحدى الطرق الآتية :

- ١- كمية الحرارة التى تمتصها الآله فى الساعه اما بالوحدات البريطانية او الوحدات المترية او الوحدات المختلطة أو الوحدات الدوليه.
- ٢- التبريد الكمى بالرطل او الكيلوجرام فى الساعه علما بان رطل التبريد يلزمه ١٤٤ وحدة حراريه بريطانيه BTU أو الكيلوجرام تبريد يلزمه ٧٩٩ كيلوكالورى .k.Cal.
- وهى كمية الحرارة اللازمه لانصهار وحدة وزنيه واحده من الثلج .

- ٣- كمية التبريد بالطن تبريد فى اليوم

$$\text{Short ton} = 2000 \text{ Lb} \times 144 \frac{\text{BTU}}{\text{Lb}} = 288000 \text{ BTU}$$

$$\frac{\text{BTU}}{\text{Lb}} \quad 144 \times \text{Lb} \quad 2000 =$$

$$\text{BTU} \quad 288000 =$$

حيث يعتبر الطن القصير Short ton (الطن الأمريكى) يساوى ٢٠٠٠ رطل
والطن الكامل أو الطن العادى (الطن الانجليزى) يساوى ٢٢٤٠ رطل

$$= 1000 \text{ kg} \times 79.9 \frac{\text{kcal}}{\text{kg}}$$

$$= 79900 \text{ kcal}$$

$$\approx 80000 \text{ kcal}$$

والحراره التى يجب ازلتها بالتبريد هى عبارة عن مجموع الاحمال الآتية:

أولا : حرارة الحقل : Field Heat

وهى الحرارة المخزونه فى المحصول نتيجة تعرضه للشمس وتبينها درجة حرارة الثمار . وتتأثر كمية حرارة الحقل بالوقت اللازم لجمع الثمار ومدى تعرضها للشمس، ويمكن تقليلها بجمع الثمار فى وقت مبكر من الصباح ووضع المحصول فى الظل .

وتعتمد حمولة التبريد اللازمه لازالة حرارة الحقل على :

- ١- درجة الحرارة الابتدائية للثمار .
- ٢- درجة الحرارة النهائية للثمار او درجة الحرارة المراد تخزين الثمار عندها .
- ٣- وزن الثمار وادوات التعبئة والتغليف .
- ٤- الحرارة النوعية للثمار وادوات التعبئة والتغليف ويمكن تقديرها اذا علم (M_C) المحتوى الرطوبى للثمار حسب المعادله التقريبية الآتية :

$$\text{Special heat} = (M_C \times 0.008) + 0.2$$

ويرمز المقدار الثابت ٠.٢ الى الحرارة النوعية الجافه تماما فى الثمار المراد تخزينها .

٢- الحرارة الحيوية : Vital Heat

تؤدى الثمار المختلفه كئى كائنات حيه ، عملياتها الحيويه المختلفه بعد جمعها واثناء تخزينها وتؤدى عملية التنفس Respiration الى احتراق المكونات العضويه للمحصول ويتأكسد السكر الى غاز ثانى اكسيد الكربون وماء ويصحب ذلك توليد

طاقة حرارية ناتجة عن عملية التنفس وتسمى هذه الطاقة بالحرارة الحيوية . وهى تمثل جزء مهم فى حمولة التبريد اللازمة لغرف التخزين . ويمكن قياس الحرارة الحيوية باستخدام اجهزة خاصة تسمى Calorimeters او تقديرها حسابيا بمعرفة كمية غاز ثانى اكسيد الكربون المتولد عن التنفس . والطريقة الاخيرة اسرع واسهل ولايتعدى الخطأ فى حسابها عن ١٠٪ من القيمة الحقيقيه للحرارة الحيوية وهذا الخطأ ناتج عن افتراض ان جميع الحرارة المتولدة اثناء التنفس تكون ناتجة عن احتراق سكر الجلوكوز

وتعتمد كمية الحرارة الحيوية على مايتأتى :

- ١- مادة التخزين .
- ٢- كمية الحصول المراد تخزينها .
- ٣- سرعة تنفس الحصول وتقدر بحجم غاز الاكسجين الممتص او حجم غاز ثانى اكسيد الكربون المتولد من تنفس وزن معين من الحصول فى وحدة زمنيه واحدة .

ثانيا : الحرارة النافذه : Heat Leakage

وهى مجموع كميات الحرارة التى تنساب او تنفذ داخل غرف التبريد الثابتة او المتنقلة (عربات النقل وعربات السكك الحديدية ١٠٠٠ الخ) وتشمل الآتى :

- ١- الحرارة التى تنفذ الى داخل غرف التبريد خلال الاسقف والجدران والارضيه :

وتكون ذات اهمية كبيرة فى الظروف الآتية :

- أ- ارتفاع درجة حرارة الجو الخارجى لغرف التبريد .
- ب- انخفاض درجة حرارة هواء غرفة التبريد (كما هى الحال فى غرف التجميد)
- ج- استعمال غرف التبريد المتنقلة (عربات النقل وعربات السكك الحديدية) ، فيؤدى سرعة الهواء خارج الغرف الى ارتفاع كمية الحرارة النافذه من جانب واسقف غرف التبريد .

وتعتمد كمية الحرارة النافذة داخل غرف التبريد على العوامل الآتية :

- أ- الفرق بين درجة حرارة الجو الخارجى للغرفة ودرجة حرارة هواء غرفة التبريد ، فكلما زاد هذا الفرق كلما زادت كمية الحرارة المتسربة .
- ب- مساحة الاسطح الخارجيه لغرف التبريد .
- ج- مدة التخزين .
- د- نوع المادة المستخدمه فى عزل غرفة التبريد (مقاومتها لانتقال الحرارة).
- هـ- معدل انتقال الحرارة من الهواء الخارجى للغرفة الى داخل الغرفة وهذا المعدل يعتمد على سرعة الهواء الملامس لجدران الغرفة من داخلها وخارجها وكثافته ولزوجته التى تتأثر بدرجات الحرارة هذا بالاضافه الى حرارته النوعيه . ويعبر عنها بمعامل انتقال الحرارة بالحمل الذى سبق ذكره سابقا .

٢- حرارة الخدمة : Service Heat

وهى كمية الحرارة المتسربة نتيجة لفتح ابواب غرف التبريد ومن عملية تجديد هواء الغرفة بالاضافه الى العنصر البشرى اى حرارة تنفس العمال وكذلك الحرارة المتولدة عن إدارة ماكينات التبريد ومراوح التقلب والتهويه والحرارة الناتجة عن الاضاءه .

ويمكن تقدير كمية حرارة الخدمة بما قيمته ١٠ الى ١٥ ٪ وقد تصل الى ٢٠ ٪ من مجموع الحرارة النافذة خلال جدران الغرفة وحرارة تنفس المواد المخزونه .

٣- احتياطي طوارئ : Reserves

ويقدر بحوالى ٢٠ ٪ الى ٣٥ ٪ من مجموع الاحمال السابقه لمراعاة الظروف التى قد تستجد مثل ارتفاع درجة حرارة الجو الخارجى (فترة الصيف مثلا) او زيادة غير منتظرة فى حرارة الحقل نتيجة جمع الثمار فى فترة الظهيرة .

مثال (١)

المطلوب تقدير سعة وحدة التبريد المناسبة لغرفة أبعادها الداخلية $2 \times 2 \times 3$ متر وحوائطها وسقفها من الخشب بسمك 5 سم ومغطاه بالواح من الفلين من الداخل بسمك 10 سم والغرفة معده لحفظ 2 طن ثمار البرتقال عند درجة حرارة 5° م بينما درجة حرارة الجو الخارجى للغرفة 30° م وبحيث يسحب طن واحد من البرتقال كل يوم ويستبدل بنفس الكمية وبحيث يتم التبريد خلال 6 ساعات علما بأن :

معامل إنتقال الحرارة بالتوصيل للخشب	$= 25 \text{ ر. كيلوكالورى/ساعة.متر.}^\circ \text{ م}$
معامل إنتقال الحرارة بالتوصيل للفلين	$= 10 \text{ ر. كيلوكالورى/ساعة.متر.}^\circ \text{ م}$
معامل إنتقال الحرارة بالحمل للهواء الخارجى	$= 25 \text{ ر. كيلوكالورى/ساعة.متر.}^\circ \text{ م}$
معامل إنتقال الحرارة بالحمل للهواء الداخلى	$= 10 \text{ ر. كيلوكالورى/ساعة.متر.}^\circ \text{ م}$
الحرارة النوعية للبرتقال	$= 9 \text{ ر. كيلوكالورى/كجم.}^\circ \text{ م}$
حرارة تنفس ثمار البرتقال	$= 400 \text{ كيلوكالورى/طن.يوم}$

مع اعتبار اضافة 20% من كميات الحرارة نتيجة لفتح أبواب الغرفة والتهويه واحتياطى وحدة التبريد .

الحل

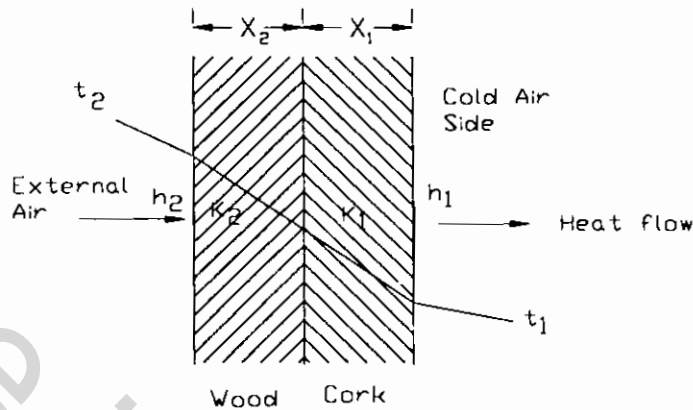
$$\text{Field heat} = \frac{\text{Mass of Oranges} \times \text{specific heat} \times \text{temp. difference}}{\text{Cooling hours}}$$

$$= \frac{1000 \times 0.9 \times (30 - 5)}{6} = 3750 \text{ kcal/hr}$$

$$\text{Heat of respiration of orange} = 1 \times \frac{400}{24} = 16.7 \text{ kcal/hr}$$

كمية الحرارة النافذه يمكن حسابها كما يأتى :

$$\text{Heat leakage (Q)} = \frac{A. (t_2 - t_1)}{\frac{1}{h_1} + \frac{X_1}{k_1} + \frac{X_2}{k_2} + \frac{1}{h_2}}$$



Walls area of refrigeration room = $2 \times 3 \times 4 = 24 \text{ m}^2$

Ceiling and floor areas of room = $3 \times 3 \times 2 = 18 \text{ m}^2$

Total surface area = $24 + 18 = 42 \text{ m}^2$

يمكن حساب الحرارة النافذة كالتالي :

$$Q = \frac{(42)(30 - 5)}{\frac{1}{2.5} + \frac{10}{(100)(0.1)} + \frac{7.5}{(100)(0.25)} + \frac{1}{1.5}}$$

$$= \frac{(42)(25)}{0.4 + 1 + 0.3 + 0.67}$$

$$Q = 443 \text{ kcal./hr.}$$

Total heat to be absorbed per hour during cold storage

$$= \text{Field heat} + \text{Heat of respiration} + \text{Heat leakage}$$

$$= 3750 + 16.7 + 443$$

$$= 4209.7 \text{ kcal/hr}$$

∴ Refrigeration Capacity

$$= \frac{\text{Total Heat Absorbed} \times \text{Hours/day}}{\text{Heat in Ton Refrigeration}}$$

Correction should be made for reserves

$$\therefore \text{Refrigeration Capacity} = \frac{(4209.7)(1.2)(24)}{(80000)} = 1.515 \text{ Ton}$$

أى يلزم إقامة وحدة تبريد مقدار حملتها حوالى ١٥ طن تبريد فى اليوم ويتلاحظ أن كمية الحرارة النافذة تمثل جزءا هاما فى الحمل الاجمالى لوحدة التبريد فى حين أن حرارة التنفس للمحصول تكون صغيره إلى حد ما . غير أن هذه الحرارة تكون ذات أهمية كبيرة إذا كانت كمية الثمار المخزنه كبيرة خاصة إذا ما إرتفعت درجات حرارة التخزين عن ١٠°م كما هي الحالة عند تخزين ثمار الفراوله مثلا .

مثال (٢) :

وحدة تبريد صناعى بالضغط تعمل بطريقة التبريد غير المباشر وتتكون من جهاز للتبريد مزود بخزان به محلول ملحي حول مبخر جهاز التبريد وطمبية لدفع المحلول الملحي خلال مواسير غرفة التبريد .

إذا كانت أبعاد غرفة التبريد ٦ × ٥ × ٣ متر حوائطها مبنية من الطوب الحرارى بسمك ٢٥سم ومغطاه من الخارج بطبقة من المونه بسمك ٢٥سم ، ومن الداخل بالواح الفلين بسمك ٧سم . والغرفه معدة لحفظ ٢ طن من ثمار الفراوله عند درجة حرارة ١٠°م بينما درجة حرارة الجو الخارجى للغرفه ٢٥°م وتستغرق عملية خفض درجة حرارة الفراوله خمسة ساعات .

إذا كانت طول المواسير الحامله للمحلول الملحي ٣٠ متر وقطر الماسورة ٧سم ومعزوله بطبقة من الصوف الزجاجى مقدارها ٧سم كذلك كانت درجة حرارة المحلول الملحي داخل مواسير التوصيل صفر°م ودرجة حرارة الجو الخارجى ٢٥°م . احسب سعة وحدة التبريد بالطن تبريد فى اليوم علما بأن :

معامل إنتقال الحرارة بالتوصيل للطوب الحرارى = ١٨ ر . كيلوكالورى/ساعه.متر.°م
معامل إنتقال الحرارة بالتوصيل للمونه الاسمنتيه = ٥٥ ر . كيلوكالورى/ساعه.متر.°م
معامل إنتقال الحرارة بالتوصيل لألواح الفلين = ١٠ ر . كيلوكالورى/ساعه.متر.°م
سمك معدن المواسير الحامله للمحلول الملحي = ٥٠ ر . سم

معامل إنتقال الحرارة بالتوصيل لمعدن المواسير = ١٢٥ ر . كيلوكالورى/ساعه.متر.°م
معامل إنتقال الحرارة بالتوصيل للصوف الزجاجى = ٠.١ ر . كيلوكالورى/ساعه.متر.°م
معامل إنتقال الحرارة بالحمل للهواء الخارجى = ٢٥ ر . كيلوكالورى/ساعه.متر.°م
معامل إنتقال الحرارة بالحمل لهواء غرفة التبريد = ١٥ ر . كيلوكالورى/ساعه.متر.°م
معامل إنتقال الحرارة بالحمل للمحلول الملحي = ٢٥ ر . كيلوكالورى/ساعه.متر.°م
الحراره النوعيه للفراوله = ٩ ر . كيلوكالورى/كجم.°م

حرارة تنفس ثمار الفراوله عند ١٠°م = ٢٥٠٠ كيلوكالورى/طن فى اليوم
مع إعتبار إضافه ٢٥٪ من كميات الحرارة كاحتياطى لوحدة التبريد وحرارة الخدمه .

الحل

$$\text{Field heat} = \frac{2000 \times 0.9 \times (35 - 10)}{5} = 9000 \text{ kcal/hr}$$

$$\text{Heat of respiration} = \frac{2 \times 2500}{24} = 208.33 \text{ kcal/hr}$$

كمية الحرارة النافذه (Q):

١- من أسطح وجوانب وأرضية غرفة التبريد

$$Q = \frac{A (t_2 - t_1)}{\frac{1}{h_1} + \frac{X_1}{k_1} + \frac{X_2}{k_2} + \frac{X_3}{k_3} + \frac{1}{h_2}}$$

$$\begin{aligned} \text{Area of walls of refrigeration room} &= 5 \times 3 \times 2 + 6 \times 3 \times 2 \\ &= 30 + 36 = 66 \text{ m}^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Area of ceiling and floor of refrigeration room} &= 5 \times 6 \times 2 \\ &= 60 \text{ m}^2 \end{aligned}$$

$$\text{Total surface area} = 66 + 60 = 126 \text{ m}$$

$$\therefore Q = \frac{(126) (35 - 10)}{\frac{1}{2.5} + \frac{25}{(100)(0.18)} + \frac{2.5}{(100)(0.55)} + \frac{7.5}{(100)(0.10)} + \frac{1}{1.5}}$$

$$Q = \frac{(126) (25)}{0.4 + 1.39 + 0.045 + 0.75 + 0.67}$$

$$Q = \frac{(126) (25)}{3.255}$$

$$Q = 967.7 \text{ kcal/hr.}$$

٢- من مواسير توصيل الملول الملحى إلى غرفة التبريد
وتستخدم المعادلة الخاصة بالانتقال القطرى للحرارة من المواسير

$$Q = \frac{2\pi L (t_2 - t_1)}{\frac{1}{h_1 r_1} + \frac{\ln r_2 / r_1}{k_1} + \frac{\ln r_3 / r_2}{k_2} + \frac{1}{h_2 r_2}}$$

$$= \frac{(2) (3.14) (30) (35 - 10)}{\frac{100 \times 2}{(5.25) (7.5)} + \frac{\ln 8.5/7.5}{12.5} + \frac{\ln 23.5/8.5}{0.01} + \frac{100 \times 2}{(1.5) (23.5)}}$$

$$= \frac{(2) (3.14) (30) (25)}{5.08 + 0.01 + 101.7 + 5.67} = \frac{4710}{112.46}$$

$$Q = 41.88 \text{ kcal/hr.}$$

حيث ان :

$$r_1 = \frac{7.5}{2} = 3.75 \text{ cm}$$

$$r_2 = \frac{7.5}{2} + 0.5 = 4.25 \text{ cm}$$

$$r_3 = \frac{7.5}{2} + 0.5 + 7.5$$

$$= 11.75 \text{ cm}$$

Total heat to be absorbed per hour

$$= \text{Field heat} + \text{Heat of respiration} + \text{Heat leakage}$$

$$= 9000 + 208.33 + (967.7 + 41.88)$$

$$= 10217.91 \text{ kcal/hr}$$

$$\therefore \text{Refrigeration Capacity} = \frac{(10217.91) (1.25)(24)}{(80000)} = 3.83 \text{ Ton}$$

ويلاحظ أن الزيادة فى حمل التبريد كان نتيجة ارتفاع كمية الحرارة النافذه إلى غرفة التبريد مما يدل على أن كمية العزل الحرارى للغرفة كانت غير كافيه.

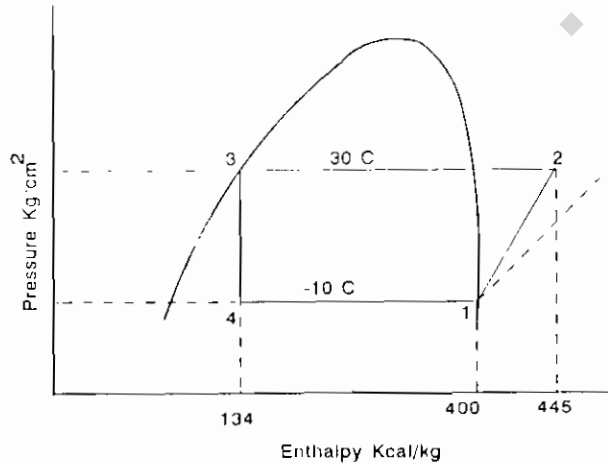
مثال (٢)

ثلاجة تبريد للمواد الغذائية تتحمل حمل تبريد قدره ١٢ طن، تبريد ودرجة حرارة المكثف والمبخر كانت 30°C ، -10°C على الترتيب . فإذا كان الضاغط المستخدم ذو اسطوانتين فردي التأثير ويدور بسرعة ٩٠٠ لفة/دقيقة وكان ارتفاع درجة حرارة مياه التبريد في المكثف 5°C . وكان مائع التبريد المستخدم هو الأمونيا (غاز النوشادر) احسب :

- سعة وحدة التبريد
- كمية الحرارة المفقودة في المكثف
- معامل أداء الثلاجة
- معدل سريان مائع التبريد اللازم في الدقيقة
- القدرة المطلوبة للضاغط مقدرة بالحصان الميكانيكي
- أبعاد اسطوانة الضاغط اذا كانت نسبة طول المشوار الى القطر = ١.٢
- معدل سريان مياه التبريد في المكثف

الحل

ترسم دورة التبريد على الخريطة الخاصة بالأمونيا على أساس أن شغل الضاغط يبدأ من منحنى التشبع للغاز عند درجة حرارة المبخر ويتبع منحنى الانتروبيا الثابت عند هذه النقطة (1) حتى يصل إلى الحالة (2) عند درجة حرارة المكثف ، ويتكثف مائع التبريد حتى يصل إلى الحالة (3) ويكون السائل مشبعاً يتم خفض ضغطه حتى يصل إلى الحالة (4) عند ضغط المبخر كما هو مبين في الشكل :



1- سعة التبريد :

Cooling or Refrigeration Capacity

$$\begin{aligned}
 Q_c &= h_1 - h_4 \\
 &= 400 - 134 \\
 Q_c &= 266 \quad \text{kcal/kg.}
 \end{aligned}$$

ب- كمية الحرارة المفقودة في المكثف :

Heat Absorbed in Condenser

$$\begin{aligned}
 Q_a &= h_2 - h_3 \\
 &= 445 - 134 \\
 Q_a &= 311 \quad \text{kcal/kg.}
 \end{aligned}$$

ج- معامل أداء التلاجه :

Coefficient of Performance

$$\begin{aligned}
 \text{C.O.P.} &= \frac{\text{Refrig. Capacity}}{\text{Work done in Compn.}} \\
 &= \frac{h_1 - h_4}{h_2 - h_1} \\
 &= \frac{400 - 134}{445 - 400} \\
 &= \frac{266}{45} \\
 \text{C.O.P.} &= 5.91
 \end{aligned}$$

د- معدل سريان مائع التبريد :

Refrigeration load = Rate of flow refrigerant
x Refrigeration Capacity

$$\therefore \frac{(12) \times (80,000)}{(24)} = \text{Refrigerant Rate} \times (266)$$

$$\begin{aligned}\therefore \text{Refrigerant Rate} &= \frac{(12) (80,000)}{(24) (266)} \\ &= 150.38 \text{ kg./hr.} \\ &= 2.51 \text{ kg./min.}\end{aligned}$$

هـ- القدرة النظرية اللازمة للضاغط :

Theoretical HP. for the Compressor

$$\begin{aligned}&= \frac{\text{Ref. Rate} \times \text{Work done (ht. units)}}{\text{Standard HP.}} \\ &= \frac{(2.51) (445 - 400) (427)}{75 \times 60} \\ &= 10.71 \text{ HP.}\end{aligned}$$

و- لايجاد قطر وطول مشوار مكبس الضاغط :

نوجد حجم الاسطوانه وذلك من معرفة الحجم النوعى للغاز على خريطة التبريد بواسطة مائع الامونيا عند النقطة (١) وتكون مساويه 0.425 متر مكعب/كجم .

.. Refrigerant Rate (by weight)

$$= \frac{\text{Cyl. Vol.} \times \text{No. of Cyl.} \times \text{RPM} \times \text{No. of effects}}{\text{Sp. Vol.}}$$

$$\text{Cyl. Vol.} = \frac{(2.51) (0.425)}{2 \times 900 \times 1} = 0.000593 \text{ m}^3$$

$$\text{Cyl. Vol.} = \frac{\pi}{4} D^2 L$$

$$0.000593 = \frac{\pi}{4} D^2 (1.2 D)$$

$$\begin{aligned}\therefore D^3 &= \frac{(0.000593) (100^3) (4)}{(1.2) (\pi)} \\ &= 629.51\end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \therefore D &= 8.57 \text{ cms.} \\ \& L &= (1.2 \times 8.57) \\ L &= 10.28 \text{ cms.} \end{aligned}$$

ز- لايجاد معدل سريان مياه التبريد في المكثف :

يتم اجراء موازنه حراريه على المكثف كما يلي :

Heat absorbed by cooling water

= Heat lost from refrigerant

$$\begin{aligned} \therefore (\text{Refrigerent Rate}) (h_2 - h_3) &= \text{Cooling water rate} \times C_p \cdot h_t \cdot \Delta t \\ \therefore (2.51) (445 - 134) &= (\text{Cooling water rate}) (1) (5) \\ \therefore \text{Cooling water rate} &= \frac{(2.51) (311)}{(5)} \\ &= 156.12 \text{ kg./min.} \end{aligned}$$

مثال (٤):

إعادة حل المسأله المنصوص عليها في مثال (٣) مع استخدام مائع التبريد ركلين

١٣٤ (i) - Reclin 134a بدلا من غاز النوشادر .

الحل

إشارة إلى كروكي مثال (٣) وباستخدام الخريطه الخاصه بركلين ١٣٤-أ نحصل

على البيانات الآتية بالنسبه لانتالبيا المائع :

$$\begin{aligned} h_1 &= 391 \text{ kJ/kg} = \frac{391}{4.188} = 93.36 \text{ kcal/kg} \\ h_2 &= 419 \text{ kJ/kg} = 100 \text{ kcal/kg} \\ h_3 &= 242 \text{ kJ/kg} = 57.78 \text{ kcal/kg} \\ h_4 &= 242 \text{ kJ/kg} = 57.78 \text{ kcal/kg} \end{aligned}$$

أ- سعة التبريد :

$$Q_c = h_1 - h_4$$

$$= 93.36 - 57.78$$

$$\therefore Q_c = 35.58 \text{ kcal/kg}$$

ب- كمية الحرارة المفقودة في المكثف :

$$Q_a = h_2 - h_3$$

$$= 100 - 57.78$$

$$\therefore Q_a = 42.22 \text{ kcal/kg}$$

ج- معامل أداء التلاجه :

$$\begin{aligned} \text{C.O.P.} &= \frac{h_1 - h_4}{h_2 - h_1} \\ &= \frac{93.36 - 57.78}{100 - 93.36} \end{aligned}$$

$$\therefore \text{C.O.P.} = \frac{35.58}{6.64} = 5.36$$

د- معدل سريان مائع التبريد

$$\begin{aligned} \text{Refrigerant Rate} &= \frac{(12) (80,000)}{(24) (35.58)} \\ &= 1124.23 \text{ kg/hr} \\ &= 18.74 \text{ kg/min.} \end{aligned}$$

هـ- القدرة النظرية اللازمة للضاغط

$$\begin{aligned} \text{Theoretical H.P} &= \frac{\text{Ref. Rate} \times \text{Work Done (ht. Units)}}{\text{Standard HP.}} \\ &= \frac{(18.74)(h_2 - h_1)(427)}{(75)(60)} \\ &= \frac{(18.74)(100 - 93.36)(427)}{(75)(60)} \\ &= 11.81 \text{ HP} \end{aligned}$$

و- لاجاد قطر وطول مشوار مكبس الضاغط

من خريطة مانع التبريد نجد أن الحجم النوعي للغاز عند الضغط (١) تكون مساوية ١٠٠ ديسمتر مكعب/كجم أى ١ م٣ م٣/كجم.

$$\therefore \text{Cyl. Vol.} = \frac{(18.74)(0.1)}{2 \times 900 \times 1} = .00104 \text{ m}^3$$

$$= \frac{\pi}{4} D^2 L$$

$$= \frac{\pi}{4} D^2 (1.2 D)$$

$$\therefore D^3 = 1104.03$$

$$D = 10.31 \text{ cm}$$

$$L = 12.37 \text{ cm}$$

ز- معدل سريان مياه التبريد فى المكثف

يعمل الموازنه الحراريه على المكثف

$$\therefore (18.74)(93.36 - 57.78) = (\text{Cooling water rate})(1)(5)$$

$$\therefore \text{Cooling water rate} = \frac{(18.74)(35.58)}{(5)}$$

$$= 133.35 \text{ kg/min.}$$

التحكم فى درجات الحرارة والرطوبه داخل غرف التخزين بالتبريد:

يجب العمل على التحكم فى درجات الحرارة والرطوبه داخل غرف التخزين المبرده وذلك للاقلال من التغيرات الخارجيه التى تحدث فى ثمار المحصول اثناء تخزينه ، مثل النقص فى الوزن والحجم وسمك القشرة ويرجع ذلك الى فقد الماء بالتبخير . وتعتبر درجة حرارة التخزين من اهم العوامل التى تؤثر فى حدوث التغيرات الطبيعيه او الظاهريه فى المحصول اذ يوجد تناسب طردي بين سرعة تبخر الماء من المحصول وبين ارتفاع درجة حرارة التخزين ، فكلما زادت درجة حرارة التخزين كلما زاد تبخر الماء ، وبذلك يكون الفقد فى الوزن والحجم فى المحاصيل المخزنه عند درجة حرارة ١٠ °م اقل من المحاصيل المخزنه عند درجة حرارة ١٥ °م لذلك يستعمل فى المخازن المبرده الكبيره جهاز لقياس التغيرات التى تحدث فى الحرارة .

وغادة يلحق بهذه المآزن آهاز لقياس نسبة الرطوبة وتسجيلها اوتوماتيكيا ويسمى ثرموهيجروجراف Thermohygrograph . وتتناسب نسبة الرطوبة تناسباً عكسياً مع سرعة تبخر الماء من المحصول فكلما زادت نسبة الرطوبة كلما قل تبخر الماء والعكس صحيح . وبذلك يكون النقص فى الوزن والحجم اكثر فى المحاصيل المخزنة فى هواء نسبة الرطوبة به ٨٠٪ عنه فى هواء نسبة رطوبته ٩٠٪ ، وذلك لأن الفرق بين تركيز الماء فى المحصول المراد تخزينه وبين تركيز الماء فى هواء الغرفة يتسبب عنه انتشار الماء على هيئة بخار Water Vapor Diffusion من داخل انسجة المحصول الى سطحه الخارجى ومنه الى هواء غرفة التبريد حتى يحدث تعادل بين تركيز بخار الماء فى هواء الغرفة والمحصول المراد تخزينه .

وليمكن التحكم فى نسبة الرطوبة اوتوماتيكيا اثناء التبريد وذلك بالتحكم فى الفرق بين درجة حرارة المبرد ودرجة حرارة هواء غرفة التبريد . فكلما صغر هذا الفرق كلما زادت الرطوبة النسبية ويرجع ذلك الى ارتفاع نقطة الندى فى هواء الغرفة . ويمكن رفع نسبة الرطوبة بسرعة فى غرف التبريد باحداث شأبوره مائية Fog وذلك بتسخين ماء داخل صهاريج توضع بالغرفة او دفع الماء داخل الغرفة على هيئة رذاذ بواسطة مراوح وتسمى مجموعة رشاشات الماء بالآجهزة المرطبة Humidistat للتحكم فى نسبة الرطوبة داخل غرف التبريد .

Freezing التجميد

وهو أحد العمليات التكنولوجية التي تتم نتيجة لخفض درجات الحرارة لمادة ما عن درجة حرارة تجمد هذه المادة . حيث أنه من المعلوم أن تخفيض درجة الحرارة يؤدي إلى تثبيط نشاط الكائنات الحية الدقيقة في المواد الغذائية وتأخير التفاعلات الكيميائية والأنزيمية وبالتالي منع تدهور المنتجات الغذائية وفسادها، مع إمكان حفظ المواد الغذائية لفترات طويلة تحت ظروف مجمدة بدون تغير في خواصها الطبيعية والكيميائية.

عند تصميم نظام تجميد لمنتج غذائي فإنه يلزم تقدير أو حساب إحتياجات التبريد أو التغير في الانثالبي Enthalpy التي تحدث أثناء عملية التجميد . وكذلك أنه من الأهمية بمكان معرفة المعدل والزمن الذي يتم فيه تجميد مادة ما . وهو مرتبط بخواص المنتج وجودته حيث أن بمعدل التجميد سيتحدد معدل الإنتاج نتيجة له وبالتالي فإنه يتطلب التوازن بين التجميد السريع المرغوب ودرجة جودة المنتج.

وعامة فإن معظم الأغذية سواء نباتية أو حيوانية تحتوى على نسبة عالية من الرطوبة المذاب فيها كثير من المواد العضوية والغير عضوية . وتوجد هذه الرطوبة على شكل ماء حر Free Water له نفس الخواص الطبيعية والكيميائية للخلايا والأنسجة في المواد الغذائية.

مما سبق فإنه يتضح أن الاعتبارات الهندسية لاجراء عمليات التجميد تحتاج إلى تطبيق مبادئ الديناميكا الحرارية في معاملات تجميد الأغذية عن طريق خفض درجة حرارتها . وتورد فيما يلى تلخيص لذلك لأمكان اجراء الحسابات الخاصة بتجميد الأغذية.

تطبيقات الديناميكا الحرارية :

يعتبر المحتوى الحرارى أو الانثالبي Enthalpy عاملا هاما في حسابات المعاملات الحرارية ويمثل ما يسمى بدالة الحالة State Function ويعبر عنها بالمعادلة الآتية :-

$$H = U + PV \quad (12-1)$$

حيث U تمثل الطاقة الداخلية للنظام ، P تمثل الضغط المطلق ، V تمثل حجم النظام .

ومن المعروف أن أى تغيير فى المحتوى الحرارى يكون نتيجة للتغير فى ما يحتويه النظام من كمية حرارة عند ضغط ثابت وهو ما يطلق عليه بالحرارة النوعية تحت ضغط ثابت "Cp" Specific heat at constant temperature أى أن:

$$\Delta H = C_p \Delta T \quad (12-2)$$

وعند اضافة أو امتصاص طاقة حرارية لمادة ما فإن الانتقال الحرارى من أو إلى المادة يتسبب عنه قصور فى الطاقه وهو مايعبر عنه بالانتروبيا Entropy.

$$\Delta S = \frac{\Delta q}{T} \quad (12-3)$$

حيث Δq هى كمية الطاقه الحراريه المتبادله ، T درجة الحرارة المطلقة .

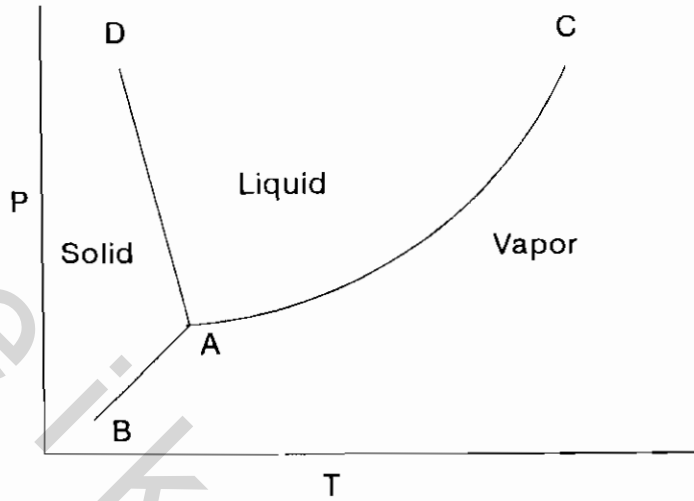
وعند ابقاء نظام ما على درجة حرارة ثابتة وضغط ثابت كما هو الحال فى كثير من المنتجات الغذائية المخزونه نتحصل على حالة من التوازن Equilibrium ينتج عنها مايسمى بالطاقه الحرة Free Energy وتعرف بالمعادله الآتية :-

$$G = H - TS \quad (12-4)$$

أى أنها الفرق بين إنثالبيا المادة وحاصل ضرب درجة الحرارة المطلقة فى انتروبيا المادة . ويكون هذا التغير عند درجة حرارة ثابتة مساويا إلى :

$$\Delta G = \Delta H - T \Delta S \quad (12-5)$$

وفى كثير من عمليات تصنيع الأغذية يحدث تغيير فى طور المادة Phase Change كما هى الحالة فى عمليات التبخير Evaporation والتجميد Freezing والانصهار والتسييح Thawing والتسامى Sublimation ويكون ذلك تحت ظروف درجة حرارة ثابتة وضغط ثابت . ويكون نتيجة لذلك تغير فى النظام من حالة طاقه حرة مرتفعه إلى حالة طاقه حرة منخفضة وهو مايعرف بالكمون الديناميكي الحرارى Thermodynamic Potential ولدراسة ذلك نأخذ فى الاعتبار مادة نقية مثل الماء ويمثل تغير الطور المنحنى الآتى :



شكل (١٢-٦) منحنى تغير الطور

المنحنى AC يمثل حالة التوازن بين السائل والبخار Vaporization التبخير، والخط AD يمثل حالة الاتزان بين الصلب والسائل أى التجميد والتسييع Freezing & Thawing فى حين الخط AB يمثل حالة الاتزان بين الصلب والبخار Sublimation التسامى. والنقطة A هى النقطة الثلاثية Triple point حيث يتواجد عندها السائل والصلب والبخار فى آن واحد عند نفس درجة الحرارة والضغط .

وأول من قام بدراسة حالة الاتزان الديناميكي الحرارى بين الأطوار المختلفه للمادة النقيه (الماء فى هذه الحالة) هما العالمان كلوسىوس وكلايرون اللذان توصلا لمعادلة أطلق اسميهما عليها :-

Clausius- Clapeyron Equation:

$$\frac{dp}{dT} = \frac{\lambda}{T \Delta V} \quad (12-6)$$

وعند افتراض أن بخار الماء له نفس سلوك الغاز المثالى ومع اهمال حجم السائل بالنسبه لحجم البخار فإن :

$$\frac{d(\ln p)}{dT} = \frac{\lambda}{RT^2} \quad (12-7)$$

حيث:

$$\begin{aligned} R &= \text{الثابت العام للغازات} \\ \lambda &= \text{الحرارة الكامنة للتبخير (تغير الطور Phase Change)} \\ T &= \text{درجة الحرارة المطلقة} \\ P &= \text{ضغط بخار الماء الناتج} \\ \Delta V &= \text{التغير فى حجم البخار} \end{aligned}$$

إنخفاض نقطة التجمد Freezing Point Depression

فى الجزء السابق تكلمنا عن حالة الإتزان بين السائل وبخار السائل عند التبخير واعتبرنا أن بخار السائل يسلك سلوكا مثاليا مكننا من تطبيق قوانين الغاز المثالى التى بنيت على إختفاء تام لقوى الجذب بين مكوناته . وكذلك الحال بالنسبة للسائل المثالى الذى يتميز بانتظام تام لقوى الجذب بين جزيئاته . والقانون الأساسى الذى يصف سلوك أى سائل مثالى هو قانون راؤولت Raoult's Law والذى يعبر عنه :

$$P_A = X_A P_A^{\circ} \quad (12-8)$$

حيث:

$$\begin{aligned} P_A &= \text{الضغط البخارى الجزئى للمكون A} \\ P_A^{\circ} &= \text{الضغط البخارى للسائل النقى A عند نفس درجة الحرارة} \\ X_A &= \text{الكسر الجزيئى للمكون A فى المحلول.} \\ \text{mol Fraction of Component A in Solution} &= \end{aligned}$$

وعند التعامل فى معاملات تجميد محاليل غذائية فإنه يتلاحظ إنخفاض نقطة تجميد الماء التى توجد به مذابات مختلفة إلى مستوى أقل من نقطة تجمد الماء النقى. ونجد أن مقدار هذا الانخفاض فى نقطة التجمد يكون دالة مباشرة للوزن الجزيئى وتركيز المذاب فى المنتج الغذائى وفى المحلول مع الماء . ويمكن كتابة معادلة كلوسيوس وكلايرون بالنسبة للمكون A فى المحلول بإعتباره سائل مثالى ، كما يأتى (على نفس نمط الغاز المثالى) :-

$$\frac{d(\ln X_A)}{dT_A} = \frac{\lambda}{RT_A^2} \quad (12-9)$$

حيث :

$$\begin{aligned} \lambda &= \text{الحرارة الكامنة للإنصهار (ك.جول/مول)} \\ X_A &= \text{الكسر الجزيئى للماء فى المحلول} \end{aligned}$$

وإذا اعتبرنا أن المحلول مخفف أى أن معظمه ماء نقى فإن المعادله السابقه يمكن التعامل معها رياضيا للحصول على المعادله الآتية لحساب الانخفاض فى نقطة تجمد المحلول :

$$\Delta T = \frac{RT_{Ao}^2 W_A m}{1000 L} \quad (12-10)$$

حيث:

T_{Ao} = نقطة تجمد السائل النقى A (الماء) درجة مطلقه

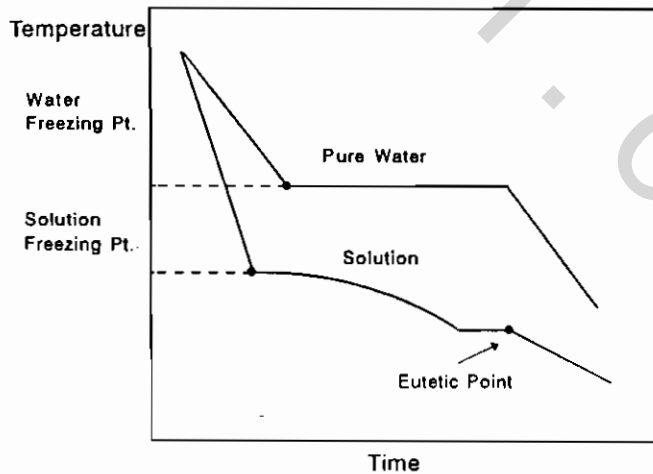
W_A = الوزن الجزيئى للمكون A

L = الحرارة الكامنه للإنصهار (ك.جول/كجم)

m = المولاليه مولات مذاب لكل كجم مذيب Molality .

تجميد المنتجات الغذائيه Freezing of Food Products

عملية التجميد الفعليه فى المنتجات الغذائيه تكون أكثر تعقيدا مقارنة بتجميد الماء النقى . والشكل (٧-١٢) يقارن بين منحنى تجميد ماء نقى مع محلول يحتوى على مذاب واحد . ويتلاحظ أنه فى حالة الماء النقى كلما أزلنا كمية من الحرارة تنخفض درجة حرارة الماء حتى الوصول إلى نقطة التجمد وإذا ما استمرت عملية إزالة الحرارة من النظام فإن ذلك يؤثر على تحول الطور من ماء فائق التبريد إلى ماء مجمد (ثلج) وذلك بإمتصاص الطاقة الكامنه للإنصهار فإذا ما تم التحول إلى الطور الصلب Solid Phase فإن درجة حراره تنخفض عن نقطة التجمد نتيجة لهذا التبريد الفائق.



شكل (٧-١٢) إنخفاض نقطة تجمد المحاليل

أما فى حالة المحلول الذى يحتوى على مذاب واحد فإن إزالة الطاقه الحراريه يتسبب عنها انخفاض فى درجة الحرارة حتى نصل إلى درجة التجمد الابتدائيه للمحلول والتي نلاحظ أنها أقل من درجة الحرارة الابتدائيه للماء النقى ويمكن حساب هذا الانخفاض باستخدام المعادلة (١٢-٦) (معادلة كلوسيوس وكلايرون). فإذا استمرت عملية إزالة الحرارة من المحلول تنخفض درجة الحرارة إلى أن تصل إلى مايسمى بنقطة التصلب Eutectic Point. ويفسر ذلك التحول بأن التجميد الابتدائى يؤدي إلى بلورة الثلج تحدث على خطوتين :

- ١- التنويه Nucleation أو البلورة
- ٢- نمو البلورة

والتنويه هى عملية الاثارة الأوليه لبدء التجميد وتتضمن تواجد أو تكوين نويات Nuclei تعتبر مراكز للتبلور تزداد فى حجمها مع زيادة معدل إزالة الطاقه الحراريه وبالتالي فإن معدل نمو البلورة يكون دالة لمعدل إحداث التجميد . وهذا المعدل يعتمد على :

- أ- المعدل الذى تتفاعل عنده جزيئات الماء عند سطح البلوره.
- ب- معدل إنتشار جزيئات الماء من المحلول الغير مجمد إلى سطح البلوره.
- ج- المعدل الذى يتم عنده إزالة أو امتصاص الطاقه الحراريه .

ويجب ملاحظة فى نظام أى منتج غذائى فعلى يكون من المحتمل جدا تواجد أكثر من مذاب وبالتالي يمكن الوصول إلى أكثر من نقطة تصلب أثناء عملية التجميد .

ولحساب التغير الكلى فى الانثالبى أو التغير فى المحتوى الحرارى اللازم لتخفيض درجة حرارة المنتج الغذائى من مستوى معين فوق نقطة التجمد إلى درجة تخزين مرغوبه ، يمكن التعبير عنه بالمعادله التاليه :

$$\Delta H = \Delta H_s + \Delta H_u + \Delta H_L + \Delta H_I \quad (12-11)$$

حيث:

- ΔH = التغير الكلى فى الانثالبى
- ΔH_s = كمية الحرارة المزاله من المواد الصلبه
- ΔH_u = كمية الحرارة المزاله من الماء الغير مجمد
- ΔH_L = التغير فى الانثالبى نتيجة للحراره الكامنه للتجمد (الإنصهار)
- ΔH_I = كمية الحرارة المزاله من الماء المجمد أو الثلج

وأى من كميات الحراره يمكن حسابها كما يأتى :

$$\Delta H = M.Cp. (T_i - T_F) + M.Cp. (T_F - T) \quad (12-12)$$

حيث :

$$\begin{aligned} M &= \text{كتلة أو وزن المكون} \\ Cp &= \text{الحرارة النوعية لهذا المكون} \\ T_i &= \text{درجة الحرارة الابتدائية (قبل التجميد)} \\ T_F &= \text{درجة حرارة التجميد} \\ T' &= \text{درجة حرارة التخزين (بعد التجميد)} \end{aligned}$$

أما التغير في الانثالبى نتيجة للحرارة الكامنة فيمكن حسابه من :

$$\Delta H_L = M.L \quad (12-13)$$

حيث :

$$\begin{aligned} M &= \text{كتلة الماء المجمد} \\ L &= \text{الحرارة الكامنة للتجمد} \end{aligned}$$

وعامة فإن كل من الكتلة والحرارة النوعية للمكون بعد الوصول إلى نقطة التجمد تعتمد اعتماداً وثيقاً مع درجة الحرارة ، وبالتالي فإن حسابها يكون مقرباً إذا اعتبرت أنها ثابتة أو يمكن الحصول عليها من منحنيات خاصة بالمواد الغذائية سواء الصلبة أو ذات الألياف من أصل نباتي أو حيواني أو محاليل غذائية (عصائر - ألبان) أو مخاليط نصف صلبة (أيس كريم والجرائيطه) حيث أن كل من الكثافة والحرارة النوعية تتغير تغيراً محسوساً بتغير درجة حرارة المادة .

حساب معدلات تجميد المنتجات الغذائية Food Product's Freezing Rates

إن من أهم إقتصاديات عمليات تجميد الأغذية هي معرفة معدل تجميد الغذاء وهو الذى سوف يتحدد به الزمن اللازم لحدوث التجميد الذى يؤثر مباشرة على جودة المنتج .

وهناك أكثر من تعريف لمعدل التجميد ولكن الأهم من التعريف هو طرق وصف معدل التجميد . وقد استقر الرأى على الطرق الأربعة الآتية :

- ١- طريقة الزمن ودرجة الحرارة
- ٢- سرعة واجهة الثلج Ice Front
- ٣- مظهر المنتج
- ٤- الطرق الحرارية Thermal Processes

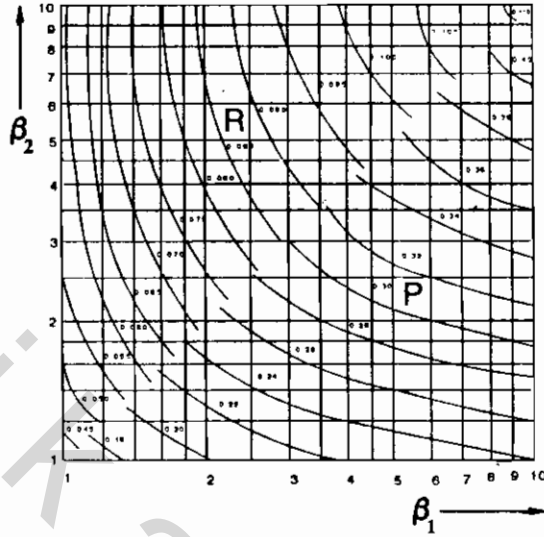
وأكثرها ملائمة فى تصميم وتشغيل نظم التجميد هو الزمن اللازم للوصول إلى درجة حرارة تجميد معينة عند أبطأ نقطة فى المنتج الغذائى. وأكثر العلاقات الرياضيه المباشرة تم اشتقاقها بواسطة العالم بلانك Plank لحساب زمن التجميد لعدد من أشكال المنتج الهندسيه والتى تتمثل فى شكل لوح رقيق Slab أو اسطوانه Cylinder أو كرة Sphere وكانت الصيغه الرياضيه العامه كما يأتى :

$$\theta_F = \frac{\rho L}{T_F - T_\infty} \left[\frac{Pa}{h} + \frac{Ra^2}{K} \right] \quad (12-14)$$

حيث:

θ	= الزمن اللازم للتجميد	hr
ρ	= كثافة المادة الغذائيه المراد تجميدها	kg/m ³
L	= الحرارة الكامنه للتجميد	kJ/kg
T_F	= درجة حرارة التجميد	K
T_∞	= درجة حرارة الجو المحيط بالمادة الغذائيه	K
h	= معامل انتقال الحراره بالحمل للجو المحيط	W/m ² K
k	= معامل انتقال الحرارة بالتوصيل للمادة المجمده	W/m. K
a	= سمك اللوح أو قطر الاسطوانه أو الكره	
P	= ثابت	
$\frac{1}{4}$	= للوح اللانهائى = $\frac{1}{4}$ للأسطوانه اللانهائيه = $\frac{1}{6}$ للكره	
R	= ثابت آخر	
$\frac{1}{8}$	= للوح اللانهائى = $\frac{1}{16}$ للأسطوانه اللانهائيه = $\frac{1}{24}$ للكره	

وفى حالة أى شكل هندسى آخر فيمكن الحصول على كل من (P, R) من خريطة خاصه بمعادله بلانك حيث يتم الحصول على قيمة ثوابت أخرى هي β_1 ، β_2 حيث β_1 هي ثابت عند ضربه فى a يكون مساويا للبعد الأصغر الثانى لجسم ثلاثى الاتجاهات أو الواجه Three Dimensions ، وحاصل ضرب $\beta_2 \times a$ يكون مساويا للبعد الأكبر للشكل الهندسى المذكور .



شكل (١٢-٨) خريطة ثوابت معادلة بلانك للتجميد

وهناك أكثر من طريقة لحساب زمن التجميد ولكن أبسطها هي العلاقة التي توصل إليها بلانك ولو أن هناك أكثر من تعديل لها للأخذ في الاعتبار المتغيرات الحقيقية في الطبيعة والتي لا تؤثر كثيرا في التقدير. وعلى ذلك فإنه يمكن الاعتماد على حساب زمن التجميد بطريقه بلانك والذي يقل على أكثر تقدير بنسبة تتراوح بين ١٠ - ١٥٪ عن النتائج العملية عند التطبيق.

وقد قام العالم ناجوكا Nagaoka بتعديل معادلة بلانك لتكون أكثر دقة في حساب زمن التجميد وتم تجربتها على الأسماك وأعطت نتائج مرضية. وتتميز هذه المعادلة بأنها أخذت في الاعتبار كل من درجة الحرارة الابتدائية والنهائية في حين معادلة بلانك تعتمد على درجة حرارة التجمد ودرجة الحرارة المحيطة.

$$\theta_F = \left[1 + 0.0044 (T_i - T_F) \right] \left[\frac{\rho \Delta H}{T_F - T_\infty} \left(\frac{Pa}{h} + \frac{Ra^2}{k} \right) \right] \quad (12-15)$$

$$\Delta H = c_{pb} (T_i - T_F) + L + c_{pa} (T_F - T_s) \quad (12-16)$$

حيث :

hr	θ_F = الزمن اللازم للتجمد
K	T_i = درجة الحرارة الابتدائية
K	T_F = درجة حرارة التجمد
K	T_∞ = درجة حرارة الجو المحيط
K	T_S = درجة الحرارة النهائية للمادة المجمدة
	ΔH = كمية الطاقة الحرارية المزاله من درجة الحرارة الابتدائية إلى درجة الحرارة النهائية لكل وحدة كتلة .
kJ/kg	
kg/m ³	ρ = كثافة المادة المجمدة
W/m K	k = معامل إنتقال الحرارة بالتوصيل للمادة المجمدة
W/m ² K	h = معامل إنتقال الحرارة بالنقل على سطح المادة
kJ/kg K	c_{pb} = الحرارة النوعية للمادة الغير مجمدة (قبل التجميد)
kJ/kg K	c_{pa} = الحرارة النوعية للمادة مجمدة (بعد التجميد)
kJ/kg	L = الحرارة الكامنه للتجمد .
m	a = سمك اللوح أو قطر الأسطوانه أو قطر الكرة

أنواع المجمدات Types of Freezers

هناك أكثر من تصميم لأجهزة تجميد وحفظ الأغذية المجمدة تعتمد اساساً على نوع المنتج المراد تجميده حيث يختلف من سائل أو عجائن أو منتجات نباتيه أو حيوانيه ويعتمد كذلك على طريقة التغليف إذا ماكانت فى كرتونات أو أكياس أو علب بلاستيك أو لدائن مرنة وما إلى ذلك من مواد تغليف مختلفه .

وتعتمد المجمدات كذلك علي طريقة احداث التجميد والذى يعتمد اساسا علي درجة الجودة ومدة عرض المنتج المجمد وما اذا كان المنتج مصنع أو نصف مصنع أو خام .

وعموماً يمكن تصنيف المجمدات إلى ثلاثة نظم رئيسيه :

مجعدات دفع الهواء : Air Blast Freezers

ونظام التجميد فيها يعتمد على دفع هواء بارد بسرعة عالية جداً على المنتج المراد تجميده والذي يمكن أن يكون ساكناً أو متحركاً داخل غرف التجميد حيث يتلامس هذا الهواء الفائق التبريد مع المنتجات ذات الكثافة العالية والمغلقة في عبوات كبيرة توضع في صواني أو نظم نقل داخل حيز التجميد سواء كان النظام تجميد على دفعات أو التجميد المستمر. وتتحدد سعة النظام حسب حجم حيز التجميد وزمن التجميد اللازم للمنتج النهائي.

مجعدات الألواح Plate Freezers

حيث يتم أحداث التجميد عن طريق التلامس المباشر للمنتجات المراد تجميدها سواء مغلقة أو غير مغلقة. وعادة يتم حفظ الألواح على درجة الحرارة المرغوبة عن طريق تصميم مبخر نظام التبريد Evaporator ملامس مباشرة لمائع التبريد المستخدم. وعادة ماتصمم الألواح بحيث يمكنها الانضغاط إلى أسفل أو إلى أعلى على المنتج المراد تجميده لأحداث التجميد السريع المطلوب من تلامس مباشر مع جانبي الألواح وبذلك يتم زيادة معامل إنتقال الحرارة السطحي بأكبر قدر ممكن.

ويتلاحظ هنا أن حركة الهواء داخل مجمدات الألواح غير مطلوبة حيث الاعتماد على امتصاص الحرارة نتيجة للتلامس المباشر مع الألواح وبالتالي فإن مساحة الأرضيات تكون أقل من تلك الخاصة بمجمدات دفع الهواء وكذلك لا تحتاج إلى قدرات عالية عند التشغيل. وتستخدم مجمدات الألواح بشكل كبير في تجميد منتجات الأيس.

مجعدات الغمر Immersion Freezers

هذا النوع من المجمدات يستخدم التجميد الفائق Cryogenic Freezing حيث يتم وضع المنتج المراد تجميده في حالة تلامس مباشر مع مائع التبريد عند درجة حرارة منخفضة. وعادة فإن سائل النيتروچين هو أكثر سوائل التبريد انتشاراً في نظم التجميد بالغمر نظراً لأن نقطة الغليان لسائل النيتروچين تصل إلى -196°C وبذلك معدلات التجميد عالية جداً خاصة إذا ما كان سريان سائل النيتروچين في اتجاه معاكس لتحويل المنتج المراد تجميده. ويلي ذلك سائل تبريد آخر وهو ثاني أكسيد الكربون السائل حيث أن له نقطة غليان تساوي -78.5°C ويتم استخدامه بشكل مماثل لسائل النيتروچين وذلك بتزويره على المنتج مباشرة.

مثال (١) :

إحسب انخفاض نقطة التجمد لمحلول يحتوى على ١٠٪ كلوريد صوديوم عند الضغط الجوى العادى .

الحل

بما أن المحلول الذى يحتوى ١٠٪ كلوريد صوديوم يعتبر محلولاً مخففاً ، فإنه بالإمكان استخدام المعادلة الآتية .

$$\Delta T_F = \frac{R T_{Ao}^2 W_A \cdot m}{1000 L}$$

حيث أن:

ΔT_F	= Freezing point depression of solution	K
R	= Universal gas constant	
	= 8.314	kJ/kg.mol K
	= 1.99	kcal/kg.mol K
T_{Ao}	= Absolute temperature of solvent	K
W_A	= Molecular weight of solute (H_2O)= 18	kg./mol
m	= Molaity	mol solute/kg.solvent
L	= 333.22	kJ/kg.
	= 79.9	kcal/kg.
	= 18 x 333.22	kJ/mol
	= 18 x 79.9	kcal/mol
W_B	= Molecular weight of sodium chloride = 59	

∴ يمكن حساب المولالية من المعادلة الآتية :

$$m = \frac{M_B \text{ (Per 1000g Solvent)}}{W_B \text{ (molecular wt. of NaCl)}}$$

$$m = \frac{100}{59} = 1.695$$

وبالتعويض في معادلة انخفاض نقطة تجمد المحلول نتيجة لاضافة كلوريد الصوديوم

$$\Delta T_F \text{ (K)} = \frac{8.314 \text{ kJ}}{\text{mol K}} \cdot \frac{(273 \text{ K})^2}{1000} \cdot \frac{18 \text{ kg}}{\text{mol}} \cdot \frac{1.695 \text{ mol}}{\text{kg}} \cdot \frac{1}{(333.22 \times 18)} \cdot \frac{\text{mol}}{\text{kJ}}$$

$$\Delta T_F = \frac{(8.314) (273)^2 (1.695)}{(1000) (333.22)} \\ = 3.15 \text{ K}$$

ويمكن اجراء الحسابات بالوحدات المترية كما يأتى :

$$\Delta T_F (K) = \frac{1.99 \text{ kcal}}{\text{mol K}} \cdot \frac{(273 \text{ K})^2}{1000} \cdot \frac{18 \text{ kg}}{\text{mol}} \cdot \frac{1.695 \text{ mol}}{\text{kg}} \cdot \frac{1}{(79.9 \times 18)} \frac{\text{mol}}{\text{kcal}} \\ = \frac{(1.99) (273)^2 (1.695)}{(1000) (79.9)} \\ = 3.15 \text{ K} \\ \therefore T_F = - 3.15 ^\circ\text{C}$$

مثال (٢) :

إخسب درجة الحرارة التى يبدأ عندها تكوين الثلج فى مخلوط آيس كريم مكوناته ١٠٪ دهن زبد ، ١٢٪ مواد صلبة غير دهنية ، ١٥٪ سكروز ، ٦٣٪ ماء . اذا علمت بأن المذاب الذى يتم أخذه فى الاعتبار لخليط الآيس كريم هو السكروز ووزنه الجزيئى ٣٤٢ ، واللاكتوز ووزنه الجزيئى ٣٤٢ واللذين يمثلان ٥٤٪ من المواد الصلبة الغير دهنية فى المخلوط .

الحل

يتم حساب المولالية كما يأتى:

$$\begin{aligned} \text{Fraction Solute} &= \text{كسر المذاب} \\ &= 0.15 + (0.545)(0.12) \\ &= 0.15 + 0.0654 \\ &= 0.2154 \text{ g/g.product} \\ &\text{وبدلالة كسر الماء (نسبة الي الماء)} \\ \frac{0.2154}{0.63} &= 0.342 \text{ g.Solute/g.Solvent (مذيب)} \\ &= 342 \text{ g.Solute/1000g.Solvent أو} \\ &= \frac{M_B \text{ (per 1000 g.Solvent)}}{W_B \text{ (molecular wt.of Sucrose)}} \\ \therefore m &= \frac{342}{342} = 1.0 \end{aligned}$$

وبالتعويض فى معادلة كلوسيوس وكلايرون لحساب انخفاض نقطة تجمد المحلول نجد أن:

$$\Delta T_F = \frac{(8.314) (273)^2 (18)(1.0)}{(1000)(18 \times 333.22)} = 1.86 \text{ K}$$

$$\therefore T_F = -1.86 \text{ } ^\circ\text{C}$$

مثال (٣):

يتم تجميد ١٠٠٠ كجم من السمك (محتواه المائى ٧٩٪) إلى درجة تجميد نهائية تساوى -١٠°C (حوالى ٨٥٪ من الماء متجمد). فإذا كانت الحرارة النوعية للمواد الصلبة فى المنتج ١٩ ك جول/كجم. $^\circ\text{C}$ وللماء ١ ك جول/كجم. $^\circ\text{C}$ وللثلج ١٩ ك جول/كجم. $^\circ\text{C}$ احسب احتياجات التجميد للسمك من درجة حرارة إبتدائية مقدارها 5°C علما بأن الحرارة الكامنة للانصهار للماء = ٣٣٣.٢٢ ك جول/كجم.

الحل

لكى نتخيل عملية التجميد تفصيلا نوضحها فى الرسم التخطيطى التالى :

$T > T_F$	ماء غير مجمد M_U	مادة صلبة M_S	درجة حرارة أكبر من درجة التجمد
-----------	-----------------------	--------------------	-----------------------------------

$T < T_F$	ماء غير مجمد M_U	ثلج M_I	درجة حرارة أقل من درجة التجمد
-----------	-----------------------	--------------	----------------------------------

$T \ll T_F$	ماء غير مجمد M_U	ثلج M_I	درجة حرارة أقل بكثير عن درجة النجمد
-------------	-----------------------	--------------	--

التغير الكلى فى الانثالبيا أو المحتوى الحرارى من مستوى معين فوق نقطة التجمد إلى درجة تخزين مرغوبة يمكن حسابها من المعادلة الآتية :

$$\Delta H = \Delta H_S + \Delta H_U + \Delta H_L + \Delta H_I$$

فإذا كانت درجة الحرارة الابتدائية قبل التجميد هى :

$$T_1 = 5^{\circ}\text{C}$$

وكانت درجة الحرارة النهائية (التخزين) هى :

$$T = -10^{\circ}\text{C}$$

وحيث أن :

$$\Delta H = M c_p \Delta T$$

لكل من كمية الحرارة المزاله من المادة الصلبه S ، وللماء الغير مجمد U ، وللثلج (الماء المجمد) I.

وكانت كمية الحرارة الكامنه المحسوسه فى الانثالبيا هى :

$$H_L = M_I L$$

فتكون خطوات حساب احتياجات التجميد كما يأتى :

أ- كتلة المادة الصلبه

$$M_S = (1 - 0.791) (1000)$$

$$M_S = 209 \text{ kg}$$

ب- كتلة الماء الغير مجمد

$$M_U = (1 - 0.85)(0.791) (1000)$$

$$M_U = 118.65 \text{ kg}$$

ج- كتلة الماء المجمد (الثلج)

$$M_I = (0.85)(0.791) (1000)$$

$$M_I = 672.35 \text{ kg}$$

وبالتعويض فى المعادلات السابقه تكون :

كمية الحرارة المحسوسه المزاله من المواد الصلبه

$$\Delta H_S = (209)(1.5) (5 + 10)$$

$$\therefore \Delta H_S = 4702.5 \text{ kJ.}$$

كمية الحرارة المحسوسة المزالة من الماء الغير مجمد

$$\Delta H_U = (118.65)(4.1) (5 + 10)$$

$$\therefore \Delta H_U = 7297 \text{ kJ.}$$

كمية الحرارة المحسوسة المزالة من الماء المجمد (الثلج)

$$\Delta H_I = (672.35)(1.9) (0 + 10)$$

$$\therefore \Delta H_I = 12774.65 \text{ kJ.}$$

كمية الحرارة الكامنة

$$H_L = (672.35)(333.22)$$

$$H_L = 224040.46 \text{ kJ.}$$

$\therefore$ احتياجات التجميد الاجماليه :

$$\Delta H = 4702.5 + 7297 + 12774.65 + 224040.46$$

$$\therefore \Delta H = 248814.61 \text{ kJ}$$

ملحوظة :

أعتبرت درجة حرارة تجمد السمك الابتدائية تساوى صفر °م حيث أنها لم تعطى فى المسألة .

مثال (٤):

لحم بقر خالى من الدهون على شكل قالب يتم تجميده فى مجمد يعمل بدفع الهواء Air Blast Freezer درجة حرارة الجو المحيط باللحم داخل المجمد يساوى -30°C ، ومعامل انتقال الحرارة بالحمل يساوى 30 وات/متر مربع كلفن ، ودرجة الحرارة الابتدائية للحم تساوى -5°C ودرجة حرارة المنتج المجمد -10°C . فإذا كانت كتلة اللحم أبعادها 1 متر $\times$ 25 ر. متر $\times$ 6 ر. متر ، وكثافة اللحم 1.05 كجم/مترمكعب ، ومعامل التوصيل الحرارى للحم يساوى 1.08 وات /متر. كلفن اعتبر أن نقطة التجميد الابتدائية للحم -17.5°C والمحتوى المائى للحم المجمد 74% وإحسب الزمن اللازم للوصول إلى درجة حرارة -10°C . قارن النتيجة إذا ما استخدمت معادلة ناجوكا فى حساب زمن التجميد علما بأن الحرارة النوعية للحم قبل التجميد تساوى 3.1 وات/كجم كلفن والحرارة النوعية للحم المجمد 2.1 وات/كجم كلفن.

الحل

نستخدم معادلة بلانك معادلة (١٢-١٤) لحساب زمن التجميد .

$$\theta_F = \frac{\rho L}{T_F - T_{\infty}} \left[\frac{Pa}{h} + \frac{Ra^2}{k} \right]$$

ونحتاج لحساب قيمة كل من الثوابت P , R فى هذه المعادلة إلى حساب قيمة β_1 , β_2 والخريطة الرابطة بين قيمهما وكل من ثوابت المعادلة P , R كما يلى :

أ- ايجاد قيمة من β_2 , β_1

$$\beta_1 = \frac{0.6}{0.25} = 2.4$$

$$\beta_2 = \frac{1}{0.25} = 4$$

$$P = 0.3$$

ونستخدم الخريطة التى نجد منها

ب- يتم عكس قيم كل من β_2 , β_1

$$\beta_1 = 4$$

$$\beta_2 = 2.4$$

$$R = 0.085$$

ومن نفس الخريطة نجد أن

ج- يتم الحصول على قيمة الحرارة الكامنة للانصهار L طبقاً للمحتوى المائى للمنتج

$$L = (333.22) (0.745) = 248.25 \text{ kJ/kg.}$$

$$\therefore \theta_F = \frac{(1050 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}) (248.25 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}) (1000 \frac{\text{J}}{\text{kJ}})}{(-1.75 - (-30 \text{ } ^\circ\text{C})) \left(3600 \frac{\text{sec.}}{\text{hr.}}\right)} \times$$

$$\left[\frac{(0.3)(0.25)}{(30 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{ K}})} + \frac{(0.085) (0.25)^2}{(1.108 \frac{\text{W}}{\text{m K}})} \right]$$

$$\therefore \theta_F = \left(2563.1 \frac{\text{J hr}}{\text{m}^3 \text{ } ^\circ\text{C}} \right) \left(0.0025 \frac{\text{m}^3 \text{ K}}{\text{W}} + 0.0048 \frac{\text{m}^3 \text{ K}}{\text{W}} \right)$$

$$\theta_F = 18.7 \text{ hrs.}$$

ملحوظة :

$$1 \text{ Watt} = 1 \frac{\text{Joule}}{\text{sec.}}$$

د- يتم حساب كمية الطاقة الحرارية المزالة من درجة الحرارة الابتدائية إلى درجة الحرارة النهائية وذلك باستخدام المعادلة الآتية :

$$\begin{aligned} \Delta H &= C_{pb} (T_i - T_F) + L + C_{pa} (T_F - T_s) \\ &= (3.1) (5 + 1.75) + (2.1) (-1.75 + 10) \\ &= 20.925 + 248.25 + 17.325 \\ &= 286.5 \text{ kJ/kg} \end{aligned}$$

ويتم حساب زمن التجميد باستخدام معادلة ناجوكا (معادلة ١٢-٥)

$$\therefore \theta_F = \left[1 + 0.0044 (T_i + T_F) \right] \left[\frac{\rho \Delta H}{T_F - T_\infty} \left(\frac{pa}{h} + \frac{Ra^2}{k} \right) \right]$$

$$= \left[1 + 0.0044 (5 + 1.75) \right] \frac{(1050)(286.5) (1000)}{(-1.75 + 30) (3600)} \times \left[\frac{(0.3)(0.25)}{30} + \frac{(0.085)(0.25)}{1.108} \right]$$

$$\theta_f = (1.0297) [(2957.96) (0.0073)]$$

$$= 21.6 \text{ hrs.}$$

$$\text{Difference} = 21.6 - 18.7$$

$$= 2.9 \text{ hrs}$$

i.e about 15.5% higher than the time calculated based on Plank's Equation.

obeikandi.com

مسائل عامه

- ١- اذا كان المحتوى الرطوبى للقراصيا الطازجة ٧٠٪ ومحتواها الرطوبى بعد التجفيف ١٦٧٪ ، أوجد :
 - أ - نسبة الرطوبه للقراصيا قبل وبعد التجفيف .
 - ب- كمية الرطوبة الواجب طردها من ١٥ كجم من القراصيا الطازجة .
 - ج - نسبة التجفيف .
- ٢- ماهى كمية الماء الذى يجب تبخيره من ١٠٠ كجم من الفاكهه الطازجة التى محتواها الرطوبى ٨٠٪ لى يصل محتواها الرطوبى الى ٢٠٪ اوجد نسبة التجفيف ؟
- ٣- ماهو وزن الفاكهه الطازجة التى محتواها الرطوبى ٧٥٪ والتى يمكن منها انتاج ١٠٠ كجم من الفاكهه المجففه التى محتواها الرطوبى ٢٥٪ ؟ ماهى كمية الرطوبه المتبخرة ؟
- ٤- طن واحد (١٠٠٠ كجم) من نوع من الغلال محتواه الرطوبى ٢٥٪ يراد تجفيفه بحيث يصل محتواه الرطوبى الى ١٤٪ احسب :
 - ١- كمية الرطوبه الواجب تبخيرها .
 - ٢- وزن المادة بعد التجفيف .
 - ٣- نسبة الرطوبة قبل وبعد التجفيف .
 - ٤- نسبة التجفيف .
- ٥- طن واحد من نوع من الخضروات محتواه الرطوبى ٣٥٪ يراد تجفيفه بحيث يصل محتواه الرطوبى الى ١٠٪ . احسب :
 - ١- كمية الرطوبه الواجب ازالته بالتجفيف .
 - ٢- وزن المادة بعد التجفيف .
 - ٣- نسبة الرطوبه قبل وبعد عملية التجفيف .
 - ٤- نسبة التجفيف .

٦- ١٨٢٠٠ كجم من الذرة محتوها الرطوبى ٢٥٪ يلزم تجفيفها الى محتوى رطوبى مقداره ١٢٪ بواسطة مجفف يستخدم ٤٢٥ متر مكعب من الهواء فى الدقيقه عند درجة حرارة جافه $^{\circ}\text{C} 45$ م فاذا كان الهواء الجوى عند درجة حرارة جافه $^{\circ}\text{C} 21$ م ودرجة حرارة رطوبة $^{\circ}\text{C} 18$ م ويخرج الهواء من المجفف عند درجة حرارة جافه $^{\circ}\text{C} 32$ م. احسب :

- ١- نسبة الرطوبه للذره قبل وبعد التجفيف.
- ٢- وزن المادة الجافه.
- ٣- وزن الرطوبه الواجب ازلتها.
- ٤- الوقت اللازم لاتمام عملية التجفيف.
- ٥- كمية الحرارة الواجب اضافتها للهواء .

٧- مجفف نفق يستخدم ٨٥ متر مكعب من الهواء فى الدقيقه لتجفيف نوع من الخضروات من محتوى رطوبى ٤٠٪ الى محتوى رطوبى ١٢٪ ومقدار ما ينتجه من المادة الجافه ١١٥ كجم فى اليوم . اذا كانت المروحه المستخدمه فى دفع الهواء تعمل عند ضغط مقداره ٦٩ بار وكفاءتها ٧٥٪ وكثافة الهواء ١.٢ كجم/م^٣ اوجد :

- ١- القدرة المصانيه اللازمه لادارة المروحه .
- ٢- نسبة الرطوبه قبل وبعد التجفيف.
- ٣- وزن الرطوبه الواجب ازلتها.
- ٤- نسبة التجفيف.

٨- مجفف صوانى يستخدم ٣٤٠ متر مكعب من الهواء فى الدقيقه عند درجة حرارة $^{\circ}\text{C} 50$ م لتجفيف شرائح من البصل من محتوى رطوبى ٩٠٪ الى محتوى رطوبى ٤٪ ومقدار ما ينتجه من البصل المجفف ٢٢٥ كجم. فاذا كان الهواء الجوى يدخل المجفف عند درجة حرارة جافه $^{\circ}\text{C} 27$ م ورطوبه نسبتيه ٦٥٪ ويسخن الى $^{\circ}\text{C} 50$ م ويخرج الهواء من المجفف عند درجة حرارة جافه $^{\circ}\text{C} 38$ م احسب :

- ١- نسبة الرطوبة في المادة قبل وبعد التجفيف.
 - ٢- وزن البصب قبل عملية التجفيف .
 - ٣- وزن الرطوبة الواجب ازلتها.
 - ٤- كمية الحرارة الواجب اضافتها للهواء الجوي.
 - ٥- الوقت اللازم لاتمام عملية التجفيف.
- ٩- وحدة تجفيف بالرش تستخدم لتجفيف عصير البرتقال وتتكون من سيكلون التجفيف وضغط ترددي للهواء وطمبة طاردة مركزية لدفع عصير البرتقال. والمطلوب تقدير القدرة الحصانية لكل من الموتور اللازم لادارة الطلمبة والآخر اللازم لادارة الضاغط وذلك من المعلومات الآتية :

وزن الهواء المراد ضغطه في الدقيقة = 2.27 كجم في الدقيقة
 درجة حرارة الهواء عند دخوله اسطوانه الضاغط = 21°C
 الضغط المطلق للهواء عند دخوله الضاغط = 1.34 بار
 الضغط المطلق للهواء داخل جهاز التجفيف = 6.2 بار
 الضغط اللازم لتذرية عصير البرتقال عند الرشاش = 9.3 بار
 كمية عصير البرتقال المطلوبه للتجفيف = 45.5 كجم في الدقيقة
 كثافة عصير البرتقال = 1.073 كجم/متر مكعب
 الكفاءة الميكانيكية لكل من الضاغط والطمبة = 75%
 اعتبر ان الضاغط يتحرك داخل الاسطوانه اديباتيكيا تبعا للقانون $Pv^{1.4} = \text{Const.}$

- ١- مجفف صوانى يستخدم 280 متر مكعب من الهواء في الدقيقة عند درجة حرارة 28°C لتجفيف 680 كجم من شرائح البطاطس من محتوى رطوبى 85% الى محتوى رطوبى 5% فاذا كان الهواء الجوى يدخل المجفف عند درجة حرارة جافه 21°C ورطوبة نسبیه 70% ويسخن الى 43°C ويخرج الهواء من المجفف عند درجة حرارة جافه 35°C احسب :
- ١- نسبة الرطوبة في البطاطس قبل وبعد التجفيف.
- ٢- وزن البطاطس المجفف.
- ٣- وزن الرطوبة الواجب ازلتها.
- ٤- كمية الحرارة الواجب اضافتها للهواء الجوى.
- ٥- الوقت اللازم لاتمام عملية التجفيف.

- ١١- مجفف صوانى يستخدم ٣٤٠ متر مكعب من الهواء فى الدقيقه لتجفيف طن واحد من شرائح البصل من محتوى رطوبى ٩٠٪ الى محتوى رطوبى ٥٪ فاذا كان الهواء الجوى يدخل المجفف عند درجة حرارة جافه ١٨°م ورطوبه نسبیه ٨٠٪ ويسخن بحيث تكون درجة حرارة البصل ثابته اثناء التجفيف عند درجة حرارة ٢٤°م ويخرج الهواء من المجفف عند درجة ٢٠°م احسب :
- ١- نسبة الرطوبه قبل وبعد التجفيف .
 - ٢- وزن شرائح البصل المجفف.
 - ٣- وزن الرطوبه الواجب ازلتها.
 - ٤- كمية الحراره الواجب اضافتها للهواء الجرى .
 - ٥- الوقت اللازم لاتمام عملية التجفيف .

- ١٢- يراد تجفيف حبوب بمعدل ٩٠.٨٠ كجم يوميا من محتوى رطوبى ٤٠٪ الى محتوى رطوبى ١٠٪ فاذا كانت الرطوبه المطلقه للهواء الداخلى الى المجفف ٧.٠٠٠ كجم رطوبه /كجم هواء جاف وللواء الخارج من المجفف ١٦.٠٠٠ كجم رطوبه/كجم هواء جاف وكانت كثافة الهواء ١.٢٨ كجم/متر مكعب . احسب:

- ١- القدره الميكانيكيه اللازمه لدفع الهواء داخل الحبوب اذا كان الضغط المقابل يعادل ٥سم ماء وكفاءة الموتور المستخدم ٧٥٪.
- ٢- الطاقه الكهربيه بالكيلووات ساعه اللازمه لتسخين الهواء من درجة حرارة ٢٤°م الى ٨٠°م.

- ١٣- مجفف نفق يستخدم لتجفيف بلع من محتوى رطوبى ٦٠٪ الى ٢٠٪ سعته ٢٥ عربيه بكل منها ١٢ صنيه حمولة كل منها ١١.٥ كجم بلع وتستغرق عملية التجفيف ٤ ساعات فاذا كان الهواء يدخل الى مسخن المجفف عند ٢٦°م ، ٧٠٪ رطوبه نسبیه ويتم تسخينه الى ٦٠°م ويخرج الهواء من المجفف عند ٤٣°م . احسب:

- ١- نسبة الرطوبه قبل وبعد التجفيف.
- ٢- كمية الرطوبه الواجب ازلتها فى الساعه.
- ٣- نسبة التجفيف.
- ٤- كمية الحراره الواجب اضافتها للهواء معبراً عنها بالحصان البخارى.
- ٥- قدرة المروحه اللازمه لدفع الهواء اذا كان ضغط تشغيلها ٦٩.٠٠٠ بار وكفاءتها ٧٥٪.

١٤- ماهى سعة وحدة التبريد اللازمة لتبريد ٤٥٠٠ كجم من اللبن بعد بسترتة على درجة حراره 65°M الى درجة حرارة 15°M اذا علمت ان نسبة الدهن والمواد الصلبة الاخرى باللبن ١٢ر٥٪ وان عملية التبريد تستغرق ٦ ساعات مع استخدام الماء فى التبريد الاولى حتى تصل درجة حرارة اللبن الى 50°M علما بان كفاءة وحدة التبريد بمشتملاتها ٩٠٪ .

١٥- اذا كانت عملية فصل الاحماض الدهنيه من زيت بذرة القطن تستلزم تبريد الزيت الى 15°M وتستغرق هذه العملية ثلاث ساعات . احسب سعة وحدة التبريد اللازمة لمصنع يقوم بانتاج ٢٨٠٠ كجم من الزيت يوميا اذا علمت ان الحرارة النوعيه للزيت ٧ر٠ . ودرجة حرارته قبل عملية التبريد 40°M وكفاءة وحدة التبريد ٧٠٪ .

١٦- غرفة تبريد تستخدم وسيط مبرد من مخلوط من الماء والملح فاذا كانت درجة حرارة المخلوط الملحى عند دخول الغرفة 10°M ودرجة حرارته بعد مروره بالغرفة 7°M وحرارته النوعيه ٨ر٠ . ومقدار سريانته ٥٥٠ كجم/ساعه فما هى سعة وحدة التبريد فى اليوم علما بان كفاءة وحدة التبريد الكليه ٨٠٪ .

١٧- ماهى سعة وحدة التبريد اللازمة لامداد مصنع اغذية بمياه الشرب المثلجه اللازمه لعماله اذا علمت ان عدد العمال ٧٤٠ عاملا ، والكميه المقدرة لشرب العامل يوميا حوالى لتر ماء مثلج ودرجة حرارة الماء بعد تبريده 10°M ومتوسط درجة حرارة المنطقه 44°M وكفاءة وحدة التبريد ٨٥٪ .

١٨- ماهى سعة وحدة التبريد اللازمه لعمل يقوم بفصل الشمع من غشيم القصب اذا كانت الكمية المبرده يوميا من خليط الشمع والزيت ٢٢ر٥ كجم وتبرد من درجة 50°M إلى 5°M وحرارتها النوعيه ٨٥ر٠ . وعدد ساعات التبريد ٥ ساعات .

١٩- ثلاجة تجاريه تعمل بطريقة التبريد بالضغط تستخدم لحفظ ٦٧٠ كجم من اللحوم عند درجة حرارة 6°M لمدة ساعه واحدة . احسب الشغل اللازم لادارة الضاغط اذا علمت ان عدد لفاته ١٠٠ لفة/دقيقه وان سعة وحدة التبريد ١٥ حصان ميكانيكى لكل طن تبريد فى الساعه وان اللحم يدخل الثلاجة عند درجة حرارة 10°M . اعتبر ان الحرارة النوعيه للحم تساوى ٧ر٠ .

٢٠- ماهى سعة وحدة التبريد بوحدات طن تبريد/يوم اللازمه لحفظ درجة حرارة ثلاجة للبرتقال ثابتة على 5°C بينما الجو الخارجى الملامس للثلاجة فى درجة حرارة 30°C اذا علمت ان جوانب الثلاجه وسقفها مصنوع من الخشب بسمك 2.5 سم والمساحه السطحيه للثلاجه 475 متر مربع ومعزوله بقوالب صوف زجاجى مضغوط بسمك 3 سم وكفاءة وحدة التبريد 80% علما بان معامل انتقال الحرارة بالتوصيل للخشب $= 0.45 \text{ ر. كيلوكالورى/ساعة.متر}^{\circ}\text{C}$ وللصوف الزجاجى $= 0.1 \text{ ر. كيلوكالورى/ساعة.متر}^{\circ}\text{C}$ ومعامل انتقال الحرارة بالنقل للهواء الخارجى الملامس للثلاجة $= 2 \text{ كيلوكالورى/ساعة.متر}^{\circ}\text{C}$ وللحوائط الداخلى $= 1.5 \text{ كيلوكالورى/ساعة.متر}^{\circ}\text{C}$.

٢١- ثلاجة تجاريه تعمل بطريقة التبريد الصناعى بالضغط تستخدم لحفظ 670 كجم من اللحوم عند درجة حرارة -6°C لمدة 8 ساعات ، ويدخل اللحم الثلاجة عند درجة حرارة 10°C وحرارته النوعيه $7 \text{ ر. كيلوكالورى/كجم}^{\circ}\text{C}$ اذا كانت المساحه السطحيه لجدار الثلاجه 40 مترمربع والجدران مكونه من خشب بسمك 5 سم ومعزوله بقوالب صوف زجاجى مضغوط بسمك 3 سم ودرجة حرارة الجو الخارجى الملامس لجدران الثلاجه 20°C . احسب سعة وحدة التبريد الكلية بالطن تبريد فى اليوم اللازمه علما بان :

معامل انتقال الحرارة بالنقل للجو الخارجى $= 25.0 \text{ ر. كيلوكالورى/ساعة.متر}^{\circ}\text{C}$
 معامل انتقال الحرارة بالتوصيل للصوف الزجاجى $= 0.1 \text{ ر. كيلوكالورى/ساعة.متر}^{\circ}\text{C}$
 معامل انتقال الحرارة بالتوصيل للخشب $= 0.25 \text{ ر. كيلوكالورى/ساعة.متر}^{\circ}\text{C}$
 معامل انتقال الحرارة لجو الثلاجة الداخلى $= 1.5 \text{ ر. كيلوكالورى/ساعة.متر}^{\circ}\text{C}$
 كفاءة وحدة التبريد $= 80\%$

٢٢- ثلاجة عرض تعمل بطريقة التبريد الصناعى بالضغط تستخدم لحفظ مواد غذائيه مقدارها 1000 كجم يوميا عند درجة حرارة 5°C . تدخل المواد الغذائيه الثلاجة عند درجة 20°C والحرارة النوعيه المتوسطه لهذه المواد $62 \text{ ر. كيلوكالورى/كجم}^{\circ}\text{C}$. اذا كانت جدران الثلاجه مكونه من خشب بسمك 5 سم

ومعزوله بقوالب صوف زجاجي بسمك ٢٥ سم ومساحتها السطحية ١٥ مترمربع . اما واجهة الشلابة فمكونه من طبقتين من الزجاج كل منها بسمك ٢٥ سم تحصر بينهما طبقة من الهواء بسمك ٧٥ سم ومساحتها السطحية ٥ متر مربع . احسب سعة وحدة التبريد اللازمة بالطن تبريد في اليوم علما بان :-

درجة حرارة الجو الخارجى الملامس لجدران وواجهة الثلجة = ٢٠°م

معامل انتقال الحرارة بالنقل للجو الخارجى = $2.5 \text{ كيلوكالورى/ساعة متر}^2 \cdot \text{م}^{\circ}$
 معامل انتقال الحرارة بالتوصيل للصوف الزجاجى = $0.1 \text{ ر. كيلوكالورى/ساعة متر}^2 \cdot \text{م}^{\circ}$
 معامل انتقال الحرارة بالتوصيل للزجاج = $2 \text{ ر. كيلوكالورى/ساعة متر}^2 \cdot \text{م}^{\circ}$
 معامل انتقال الحرارة بالنقل لجو التلاجه الداخلى = $2.5 \text{ كيلوكالورى/ساعة متر}^2 \cdot \text{م}^{\circ}$
 معامل انتقال الحرارة بالتوصيل لطبقة الهواء = $2 \text{ ر. كيلوكالورى/ساعة متر}^2 \cdot \text{م}^{\circ}$
 المحصوره بين زجاج واجهة التلاجه
 كفاءة وحدة التبريد = 80%

٢٢- ثلاجة تجارية تعمل بطريقة التبريد الصناعي بالضغط تستخدم لحفظ ١٠٠٠ كجم من التفاح عند درجة حرارة ٥°م لمدة عشر ساعات ويدخل التفاح الثلاجة عند درجة حرارة ١٥°م وحرارته النوعية ٩.٠ كيلوكالورى/كجم °م . فإذا كانت المساحة السطحية لجدران الثلاجة الجانبية ٣٠ مترمربع مكونه من طوب احمر بسمك ٥٧سم ومغطاه بطبقة من الاسمنت بسمك ٢٥١رسم ومعزوله من الداخل بطبقة من قوالب الصوف الزجاجى المضغوط بسمك ٢٥١رسم والمساحة السطحية لسقف وارضية الثلاجة ١٥ متر مربع ومكونه من طوب احمر بسمك ٥٧رسم ومغطاه بطبقة من اسفلت الاسطح كمادة عازله بسمك ٢٥١رسم وكانت درجة حرارة الجو الخارجى الملامس لجدران واسقف وارضية الثلاجة ١٥°م وكمية الحرارة المتولدة عن تنفس التفاح ٠٥٢ كيلوكالورى لكل طن من التفاح فى اليوم ، احسب سعة وحدة التبريد الكليه بالطن تبريد فى اليوم اللازمه لحفظ درجة حرارة التفاح علما بان :

معامل انتقال الحرارة بالحمل للجو الخارجى = $25 \text{ كيلو كالورى/ساعة متر}^2 \cdot \text{م}^{\circ}$
 معامل انتقال الحرارة بالتوصيل للطوب الاحمر = $0.1 \text{ كيلو كالورى/ساعة متر}^2 \cdot \text{م}^{\circ}$
 معامل انتقال الحرارة بالتوصيل لطبقة الاسمنت = $25 \text{ كيلو كالورى/ساعة متر}^2 \cdot \text{م}^{\circ}$

معامل انتقال الحرارة بالتوصيل للصوف الزجاجى = $0.1 \text{ ر. كيلوكالورى/ساعة متر}^{\circ}\text{م}$
 معامل انتقال الحرارة بالتوصيل لاسفلت السطح = $35 \text{ ر. كيلوكالورى/ساعة متر}^{\circ}\text{م}$
 معامل انتقال الحرارة بالعمل لجر الثلجة الداخلى = $15 \text{ ر. كيلوكالورى/ساعة متر}^{\circ}\text{م}$
 كفاءة وحدة التبريد = 85%

٢٤- ماهى سعة وحدة التبريد بوحدات طن تبريد فى اليوم اللازمه لحفظ درجة حرارة ثلاجة للبرتقال ثابتة على 5°م بينما الجو الخارجى للثلاجة فى درجة حرارة 15°م اذا علمت ان جوانب الثلاجة وسقفها مصنوع من الخشب بسمك 2.5 سم والمساحة السطحية للثلاجة 15 مترمربع ومعزوله بقوالب صوف زجاجى مضغوط بسمك 4 سم وكفاءة وحدة التبريد 80% علما بان معامل انتقال الحرارة بالتوصيل للخشب : $5 \text{ ر. وللصوف الزجاجى} = 0.1 \text{ ر. كيلوكالورى/ساعة متر}^{\circ}\text{م}$.. ومعامل انتقال الحرارة بالنقل للهواء الملامس لجدران الثلاجة من الخارج = $25 \text{ ر. كيلوكالورى/ساعة متر}^{\circ}\text{م}$ ، ومعامل انتقال الحرارة بالنقل لجو الثلاجة الداخلى = $15 \text{ ر. كيلوكالورى/ساعة متر}^{\circ}\text{م}$.

٢٥- ثلاجة تبريد للمواد الغذائية تتحمل حمل تبريدى قدرة $12 \text{ طن تبريد ودرجة حرارة المكثف والمبخر هي } 30^{\circ}\text{م} ، -10^{\circ}\text{م}$ على الترتيب . فاذا كان الضاغط المستخدم ذو اسطوانتين فردى التأشير ويدور بسرعة 2000 لفه/الدقيقة كما ان مقدار الارتفاع فى درجة حرارة ماء التبريد بالمكثف يساوى 5°م . اذا كان مائع التبريد المستخدم ١ - فريون ١٢ ٢ - ركلين ١١٢٤ أحسب:

- أ - سعة وحدة التبريد .
- ب- كمية الحرارة المفقودة فى المكثف .
- ج- معامل الاداء للثلاجة .
- د - وزن مائع التشغيل اللازم .
- هـ- القدرة المطلوبة للضاغط .
- و - ابعاد اسطوانة الضاغط اذا كان قطر الاسطوانة يساوى طول المشوار .
- ز - كمية ماء التبريد اللازم لتبريد السائل بالمكثف

٢٦- ثلاجة تبريد تتحمل حمل قدرة ٢٠ طن تبريد ودرجة حرارة المبخر والمكثف 25°C ، 12°C على الترتيب فإذا كان الضاغط ذو (٦) اسطوانات ويدور بسرعة ١٥٠٠ لفة/الدقيقة مزدوج التأثير . أحسب :

أولا : للأمونيا ثانيا : للغريون ١٢

- أ - سعة التبريد .
- ب- كمية الحرارة المفقودة في المكثف .
- ج- معامل الجودة للثلاجة .
- د - كمية مائع التشغيل اللازم .
- هـ- القدرة المطلوبة للضاغط .
- و - ابعاد اسطوانة الضاغط اذا كانت نسبة طول المشوار الى قطر الاسطوانة $1.2 =$.
- ز - كمية ماء التبريد اللازم لتبريد مائع التشغيل بالمكثف اذا كان ارتفاع درجة حرارة مائع التبريد بالمكثف تساوى 5°C .

٢٧- ثلاجة تبريد تعمل مره بالغريون ١٢ ومرة أخرى بركلين ١٢٤ كمائع تشغيل بالتبريد و درجة حرارة مكثفها 35°C ودرجة حرارة مبخرها -10°C علما بان الضاغط يقوم بضغط الغريون ايزنتروپى من ضغط المبخر الى ضغط المكثف أوجد معامل الجودة للثلاجة في الحالات الآتية :

- ١- بدون استخدام مبادل حرارى .
- ٢- باستخدام مبادل حرارى لتبريد مائع التبريد المشبع من درجة صفر 0°C الى درجة -6°C .

٢٨- ثلاجة تبريد تعمل تحت حمل تبريدى قدرة ١٠ طن تبريد عند درجة حرارة -10°C وضاغط يعمل شغل قدرة ٥٠ كيلو كالورى/كجم وذو اسطوانتين وعدد لفاته ١٥٠٠ لفة/الدقيقة فردى التأثير وبمبادل حرارى لتبريد السائل المشبع المكثف الخارج من المكثف بواسطة مياه ومقدار ارتفاع درجات حرارة المبادل 10°C . احسب :

- ١- معدل سريان مائع التبريد في الدقيقه في حالة استخدام النوشادر ، وحالة استخدام ركلين ١٢٤ .
- ٢- قدرة الضاغط بالحصان الميكانيكى .
- ٣- كمية ماء التبريد/الدقيقه .

٢٩- ثلاجة تجاريه تعمل بطريقه التبريد الصناعى بالضغط مانع تبريد ، تستخدم لحفظ ٥٠٠ كجم من اللحوم المجمده عند درجة -١٠°م - ويدخل اللحم الثلاجة عند درجة حرارة ٢٥°م ليتم تجميده فى ٨ ساعات علما بان درجة تجميد اللحم هى -٢°م والحرارة النوعيه قبل التجمد ٧٧ر . والحرارة النوعيه بعد التجميد هى ٤ر . كيلوكالورى/كجم °م . والحراره الكامنه لانصهار اللحم هى ٥٦ كيلوكالورى لكل كجم اذا كانت المساحه السطحيه لجدار الثلاجة ٢٩ متر مربع والجدران مكونه من خشب بسمك ٤سم وصوف زجاجى بسمك ٢سم ودرجة حرارة الجو الخارجى الملامس لجدران الثلاجة ٣٠°م وان معامل انتقال الحرارة للمواد هى :-

معامل انتقال الحرارة بالحمل للجو الخارجى = ٨٧ كيلوكالورى/ساعه متر ٢.°م
معامل انتقال الحرارة بالتوصيل للزجاج = ٣٧ر . كيلوكالورى/ساعه متر.°م
معامل انتقال الحرارة بالتوصيل للخشب = ١٤٩ر . كيلوكالورى/ساعه متر.°م
معامل انتقال الحرارة بالحمل لجو الثلاجه الداخلى = ٤٩ كيلو كالورى/ساعه متر ٢.°م

- احسب مايأتى لكل من مانع تبريد
- ١- ا - فريون ١٢ ، ب- ركليين ١١٣٤
 - ١- الحمل الحرارى مقدرا بالطن تبريد مع اعتبار ٢٥٪ احتياطى خدمه .
 - ٢- القدره اللازمه وكذا قطر اسطوانة الضاغط الذى عدد لفاته ١٥٠٠ لفه/دقيقه مزدوج التأثير .
 - ٣- كمية ماء التبريد فى المكثف علما بان مقدار الارتفاع فى درجة الحرارة ١٠°م .

٣- ثلاجة تبريد للمواد الغذائيه تعمل بالضغط مانع تبريد من ضغط المبخر (١٥ر جوى) الى ضغط المكثف (٩ جوى) ويخرج الغاز من الضاغط بدرجة حرارة ٨٠°م ليدخل المكثف ويبرد بواسطه ٧٥ كجم/دقيقه . وترتفع درجة حرارة ماء التبريد بمقدار ١٠°م .

١ - وقع الدوره على خريطة مانع التبريد اذا كان المانع فريون ١٢ او ركليين ١١٣٤ .

- ب- ارسم الدوره موضحا جميع اجزائها .
- ج- احسب حمل التبريد للثلاجة فى كلا الحالتين .

٣١- ثلاجة تبريد للحوم تعمل مره على مائع التبريد فريون ١٢ ومره أخرى على مائع التبريد ركلين ١١٣٤ ذات حمل تبريدى مقداره ٢٥ طن تبريد ودرجة حرارة المكثف والمبخر $^{\circ}\text{C} 20$ ، $^{\circ}\text{C} 10$ على الترتيب بحيث تكون انتروبيا الغاز بعد الضغط ١٦١ كيلوكالورى/كجم $^{\circ}\text{C}$ فى حالة الفريون ١٢ ، ١٨٠ كيلوجول /كيلو جرام كلفن .

احسب :

- ١- سعة التبريد .
 - ٢- كمية الحرارة المفقوده بالمكثف فى كلا الحالتين .
 - ٣- معامل اداء الثلاجه .
 - ٤- معدل سريان مائع التبريد .
 - ٥- القدرة المطلوبة لتشغيل الضاغط فى كلا الحالتين .
 - ٦- معدل سريان ماء التبريد بالمكثف اذا كان $\Delta T = 8^{\circ}\text{C}$
- ٣٢- ثلاجة تبريد تعمل على مائع تبريد الفريون ١٢ ومره اخرى مائع التبريد ركلين ١١٣٤ ويتم تشغيلها يوميا لمدة ٨ ساعات لتبريد ٥ طن خضروات من درجة حرارة الحقل ($^{\circ}\text{C} 20$) الى درجة حرارة الحفظ ($^{\circ}\text{C} 10$) فاذا اعتبرت البيانات الآتية :

- الحرارة النوعيه للخضروات = 0.7 كيلوكالورى/كجم $^{\circ}\text{C}$
 - معامل انتقال الحرارة بالحمل للهواء الخارجى والداخلى للثلاجه = 6 ، 2 كيلوكالورى/ساعه .متر $^{\circ}\text{C}$.
 - ابعاد الثلاجه $5 \times 6 \times 6$ متر
 - حرارة التنفس للخضروات = 700 كيلوكالورى/طن.يوم .
- احسب مايتى :-
- ١- الحمل التبريدى للثلاجه مع اعتبار كمية حرارة الخدمه والطوارىء = 25% .
 - ٢- معدل سريان مائع التبريد بالكيلوجرام/دقيقه .
 - ٣- القدرة الميكانيكيه اللازمه لادارة الضاغط .
 - ٤- هل يمكن استخدام ضاغط ذو اسطوانتين قطر وطول اسطوانة ١٠ ، ١٢ سم بالترتيب ويدور بسرعة ١٥٠٠ لفة/دقيقه ؟

٢٣- إحسب زمن التجمد اللازم لقطعة ستيك من اللحم البقرى على هيئة لوح رقيق سمكه ٢.٥ ر. متر ويمكن اعتبار طوله لانهائى. وضعت قطعة اللحم فى مجمد يعمل بتيار الهواء البارد المدفوع درجة حرارته -٢٠°م ومعامل إنتقال الحرارة بالحمل يساوى ٢٠ وات/متر مربع. كلفن . اذا علمت أن :

كثافة اللحم المجمد	١.٥ كجم/متر مكعب
الحرارة الكامنة لانصهار الثلج	٢٢٢ ر.٢٢ ك.جول/كجم
المحتوى المائى للجم	٦٥٪
معامل إنتقال الحرارة بالتوصيل للجم	١٣٥ وات/متر .كلفن
الحرارة النوعية للماء الغير مجمد	٢٥٠ ك.جول/كجم .°م
الحرارة النوعية للثلج	١٧٥ ك.جول/كجم .°م
الحرارة النوعية للمادة الصلبه	١٥٠ ك.جول/كجم .°م

ماذا تكون إحتياجات التجميد اذا كانت درجة الحرارة الإبتدائيه ٢٠°م ودرجة حرارة تجمد قطعة اللحم -٢٧٥°م ؟

٢٤- نفق للتجميد الفورى السريع (Instant Quick Freezing IQF) يستخدم لتجميد الفراوله طول السير الناقل ٦ متر. ويستخدم دفع الهواء البارد كوسط للتجميد درجة حرارته -٢٤°م ويتحرك الهواء البارد خلال مرقد المنتج ينتج عنه معامل إنتقال الحرارة السطحى ٨٥ وات/متر مربع كلفن. وتدخل الفراوله النفق عند درجة حرارة ٥°م ويتعين تجميدها إلى -٢٠°م ، إذا علمت أن :-

كثافة حبات الفراوله	٩٦٠ كجم/متر مكعب
معامل إنتقال الحرارة بالتوصيل	٢٠.٨ وات/متر.كلفن

باعتبار أنه يمكن تقريب شكل حبة الفراوله على أنها كرة قطرها ١٢ ر. متر ، إحسب زمن التجميد وسرعة الناقل اللازمه لذلك .

٢٥- إحسب نقطة تجمد لبن خالى الدهن (Skim milk) علما بان مكوناته هي : ٥١٪ لاکتوز ، ٣٦٪ بروتين ، ٨٪ دهن ، ٣٪ مواد معدنيه ورماد ، ٢٪ ماء مع اعتبار أن وجود اللاكتوز سيكون له الأثر الغالب على نقطة التجمد . (الوزن الجزيئى للاكتوز ٣٤٢).

٣٦- إذا كانت نقطة تجمد عصير العنب تساوى -18°م ومحتواه المائى عند هذه الدرجة 84.7% إحسب الوزن الجزيئى الفعال لعصير العنب .

٣٧- تم تعبئة عصير الفراولة فى عبوة مقاسها (0.4 متر $\times$ 1 متر $\times$ 14 متر) وتدخل العبوات مجمد ألواح درجة حرارة الجو المحيط بها -20°م ومعامل انتقال الحرارة السطحي يساوى 25 وات/مترمربع كلفن وتدخل العبوة إلى المجمد عند درجة حرارة 5°م فإذا علمت أن المحتوى المائى للفراولة 83.4% ومعامل انتقال الحرارة بالتوصيل المكافئ (مادة العبوة وعصير الفراولة) يفترض أنه 2 وات/متر.كلفن وكثافة الفراولة 960 كجم/مترمكعب. مستخدماً خرائط التجميد إحسب الزمن اللازم لتجميد عصير الفراولة .

٣٨- إحسب الزمن اللازم لتجميد قطعة من اللحم على شكل لوح رقيق سمكة 5 سم وكانت ظروف التشغيل كما يأتى :

$5^{\circ}\text{م} =$	درجة الحرارة الابتدائية للحم
$-5^{\circ}\text{م} =$	درجة حرارة تجميد اللحم
$-25^{\circ}\text{م} =$	درجة حرارة اللحم المجمد النهائى
$-30^{\circ}\text{م} =$	درجة حرارة الجو المحيط باللحم
4 ر.ك. كالورى/كجم $^{\circ}\text{م} =$	الحرارة النوعية للحم قبل التجميد
9 ر.ك. كالورى/كجم $^{\circ}\text{م} =$	الحرارة النوعية للحم بعد التجميد
1050 كجم/مترمكعب	كثافة اللحم
8 ر.ك. كالورى/كجم	الحرارة الكامنة للتجميد
145 ر.ك. كالورى/ساعة.متر $^{\circ}\text{م} =$	معامل انتقال الحرارة بالتوصيل للحم
18 ر.ك. كالورى/ساعة.مترمربع $^{\circ}\text{م} =$	معامل انتقال الحرارة بالنقل للسطح

قارن الزمن باستخدام طريقة بلانك مع طريقة ناجوكا .

obeikandi.com

References المراجع

اولا : المراجع الاجنبيه :

- ASHRAE Guide and Data Book (1988), Applications American Society of Heating, Refrigerating, and Air Conditioning Engineers.
- Batty, J. Clair, and Steven L. Folkman, (1984), Food Engineering Fundamentals, John Wiley and sons, Inc.
- Brennan, J.G., Butters, J.R., Cowell, N.D., and Lilly, A.E.V. (1990) Food Engineering Operations, 3rd ed. Elsevier Science Publishing Co., New York.
- Carslaw H.S., J.C. Jaeger. (1959), Conduction of Heat in Solids. Second edition. Oxford at the Clarendon Press.
- Charm, Stanley E., (1978), Fundamentals of Food Engineering, AVI Publishing Co., Westport, Connecticut.
- Cruess. W.V. (1958), Commercial Fruit and Vegetable Products. Fourth edition. McGraw-Hill Book Company, INC. New York Toronto London.
- Daniels, Farrington, Robert A. Alberty. (1957). Physical Chemistry. Fourth edition. John Wiley & Sons. Inc. New York, London.
- Desrosier, N.W., J.N. Desrosier. (1977), The Technology of Food Preservation. Fourth edition. AVI Publishing Company, INC. Westport, Connecticut.
- Doolittle Jesse S. (1964). Thermodynamics for Engineers. Second edition. International Text-book Company Scranton, Pennsylvania.
- Eckert, E.R.G. , Robert M. Drake, Jr. (1959) Heat and Mass Transfer. Second edition. McGraw-Hill Book Company, INC. New York, Toronto.

- El-Sahrigi, Ahmed F., (1981), Thermodynamic Properties of Steam, and Transient Heat Transfer Charts. Faculty of Agriculture, Ain Shams University.
- Farrall Arthur W. (1976), Food Engineering Systems, Vol. 1. AVI Publ. Co., Westport, Connecticut.
- Farrall Arthur W. (1979), Food Engineering Systems, Vol. 2. AVI Publ. Co., Westport, Connecticut.
- Foust, A.S., L.A. Wenzel, C.W. Clump, L.Maus and L.B. Andersen. (1960), Principles of Unit Operations. New York, John Wiley & Sons, INC. London.
- Harper John C. (1976), Elements of Food Engineering. The AVI Publishing Company, INC., Westport, Connecticut.
- Heldman, Dennis R., and R. Paul Singh, (1980), Food Process Engineering, Second Edition, AVI Publishing Co., Westport, Conn.
- Henderson S.M. & R.L. Perry. (1976), Agricultural Process Engineering Third edition. The AVI Publishing Company, INC Westport. Connecticut.
- Joslyn, Maynard A., and J.H. Heid, (1963), Food Processing Operations, Vol. I., AVI Publishing Co., Westport, Connecticut.
- Mayhew, Y.R., and G.F.C.Rogers, (1974), Thermodynamic and Transport Properties of Fluids. S.I. Units, Second Edition, Oxford Basil Blackwell.
- Schwartzberg, Henery G., and M.A.Rao (1990), Editors, Biotechnology and Food Process Engineering. IFT Basic Symposium Series, Marcel Dekker, Inc., New York and Basel.
- Toledo, Romeo T.,(1991), Fundamentals of Food Process Engineering, 2nd ed. Van Nostrand Reinhold, New York.

- Treybal Robert E. (1955), Chemical Engineering Series. McGraw-Hill Book Company, Inc. New York, Toronto London.
- Van Arsdel, W.B., Copley, M.J. and Morgan, A.J., Jr. (1973), Food Dehydration, 2nd Edition, Vol. 1 and 2. AVI Publishing Co., Westport, Conn.
- Watson, E. L., and Harper, J. C. (1988). Elements of Food Engineering, 2nd ed. Van Nostrand Reinhold, New York .
- Zemansky Mark W. (1957), Heat and Thermodynamics. McGraw-Hill Book company, INC. New York Toronto London.

ثانيا : المراجع العربيه :

- أ.د. أحمد فريد السهرجي (١٩٦٨ ، ١٩٨٠)
مذكرات هندسة التصنيع الزراعى .
كلية الزراعة / جامعة عين شمس
- أ.د. صلاح الدين محمود النبوى ، أ.د. يوسف امين والى ، أ.د. أحمد فريد السهرجي ، أ.د. عادل سعد الدين عبد القادر ، أ.د. أحمد أحمد جويلى ، أ.د. يحيى محمد حسن (١٩٧٠).
الحاصلات البستانيه إعدادها وانضاجها وتخزينها وتصديرها .
دار المعارف بمصر .
- أ.د. محمود مصطفى غنيم (١٩٦٤ ، ١٩٦٧)
الهندسه الحراريه جزء أول ، ثانى .
مطبعة المعارف - القاهره .

الملاحق Appendices

ملحق رقم (١)

جداول التحويل للوحدات

Tables of Conversion Units

Some Useful Conversion Factors

To Convert from	to	Multiply by
Acceleration		
ft/s ²	m/s ²	$3.048\ 000 \times 10^{-1}$
Standard gravity	m/s ²	9.806 650
Standard gravity	ft/s ²	$3.217\ 405 \times 10^1$
m/s ²	ft/s ²	3.280 840
Area		
acre	m ²	$4.046\ 856 \times 10^3$
acre	ft ²	$4.356\ 000 \times 10^4$
ft ²	m ²	$9.290\ 304 \times 10^{-2}$
m ²	ft ²	$1.076\ 391 \times 10^1$
cm ²	m ²	$1.000\ 000 \times 10^{-4}$
ft ²	in. ²	$1.440\ 000 \times 10^2$
in. ²	m ²	$6.451\ 600 \times 10^{-4}$
Energy		
Btu (international)	kJ	1.055 056
Btu	kcal	$2.519\ 958 \times 10^{-1}$
kcal	kJ	4.186 800
kW - h	kJ	$3.600\ 000 \times 10^{-3}$
kW - h	Btu	3.413×10^3
hp - h	Btu	2.545×10^3
J	ergs	$1.000\ 000 \times 10^7$
Btu	ft-lbf	$7.781\ 963 \times 10^2$
ft - lbf	kJ	$1.355\ 818 \times 10^{-3}$
Energy per Unit Mass		
Btu/lbm	kJ/kg	2.326 000
Force		
lbf	N	4.448 222

(Continued)

To Convert from	to	Multiply by
Length		
angstrom	m	$1.000\ 000 \times 10^{-10}$
caliber	m	$2.540\ 000 \times 10^{-4}$
fathom	m	1.828 800
ft	m	$3.048\ 000 \times 10^{-1}$
inch	m	$2.540\ 000 \times 10^{-2}$
mile	m	$1.609\ 344 \times 10^3$
mile	ft	5.280×10^3
yard	m	$9.144\ 000 \times 10^{-1}$
Mass		
carat	kg	$2.000\ 000 \times 10^{-4}$
grain	kg	$6.479\ 891 \times 10^{-5}$
lbm	kg	$4.535\ 924 \times 10^{-1}$
kg	lbm	2.204 622
kg	slug	$6.852\ 1 \times 10^{-2}$
slug	lbm	$3.217\ 405 \times 10^1$
ton	lbm	2.000×10^3
ton	kg	$9.071\ 847 \times 10^2$
Mass per Unit Volume (density)		
lbm/ft ³	kg/m ³	$1.601\ 846 \times 10^1$
lbm/in. ³	kg/m ³	$2.767\ 990 \times 10^4$
lbm/gal	kg/m ³	$1.198\ 264 \times 10^2$
Power		
Btu/h	W (watt)	$2.930\ 711 \times 10^{-1}$
J/s	W	1.000 000
erg/s	W	$1.000\ 000 \times 10^{-7}$
ft - lbf/s	W	1.355 818
hp	W	$7.456\ 999 \times 10^2$
hp	ft - lbf/s	5.50×10^2
hp	ft - lbf/min	3.3000×10^4
hp (boiler)	Btu/h	$3.347\ 14 \times 10^4$
hp (hoiler)	kW	9.809 50

(Continued)

To Convert from	to	Multiply by
Pressure		
std atm	kPa	$1.013\ 25 \times 10^2$
std atm	lbf/in. ²	$1.469\ 6 \times 10^1$
cm Hg (0°C)	kPa	1.333 22
in. Hg (32°F)	kPa	3.386 389
in. H ₂ O (60°F)	kPa	$2.488\ 4 \times 10^{-1}$
bar	kPa	$1.000\ 000 \times 10^2$
bar	lbf/in. ²	$1.450\ 377 \times 10^1$
lbf/in. ²	kPa	6.894 757
in. Hg (32°F)	lbf/in. ²	$4.911\ 542 \times 10^{-1}$
ft H ₂ O (60°F)	lbf/in. ²	$4.330\ 943 \times 10^{-1}$
ft H ₂ O (60°F)	kPa	2.986 08
dyne/cm ²	kPa	$1.000\ 000 \times 10^{-4}$
Specific Heat		
Btu/lbm. °F	kJ/kg. K	4.186 800
cal/g. °C	Btu/lbm. °F	1.000 000
Thermal Conductivity		
Btu/ft · h · °F	W/m · K	1.730 6
Btu · in./ft ² · h · °F	W/m · K	1.442×10^{-2}
cal/cm · h · °C	Btu/ft · h · °F	$6.719\ 69 \times 10^{-2}$
Thermal Conductance		
Btu/ft ² · h · °F	W/m ² · K	5.674 466
Temperature		
°C	K	$T\ K = T\ ^\circ C + 273.15$
°F	°R	$T\ ^\circ R = T\ ^\circ F + 459.67$
K	°R	$T\ ^\circ R = T\ K \times 1.8$
°C	°F	$T\ ^\circ F = (T\ ^\circ C + 273.15) \times 1.8 - 459.67$
°F	°C	$T\ ^\circ C = (T\ ^\circ F + 459.67) / 1.8 - 273.15$
Time		
day	s	$8.640\ 999 \times 10^4$
hour	s	$3.600\ 000 \times 10^3$
year	s	$3.153\ 600 \times 10^7$
Velocity		
ft/s	m/s	$3.048\ 888 \times 10^{-1}$
miles/h	km/h	1.609 344
knot	m/s	$5.144\ 444 \times 10^{-1}$

(Continued)

To Convert from	to	Multiply by
Viscosity		
centipoise	Pa . s	$1.000\ 000 \times 10^{-3}$
centistokes	m^2/s	$1.000\ 000 \times 10^{-6}$
lbm/ft . s	Pa . s	1.488 164
lbf . s/ft ²	Pa . s	$4.788\ 026 \times 10^1$
lbf . s/ft ²	lbm/ft . s	$3.217\ 4 \times 10^1$
Volume		
acre . ft	m ³	$1.233\ 483 \times 10^3$
barrel (42 gal)	m ³	$1.589\ 873 \times 10^{-1}$
ft ³	m ³	$2.831\ 685 \times 10^{-2}$
ft ³	in. ³	$1.728\ 000 \times 10^3$
in. ³	m ³	$1.638\ 706 \times 10^{-5}$
ft ³	gallons	7.480 52
liter	m ³	$1.000\ 000 \times 10^{-3}$
gallons	liter	3.785 412
gallons	m ³	$3.785\ 412 \times 10^{-3}$
gallons	ft ³	$1.336\ 81 \times 10^{-1}$
quart (U.S. liquid)	m ³	$9.463\ 529 \times 10^{-4}$
pint (U.S. liquid)	liter	$4.731\ 765 \times 10^{-1}$

Source: Batty and Folkman (1984).

ملحق رقم (٢)

جداول البخار

Steam Tables

Thermodynamic Properties of Steam

The following symbols and units of measurement are used in tables:

i	$\frac{\text{kcal}}{\text{kg}}$	enthalpy.
i'	$\frac{\text{kcal}}{\text{kg}}$	enthalpy of boiling water.
i''	$\frac{\text{kcal}}{\text{kg}}$	enthalpy of dry saturated steam.
$P_{\text{ata}} = \text{kg/cm}^2$		pressure.
L	$\frac{\text{kcal}}{\text{kg}}$	evaporation heat.
t	$^{\circ}\text{C}$	temperature.
t_s	$^{\circ}\text{C}$	temperature of saturation.
T	K	temperature absolute.
v	$\frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$	specific volume.
v'	$\frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$	specific volume of boiling water.
v''	$\frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$	specific volume of dry saturated steam.

P	t	v'	v	l'	l''	L
kg/cm ²	°C	m ³ /kg	m ³ /kg	kcal/kg	kcal/kg	kcal/kg
0.010	6.698	0.0010001	131.6	6.73	600.2	593.5
0.015	12.737	0.0010006	80.63	12.78	602.9	590.1
0.020	17.204	0.0010013	68.25	17.25	604.9	587.6
0.025	20.776	0.0010020	55.27	20.82	606.4	585.6
0.030	23.772	0.0010027	46.52	23.81	607.8	584.0
0.035	26.359	0.0010034	40.22	26.39	608.9	582.5
0.040	28.641	0.0010040	35.46	28.67	609.8	581.1
0.045	30.69	0.0010046	31.71	30.71	610.7	580.0
0.050	32.55	0.0010052	28.72	32.57	611.5	578.9
0.055	34.25	0.0010058	26.26	34.27	612.3	578.0
0.060	35.82	0.0010063	24.19	35.83	612.9	577.1
0.065	37.29	0.0010069	22.43	37.30	613.6	576.3
0.070	38.66	0.0010074	20.91	38.67	614.1	575.4
0.075	39.95	0.0010079	19.59	39.96	614.7	574.7
0.080	41.16	0.0010084	18.45	41.16	615.2	574.0
0.085	42.32	0.0010088	17.41	42.32	615.7	573.4
0.090	43.41	0.0010093	16.50	43.41	616.1	572.7
0.095	44.46	0.0010097	15.68	44.46	616.6	572.1
0.10	45.45	0.0010101	14.95	45.45	617.0	571.6
0.11	47.33	0.0010109	13.66	47.32	617.8	570.5
0.12	49.06	0.0010117	12.59	49.05	618.6	569.5
0.13	50.67	0.0010124	11.67	50.66	619.3	568.6
0.14	52.18	0.0010131	10.89	52.17	619.9	567.7
0.15	53.60	0.0010138	10.20	53.59	620.5	566.9
0.16	54.94	0.0010145	9.603	54.93	621.1	566.2
0.17	56.21	0.0010151	9.073	56.19	621.6	565.4
0.18	57.41	0.0010157	8.601	57.39	622.1	564.7
0.19	58.57	0.0010163	8.172	58.55	622.6	564.0
0.20	59.67	0.0010169	7.789	59.65	623.1	563.4
0.21	60.72	0.0010175	7.442	60.70	623.5	562.8
0.22	61.74	0.0010181	7.122	61.72	623.9	562.2
0.23	62.71	0.0010186	6.833	62.69	624.3	561.6
0.24	63.65	0.0010191	6.565	63.63	624.6	561.0
0.25	64.56	0.0010196	6.318	64.54	625.0	560.5
0.26	65.44	0.0010202	6.088	65.42	625.4	560.0
0.27	66.29	0.0010206	5.876	66.27	625.7	559.4
0.28	67.11	0.0010211	5.679	67.09	626.1	559.0
0.29	67.91	0.0010216	5.495	67.89	626.4	558.5
0.30	68.68	0.0010220	5.324	68.66	626.8	558.1

(continued)

P	t	v'	v	i'	i''	L
kg/cm ²	°C	m ³ /kg	m ³ /kg	kcal/kg	kcal/kg	kcal/kg
0.32	70.16	0.0010229	5.013	70.14	627.4	557.3
0.34	71.57	0.0010237	4.736	71.56	627.9	556.3
0.36	72.91	0.0010245	4.489	72.90	628.5	555.6
0.38	74.19	0.0010253	4.267	74.18	629.0	554.8
0.40	75.42	0.0010261	4.066	75.41	629.5	554.1
0.45	78.27	0.0010279	3.641	78.27	630.6	552.3
0.50	80.86	0.0010296	3.299	80.86	631.6	550.7
0.55	83.25	0.0010312	3.017	83.26	632.6	549.3
0.60	85.45	0.0010327	2.782	85.47	633.5	548.0
0.65	87.51	0.0010341	2.581	87.54	634.3	546.8
0.70	89.45	0.0010355	2.408	89.49	635.1	545.6
0.75	91.27	0.0010360	2.257	91.32	635.8	544.5
0.80	92.99	0.0010381	2.125	93.05	636.4	543.3
0.85	94.62	0.0010393	2.008	94.69	637.0	542.3
0.90	96.18	0.0010405	1.903	96.26	637.6	541.3
0.95	97.66	0.0010417	1.810	97.75	638.2	540.4
1.0	99.09	0.0010428	1.725	99.19	638.8	539.6
1.1	101.76	0.0010448	1.578	101.87	639.8	537.9
1.2	104.25	0.0010468	1.455	104.38	640.7	536.3
1.3	106.56	0.0010487	1.350	106.72	641.6	534.3
1.4	108.74	0.0010505	1.259	108.92	642.3	533.4
1.5	110.79	0.0010522	1.181	110.99	643.1	532.1
1.6	112.73	0.0010538	1.111	112.95	643.8	530.8
1.7	114.57	0.0010554	1.050	114.81	644.5	529.7
1.8	116.33	0.0010570	0.9954	116.60	645.1	528.5
1.9	118.01	0.0010585	0.9462	118.30	645.7	527.4
2.0	119.62	0.0010600	0.9018	119.94	646.3	526.4
2.1	121.16	0.0010614	0.8616	121.5	646.8	525.3
2.2	122.65	0.0010627	0.8248	123.0	647.3	524.3
2.3	124.08	0.0010640	0.7912	124.5	647.8	523.3
2.4	125.46	0.0010653	0.7603	125.9	648.3	522.4
2.5	126.79	0.0010666	0.7318	127.2	648.7	521.5
2.6	128.08	0.0010678	0.7055	128.5	649.2	520.7
2.7	129.34	0.0010691	0.6808	129.8	649.6	519.8
2.8	130.55	0.0010703	0.6581	131.1	650.0	518.9
2.9	131.73	0.0010714	0.6368	132.3	650.3	518.0

(continued)

P	t	v'	v''	i'	i''	L
kg/cm ²	°C	m ³ /kg	m ³ /kg	kcal/kg	kcal/kg	kcal/kg
3.0	132.88	0.0010726	0.6169	133.4	650.7	517.3
3.1	134.00	0.0010737	0.5982	134.6	651.1	516.5
3.2	135.08	0.0010748	0.5807	135.7	651.4	515.7
3.3	136.14	0.0010758	0.5645	136.8	651.8	515.0
3.4	137.18	0.0010769	0.5465	137.8	652.1	514.3
3.5	138.19	0.0010779	0.5338	138.9	652.4	513.5
3.6	139.18	0.0010789	0.5199	139.9	652.7	512.8
3.7	140.15	0.0010800	0.5066	140.9	653.0	512.1
3.8	141.09	0.0010809	0.4942	141.8	653.3	511.5
3.9	142.02	0.0010819	0.4822	142.8	653.6	510.8
4.0	142.92	0.0010829	0.4709	143.7	653.9	510.2
4.1	143.81	0.0010838	0.4601	144.6	654.1	509.5
4.2	144.68	0.0010847	0.4498	145.5	654.4	508.9
4.3	145.54	0.0010857	0.4399	146.4	654.7	508.3
4.4	146.38	0.0010866	0.4305	147.3	654.9	507.6
4.5	147.20	0.0010875	0.4215	148.1	655.2	507.1
4.6	148.01	0.0010884	0.4129	149.0	655.4	506.5
4.7	148.81	0.0010893	0.4045	149.8	655.6	505.8
4.8	149.59	0.0010902	0.3966	150.6	655.9	505.3
4.9	150.36	0.0010910	0.3890	151.4	656.1	504.7
5.0	151.11	0.0010918	0.3817	152.1	656.3	504.2
5.2	152.59	0.0010935	0.3679	153.7	656.7	503.0
5.4	154.02	0.0010951	0.3550	155.1	657.1	502.0
5.6	155.41	0.0010967	0.3431	156.6	657.5	500.9
5.8	156.76	0.0010983	0.3319	158.0	657.9	499.9
6.0	158.08	0.0010998	0.3214	159.3	658.3	498.9
6.2	159.36	0.0011013	0.3116	160.7	658.6	497.9
6.4	160.61	0.0011028	0.3024	162.0	659.0	497.0
6.6	161.82	0.0011043	0.2938	163.2	659.3	496.1
6.8	163.01	0.0011057	0.2856	164.5	659.6	495.1
7.0	164.17	0.0011071	0.2778	165.7	659.9	494.2
7.2	165.31	0.0011085	0.2705	166.9	660.2	493.3
7.4	166.42	0.0011099	0.2636	168.0	660.4	492.4
7.6	167.51	0.0011113	0.2570	169.2	660.7	491.5
7.8	168.57	0.0011126	0.2507	170.3	661.0	490.7
8.0	169.61	0.0011139	0.2448	171.4	661.2	489.8
8.2	170.63	0.0011152	0.2391	172.4	661.4	489.0
8.4	171.63	0.0011165	0.2337	173.4	661.7	488.3
8.6	172.61	0.0011177	0.2286	174.5	661.9	487.4
8.8	173.58	0.0011189	0.2236	175.5	662.1	486.6

(continued)

P	t	v'	v''	i'	i''	L
kg/cm ²	°C	m ³ /kg	m ³ /kg	kcal/kg	kcal/kg	kcal/kg
12.5	188.92	0.0011399	0.1599	191.7	665.3	473.6
13.0	190.71	0.0011426	0.1540	193.6	665.6	472.0
13.5	192.45	0.0011451	0.1485	195.5	665.9	470.4
14.0	194.13	0.0011476	0.1434	197.3	666.2	468.9
14.5	195.77	0.0011501	0.1387	199.1	666.4	467.4
15.0	197.36	0.0011525	0.1342	200.7	666.7	465.9
15.5	198.91	0.0011548	0.1300	202.4	666.9	464.5
16.0	200.43	0.0011572	0.1261	204.0	667.1	463.1
16.5	201.91	0.0011595	0.1224	205.6	667.3	461.7
17.0	203.35	0.0011618	0.1189	207.2	667.5	460.3
17.5	204.76	0.0011640	0.1156	208.7	667.7	459.0
18.0	206.14	0.0011662	0.1125	210.2	667.7	457.6
18.5	207.49	0.0011684	0.1095	211.7	668.0	456.3
19.0	208.81	0.0011706	0.1067	213.1	668.2	455.1
19.5	210.11	0.0011728	0.1040	214.5	668.3	453.8
20.0	211.38	0.0011749	0.1015	215.9	668.5	452.6
20.5	212.63	0.0011771	0.09907	217.3	668.6	451.3
21.0	213.85	0.0011792	0.09676	218.6	668.7	450.1
21.5	215.05	0.0011813	0.09456	220.0	668.8	448.8
22.0	216.23	0.0011833	0.09245	221.2	668.9	447.7
22.5	217.39	0.0011854	0.09042	222.5	668.9	446.4
23.0	218.53	0.0011874	0.08849	223.8	669.0	445.2
23.5	219.65	0.0011894	0.08663	225.0	669.1	444.1
24.0	220.75	0.0011914	0.08486	226.2	669.2	443.0
24.5	221.83	0.0011933	0.08316	227.4	669.2	441.8
25.0	222.90	0.0011953	0.08150	228.6	669.3	440.7
25.5	223.95	0.0011973	0.07991	229.8	669.3	439.5
26.0	224.99	0.0011992	0.07838	230.9	669.4	438.5
26.5	226.01	0.0012011	0.07692	232.1	669.4	437.3
27.0	227.01	0.0012030	0.07551	233.2	669.4	436.2
27.5	228.00	0.0012048	0.07414	234.3	669.5	435.2
28.0	228.98	0.0012067	0.07282	235.4	669.5	434.1
28.5	229.94	0.0012086	0.07155	236.5	669.5	433.0
29.0	230.89	0.0012105	0.07032	237.5	669.5	432.0
29.5	231.83	0.0012122	0.06913	238.6	669.6	431.0
30	232.76	0.0012142	0.06797	239.6	669.6	430.0
31	234.57	0.0012178	0.06578	241.7	669.6	427.9
32	236.35	0.0012215	0.06370	243.7	669.6	425.9
33	238.08	0.0012251	0.06176	245.6	669.6	423.9
34	239.77	0.0012286	0.05995	247.6	669.5	421.9

(continued)

P	t	v'	v''	i'	i''	L
kg/cm ²	°C	m ³ /kg	m ³ /kg	kcal/kg	kcal/kg	kcal/kg
35	241.42	0.0012321	0.05819	249.5	669.5	420.0
36	243.04	0.0012356	0.05654	251.3	669.4	418.1
37	244.62	0.0012391	0.05499	253.1	669.3	416.2
38	246.17	0.0012425	0.05352	254.9	669.2	414.3
39	247.69	0.0012459	0.05211	256.7	669.2	412.5
40	249.18	0.0012493	0.05077	258.4	669.0	410.6
41	250.64	0.0012527	0.04950	260.1	668.9	408.8
42	252.07	0.0012561	0.04829	261.8	668.8	407.0
43	253.48	0.0012594	0.04713	263.4	668.7	405.3
44	254.87	0.0012628	0.04601	265.0	668.5	403.5
45	256.23	0.0012661	0.04495	266.6	668.4	401.8
46	257.56	0.0012694	0.04394	268.2	668.2	400.0
47	258.88	0.0012727	0.04296	269.8	668.0	398.2
48	260.17	0.0012759	0.04203	271.3	667.9	396.6
49	261.45	0.0012792	0.04112	272.8	667.7	394.9
50	262.70	0.0012825	0.04026	274.3	667.5	393.2
51	263.93	0.0012857	0.03943	275.8	667.4	391.6
52	265.15	0.0012890	0.03863	277.2	667.2	390.0
53	266.35	0.0012922	0.03785	278.7	667.0	388.3
54	267.53	0.0012954	0.03711	280.1	666.7	386.6
55	268.69	0.0012986	0.03639	281.5	666.6	385.1
56	269.84	0.0013018	0.03569	282.9	666.3	383.4
57	270.98	0.0013051	0.03502	284.3	666.1	381.8
58	272.10	0.0013083	0.03437	285.6	665.9	380.3
59	273.20	0.0013115	0.03374	287.0	665.6	378.6
60	274.29	0.0013147	0.03313	288.3	665.4	377.1
61	275.37	0.0013179	0.03255	289.7	665.1	375.4
62	276.43	0.0013211	0.03197	291.0	664.8	373.8
63	277.48	0.0013243	0.03142	292.3	664.6	372.3
64	278.51	0.0013275	0.03089	293.6	664.3	370.8
65	279.54	0.0013306	0.03036	294.8	664.0	369.2
66	280.55	0.0013338	0.02986	296.1	663.7	367.6
67	281.55	0.0013370	0.02937	297.3	663.5	366.2
68	282.54	0.0013402	0.02889	298.6	663.2	364.6
69	283.52	0.0013434	0.02843	299.8	662.9	363.1

(continued)

P	t	v'	v''	l'	l''	L
kg/cm ²	°C	m ³ /kg	m ³ /kg	kcal/kg	kcal/kg	kcal/kg
70	284.48	0.0013466	0.02798	301.0	662.6	361.6
71	285.44	0.0013498	0.02754	302.3	662.2	359.9
72	286.39	0.0013530	0.02711	303.5	661.9	358.4
73	287.32	0.0013561	0.02669	304.6	661.6	356.9
74	288.25	0.0013593	0.02629	305.8	661.3	355.5
75	289.17	0.0013626	0.02589	307.0	661.0	354.0
76	290.08	0.0013658	0.02550	308.2	660.7	352.0
77	290.97	0.0013690	0.02513	309.4	660.3	351.0
78	291.86	0.0013722	0.02476	310.5	660.0	349.5
79	292.75	0.0013755	0.02440	311.7	659.7	348.0
80	293.62	0.0013787	0.02405	312.8	659.3	346.5
81	294.48	0.0013819	0.02372	313.9	659.0	345.1
82	295.34	0.0013852	0.02338	315.0	658.6	343.6
83	296.19	0.0013885	0.02305	316.2	658.3	342.1
84	297.03	0.0013917	0.02273	317.3	657.9	340.6
85	297.86	0.0013950	0.02243	318.4	657.6	339.2
86	298.69	0.0013983	0.02212	319.5	657.2	337.7
87	299.51	0.0014016	0.02182	320.6	656.8	336.2
88	300.32	0.0014049	0.02153	321.6	656.5	334.8
89	301.12	0.0014082	0.02124	322.7	656.1	333.4
90	301.92	0.0014115	0.02096	323.8	655.7	331.9
91	302.71	0.0014148	0.02069	324.9	655.3	330.4
92	303.49	0.0014181	0.02042	325.9	655.0	329.1
93	304.27	0.0014215	0.02016	327.0	654.6	327.6
94	305.04	0.0014249	0.01990	328.0	654.2	326.2
95	305.80	0.0014282	0.01965	329.1	653.8	324.7
96	306.56	0.0014316	0.01940	330.1	653.3	323.2
97	307.31	0.0014350	0.01916	331.2	652.9	321.8
98	308.06	0.0014384	0.01892	332.2	652.5	320.3
99	308.80	0.0014418	0.01869	332.2	652.1	318.9
100	309.53	0.0014453	0.01846	334.2	651.7	317.5
102	310.98	0.0014522	0.01802	336.3	650.8	314.5
104	312.41	0.0014591	0.01759	338.3	650.0	311.7
106	313.82	0.0014662	0.01717	340.3	649.1	308.8
108	315.21	0.0014733	0.01677	342.3	648.1	305.8
110	316.58	0.001480	0.01638	344.2	647.2	303.0
112	317.93	0.001488	0.01601	346.2	646.3	300.1
114	319.26	0.001495	0.01565	348.2	645.3	297.2
116	320.57	0.001502	0.01530	350.1	644.4	294.3
118	321.87	0.001510	0.01496	352.0	643.5	291.5

(continued)

P	t	v'	v''	i'	i''	L
kg/cm ²	°C	m ³ /kg	m ³ /kg	kcal/kg	kcal/kg	kcal/kg
120	323.15	0.001517	0.01463	353.9	642.5	288.6
122	324.41	0.001525	0.01432	355.8	641.4	285.6
124	325.65	0.001533	0.01401	357.7	640.4	282.7
126	326.88	0.001541	0.01371	359.6	639.4	279.8
128	328.10	0.001549	0.01341	361.5	638.3	276.8
130	329.30	0.001557	0.01313	363.4	637.2	273.8
132	330.48	0.001565	0.01286	365.2	636.2	271.0
134	331.65	0.001574	0.01259	367.1	635.1	268.0
136	332.81	0.001582	0.01233	369.0	634.0	265.0
138	333.96	0.001591	0.01207	370.8	632.8	262.0
140	335.09	0.001600	0.01182	372.7	631.7	259.0
142	336.21	0.001608	0.01159	374.5	630.5	256.0
144	337.31	0.001617	0.01134	376.4	629.4	253.0
146	338.40	0.001625	0.01111	378.2	628.1	249.9
148	339.49	0.001635	0.01088	380.1	626.9	246.8
150	340.56	0.001644	0.01066	381.9	625.6	243.7
152	341.61	0.001653	0.01045	383.7	624.3	240.6
154	342.66	0.001663	0.01024	385.6	623.0	237.4
156	343.70	0.001673	0.01003	387.4	621.6	234.2
158	344.72	0.001683	0.009826	389.3	620.3	231.0
160	345.74	0.001693	0.009625	391.1	618.9	227.8
162	346.74	0.001704	0.009431	392.9	617.5	224.5
164	347.74	0.001715	0.009237	394.8	616.0	221.2
166	348.72	0.001726	0.009048	396.7	614.5	217.8
168	349.70	0.001737	0.008862	398.6	613.0	214.4
170	350.66	0.001748	0.008681	400.4	611.5	211.1
172	351.62	0.001760	0.008501	402.3	609.8	207.5
174	352.56	0.001772	0.008325	404.2	608.2	204.0
176	353.50	0.001785	0.008150	406.2	606.5	200.3
178	345.43	0.001798	0.007974	408.1	604.7	196.6
180	355.35	0.001812	0.007803	410.1	602.8	192.7
182	356.26	0.001826	0.007633	412.2	600.9	188.7
184	357.16	0.001840	0.007466	414.2	599.0	184.8
186	358.06	0.001856	0.007300	416.2	597.1	180.9
188	358.94	0.001873	0.007138	418.2	595.1	176.9
190	359.82	0.001890	0.00697	420.4	593.0	172.6
192	360.69	0.001906	0.00682	422.3	591.0	168.7
194	361.55	0.001923	0.00666	424.4	588.9	164.5
196	362.40	0.001942	0.00650	426.6	586.6	160.0
198	363.25	0.001963	0.00634	428.9	584.0	155.1

(continued)

P	t	v'	v''	i'	i''	L
kg/cm ²	°C	m ³ /kg	m ³ /kg	kcal/kg	kcal/kg	kcal/kg
200	364.08	0.001987	0.00618	431.3	581.4	150.1
202	364.91	0.00201	0.00601	433.8	578.5	144.7
204	365.74	0.00204	0.00585	436.4	575.6	139.2
206	366.55	0.00207	0.00568	438.9	572.6	133.6
208	367.36	0.00210	0.00552	441.7	569.4	127.7
210	368.16	0.00213	0.00535	444.5	565.9	121.4
212	368.95	0.00217	0.00517	447.6	562.2	114.6
214	369.74	0.00221	0.00499	450.8	558.2	107.4
216	370.51	0.00226	0.00481	454.2	553.8	99.6
218	371.29	0.00231	0.00462	458.6	548.2	89.6
220	372.1	0.00238	0.00436	463.0	542.3	79.3
222	372.8	0.00247	0.00412	468.0	535.4	67.3
224	373.6	0.00267	0.00373	479.0	520.7	45.7

Source : El-Sahrgi (1986).

أساسيات هندسة التصنيع الزراعي

P	1.0		2.0		3.0	
	ts=99.09 i"=638.8 v" = 1.725		ts=119.62 i"=646.3 v" = 0.9018		ts=132.88 i"=650.7 v" = 0.6119	
t	v	i	v	i	v	i
100	1.730	639.2				
110	1.781	644.2				
120	1.830	649.0	0.9027	646.5		
130	1.878	653.7	0.9291	651.5		
140	1.926	658.4	0.9545	656.5	0.6296	654.5
150	1.975	663.0	0.9795	661.5	0.6472	659.7
160	2.023	667.8	1.003	666.4	0.6643	664.7
170	2.071	672.5	1.028	671.2	0.6810	669.6
180	2.119	677.2	1.052	675.9	0.6975	674.5
190	2.166	681.9	1.077	680.6	0.7140	679.3
200	2.214	686.6	1.101	685.4	0.7304	684.2
210	2.262	691.3	1.125	690.2	0.7468	689.0
220	2.310	696.0	1.149	695.0	0.7631	693.9
230	2.357	700.7	1.173	699.7	0.7793	698.7
240	2.405	705.5	1.197	704.5	0.7956	703.6
250	2.452	710.2	1.221	709.3	0.8119	708.4
260	2.500	714.9	1.245	714.1	0.8281	713.2
270	2.547	719.7	1.269	719.0	0.8442	718.1
280	2.595	724.5	1.293	723.8	0.8603	723.0
290	2.642	729.2	1.317	728.6	0.8763	727.9
300	2.690	734.0	1.341	733.4	0.8923	732.7
310	2.737	738.8	1.365	738.3	0.9083	737.6
320	2.784	743.6	1.389	743.1	0.9243	742.5
330	2.832	748.4	1.413	748.0	0.9403	747.5
340	2.880	753.2	1.437	753.0	0.9562	752.5
350	2.927	758.0	1.461	757.9	0.9722	757.4
360	2.975	762.9	1.485	762.8	0.9881	762.3
370	3.022	767.8	1.509	767.8	1.004	767.3
380	3.068	772.7	1.532	772.7	1.020	772.2
390	3.115	777.6	1.556	777.6	1.036	777.2
400	3.163	782.6	1.579	782.6	1.052	782.2
410	3.210	787.6	1.602	787.6	1.068	787.2
420	3.257	792.6	1.626	792.6	1.083	792.2
430	3.304	797.6	1.650	797.6	1.099	797.3
440	3.352	802.6	1.673	802.6	1.115	802.3
450	3.399	807.6	1.697	807.6	1.131	807.3
460	3.446	812.6	1.721	812.6	1.147	812.3
470	3.493	817.7	1.744	817.7	1.163	817.4
480	3.540	822.8	1.768	822.8	1.179	822.5
490	3.587	827.9	1.792	827.9	1.194	827.6

(continued)

P	4.0		5.0		6.0	
	ts =142.92 i"=653.9 v" = 0.4709		ts =151.11 i" =656.3 v" = 0.3817		ts=158.08 i"=658.3 v" = 0.3214	
t	v	i	v	i	v	i
150	0.4806	657.9				
160	0.4940	663.1	0.3917	661.3	0.3232	659.4
170	0.5070	668.2	0.4024	666.6	0.3326	664.8
180	0.5197	673.2	0.4129	671.7	0.3416	670.1
190	0.5323	678.1	0.4232	676.7	0.3504	675.4
200	0.5448	683.0	0.4334	681.7	0.3591	680.6
210	0.5573	687.9	0.4436	686.7	0.3677	685.7
220	0.5697	692.8	0.4537	691.7	0.3763	690.7
230	0.5821	697.7	0.4637	696.6	0.3848	695.7
240	0.5944	702.6	0.4736	701.6	0.3932	700.7
250	0.6067	707.5	0.4836	706.6	0.4016	705.7
260	0.6190	712.4	0.4935	711.5	0.4099	710.7
270	0.6312	717.3	0.5033	716.5	0.4181	715.7
280	0.6433	722.2	0.5131	721.5	0.4264	720.7
290	0.6555	727.1	0.5229	726.4	0.4346	725.7
300	0.6676	732.1	0.5327	731.4	0.4428	730.7
310	0.6796	737.1	0.5424	736.4	0.4509	735.8
320	0.6917	742.0	0.5521	741.4	0.4591	740.8
330	0.7037	746.9	0.5618	746.4	0.4672	745.8
340	0.7158	751.9	0.5715	751.4	0.4753	750.9
350	0.7278	756.9	0.5812	756.4	0.4834	755.9
360	0.7398	761.8	0.5908	761.4	0.4915	760.9
370	0.7518	766.8	0.6005	766.4	0.4996	766.0
380	0.7637	771.8	0.6101	771.4	0.5077	771.0
390	0.7756	776.8	0.6197	776.4	0.5157	776.0
400	0.7875	781.8	0.6294	781.5	0.5237	781.1
410	0.7995	786.8	0.6390	786.5	0.5318	786.1
420	0.8114	791.8	0.6485	791.5	0.5398	791.1
430	0.8233	796.9	0.6581	796.6	0.5478	796.2
440	0.8352	802.0	0.6676	801.7	0.5558	801.3
450	0.8471	807.1	0.6772	806.7	0.5637	806.4
460	0.8590	812.1	0.6867	811.7	0.5717	811.5
470	0.8709	817.2	0.6963	816.8	0.5797	816.6
480	0.8828	822.3	0.7058	821.9	0.5876	821.7
490	0.9418	827.4	0.7153	827.0	0.5956	826.8
500	0.9066	832.5	0.7248	832.1	0.6036	831.9
510	0.9185	837.6	0.7344	837.2	0.6115	837.0
520	0.9304	842.8	0.7439	842.4	0.6194	842.2
530	0.9423	848.0	0.7535	847.6	0.6273	847.4
540	0.9542	853.2	0.7629	852.8	0.6352	852.6

(continued)

P	7.0		8.0		9.0	
	$t_s = 164.17 \quad i'' = 659.9$ $v'' = 0.2778$		$t_s = 169.61 \quad i'' = 661.2$ $v'' = 0.2448$		$t_s = 174.53 \quad i'' = 662.3$ $v'' = 0.2189$	
t	v	i	v	i	v	i
170	0.2827	663.2	0.2450	661.5		
180	0.2906	668.8	0.2524	667.3	0.2226	665.5
190	0.2983	674.2	0.2594	672.8	0.2291	671.3
200	0.3059	679.4	0.2662	678.2	0.2353	676.8
210	0.3134	684.6	0.2729	683.5	0.2413	682.2
220	0.3209	689.7	0.2795	688.7	0.2472	687.5
230	0.3283	694.7	0.2860	693.8	0.2531	692.7
240	0.3356	699.8	0.2925	699.0	0.2589	698.0
250	0.3429	704.9	0.2990	704.1	0.2647	703.2
260	0.3501	709.9	0.3054	709.2	0.2704	708.4
270	0.3573	715.0	0.3117	714.3	0.2761	713.5
280	0.3644	720.0	0.3180	719.4	0.2818	718.6
290	0.3715	725.0	0.3242	724.4	0.2874	723.6
300	0.3785	730.1	0.3305	729.4	0.2930	728.7
310	0.3856	735.2	0.3367	734.5	0.2985	733.9
320	0.3926	740.2	0.3429	739.5	0.3040	739.0
330	0.3996	745.2	0.3490	744.6	0.3095	744.1
340	0.4066	750.3	0.3552	749.8	0.3150	749.2
350	0.4136	755.3	0.3613	754.9	0.3205	754.3
360	0.4206	760.3	0.3674	760.0	0.3260	759.4
370	0.4276	765.4	0.3735	765.1	0.3315	764.6
380	0.4345	770.5	0.3796	770.1	0.3369	769.7
390	0.4414	775.5	0.3857	775.2	0.3423	774.8
400	0.4483	780.6	0.3918	780.3	0.3477	779.9
410	0.4552	785.7	0.3978	785.4	0.3532	785.0
420	0.4621	790.8	0.4039	790.5	0.3586	790.1
430	0.4690	795.9	0.4099	795.6	0.3639	795.2
440	0.4759	801.0	0.4159	800.6	0.3693	800.3
450	0.4827	806.1	0.4219	805.7	0.3747	805.4
460	0.4896	811.2	0.4280	810.8	0.3800	810.5
470	0.4964	816.3	0.4340	815.9	0.3854	815.6
480	0.5033	821.4	0.4400	821.0	0.3907	820.8
490	0.5101	826.5	0.4460	826.2	0.3961	826.0
500	0.5169	831.7	0.4519	831.4	0.4014	831.2
510	0.5238	836.8	0.4579	836.6	0.4068	836.4
520	0.5306	842.0	0.4639	841.8	0.4121	841.6
530	0.5374	847.2	0.4699	847.0	0.4174	846.8
540	0.5442	852.4	0.4759	852.2	0.4227	852.0

(continued)

P	10.0		12.0		14.0	
	ts =179.04 i"=663.3 v" = 0.1980		ts =187.08 i"=664.9 v" = 0.1663		ts =194.13 i"=666.2 v" = 0.1434	
t	v	i	v	i	v	i
180	0.1987	663.8				
190	0.2046	669.7	0.1678	666.7		
200	0.2103	675.4	0.1728	672.9	0.1460	670.0
210	0.2159	681.0	0.1777	678.8	0.1505	676.3
220	0.2214	686.5	0.1825	684.5	0.1547	682.3
230	0.2268	691.9	0.1872	690.0	0.1588	688.0
240	0.2321	697.2	0.1918	695.3	0.1629	693.5
250	0.2374	702.4	0.1963	700.6	0.1669	698.9
260	0.2426	707.6	0.2007	705.9	0.1708	704.2
270	0.2477	712.7	0.2051	711.2	0.1746	709.4
280	0.2529	717.8	0.2095	716.4	0.1784	714.6
290	0.2580	722.9	0.2138	721.5	0.1822	719.8
300	0.2630	728.0	0.2181	726.7	0.1859	725.1
310	0.2681	733.2	0.2223	731.9	0.1896	730.5
320	0.2731	738.4	0.2265	737.1	0.1933	735.8
330	0.2780	743.5	0.2306	742.3	0.1969	741.1
340	0.2829	748.7	0.2348	747.6	0.2005	746.4
350	0.2879	753.8	0.2390	752.8	0.2041	751.7
360	0.2929	758.9	0.2432	757.9	0.2077	756.9
370	0.2979	764.1	0.2474	763.1	0.2114	762.2
380	0.3028	769.2	0.2515	768.3	0.2150	767.4
390	0.3077	774.3	0.2557	773.5	0.2185	772.6
400	0.3126	779.5	0.2598	778.7	0.2220	777.9
410	0.3174	784.6	0.2638	783.8	0.2256	783.3
420	0.3223	789.7	0.2679	788.9	0.2291	788.3
430	0.3272	794.8	0.2720	794.1	0.2326	793.5
440	0.3320	799.9	0.2761	799.3	0.2361	798.7
450	0.3369	805.1	0.2801	804.5	0.2396	803.9
460	0.3417	810.2	0.2842	809.7	0.2431	809.1
470	0.3465	815.3	0.2882	814.9	0.2466	814.3
480	0.3513	820.5	0.2922	820.1	0.2501	819.5
490	0.3561	825.7	0.2962	825.3	0.2536	824.7
500	0.3609	830.9	0.3003	830.5	0.2570	829.9
510	0.3658	836.1	0.3044	835.7	0.2605	835.1
520	0.3706	841.3	0.3084	840.9	0.2639	840.3
530	0.3754	846.5	0.3124	846.1	0.2674	845.5
540	0.3802	851.7	0.3164	851.3	0.2709	850.7

(continued)

P	16.0		18.0		20.0	
	ts =200.43 i" =667.1 v" = 0.1261		ts =206.14 i" =667.8 v" = 0.1125		ts =211.38 i" =668.5 v" = 0.1015	
t	v	i	v	i	v	i
210	0.1300	673.5	0.1138	670.4		
220	0.1338	679.9	0.1175	677.0	0.1043	674.4
230	0.1375	685.8	0.1209	683.3	0.1077	681.0
240	0.1411	691.4	0.1242	689.3	0.1108	687.2
250	0.1447	696.9	0.1275	695.0	0.1138	693.1
260	0.1482	702.3	0.1307	700.6	0.1168	698.9
270	0.1517	707.8	0.1338	706.2	0.1198	704.6
280	0.1551	713.2	0.1369	711.8	0.1225	710.2
290	0.1585	718.6	0.1400	717.3	0.1253	715.8
300	0.1618	724.0	0.1430	722.8	0.1281	721.3
310	0.1651	729.4	0.1460	728.2	0.1308	726.9
320	0.1683	734.7	0.1490	733.6	0.1334	732.4
330	0.1715	740.0	0.1519	738.9	0.1360	737.9
340	0.1747	745.4	0.1548	744.3	0.1386	743.4
350	0.1779	750.7	0.1577	749.7	0.1412	748.8
360	0.1811	756.0	0.1605	755.0	0.1438	754.1
370	0.1843	761.3	0.1633	760.3	0.1465	759.4
380	0.1875	766.6	0.1661	765.6	0.1491	764.8
390	0.1906	771.8	0.1689	770.9	0.1516	770.1
400	0.1937	777.1	0.1717	776.2	0.1542	775.5
410	0.1969	782.3	0.1745	781.5	0.1567	780.8
420	0.2000	787.5	0.1773	786.7	0.1592	786.1
430	0.2031	792.8	0.1801	792.0	0.1617	791.4
440	0.2062	798.0	0.1829	797.3	0.1642	796.6
450	0.2092	803.2	0.1856	802.5	0.1667	801.9
460	0.2123	808.4	0.1884	807.7	0.1692	807.1
470	0.2154	813.6	0.1911	812.9	0.1717	812.4
480	0.2184	818.8	0.1938	818.2	0.1741	817.7
490	0.2215	824.1	0.1965	823.5	0.1765	823.0
500	0.2245	829.4	0.1992	828.8	0.1790	828.3
510	0.2276	834.6	0.2020	834.0	0.1815	833.5
520	0.2306	839.8	0.2047	839.3	0.1840	838.8
530	0.2336	845.0	0.2074	844.6	0.1864	844.1
540	0.2367	850.3	0.2101	849.9	0.1888	849.4
550	0.2398	855.6	0.2129	855.2	0.1913	854.7
560	0.2429	860.9	0.2156	860.5	0.1938	860.0
570	0.2459	866.2	0.2183	865.8	0.1963	865.3
580	0.2489	871.5	0.2210	871.1	0.1987	870.6
590	0.2519	876.8	0.2237	876.4	0.2011	875.9

ملحق رقم (٢)

جداول معامل انتقال الحرارة
بالتوصيل لبعض المواد الصلبة غير الغذائية
والمواد الغذائية

**Thermal Conductivity Tables of Some Solid
non-food materials and foodstuffs**

جدول معامل انتقال الحرارة بالتوصيل لبعض المواد الصلبة غير الغذائية*:

المادة	درجة الحرارة (°م)	الكثافة (كجم/متر ³)	الحرارة النوعية (ك جول/كجم.كلفن)	معامل انتقال الحرارة بالتوصيل (وات/متر.كلفن)
<u>المعادن</u>				
النيوم	٢٠	٢٧٠٧	٠.٨٩٦	٢٠.٣
نحاس اصفر	٢٠	٨٥٢٢	٠.٣٨٥	٩٨
حديد زهر	٢٠	٧٥٩٣	٠.٤٦٥	٥٤
نحاس	٢٠	٨٩٥٤	٠.٣٨٣	٣٨٦
رصاص	٢٠	١١٣٧	٠.١٣٠	٣٥
فولاذ ١/ كربون	٢٠	٨٧٠١	٠.٤٧٣	٤٥
فولاذ لا يصدأ ٣٠٨	٢٠	٨٧٤٩	٠.٤٦١	١٥
فولاذ لا يصدأ ٣٠٤	صفر	٧٨١٧	٠.٤٦١	١٤
قصدير	٢٠	٧٣٠٤	٠.٢٢٧	٦١
<u>المواد العازلة</u>				
اسبستوس	٣٧.٨	٥٧٧	-	٠.١٦٨
لوح ملين	٣٠.٠	١٦٠	-	٠.٠٤٣٣
لوح نيفي عازل	٢١.٠	٢٣٧	-	٠.٠٤٨
صوف الزجاج	٣٧.٨	٦٤.١	-	٠.٠٤٦٤
رغوة البوليسترين	صفر	٢٤	-	٠.٠٣٦٤
رغوة البولي يورثين	صفر	٣٢	-	٠.٠٣٦
<u>مواد البناء</u>				
طوب البناء	٢٠	-	-	٠.٦٩٠
خرسانة حجري	٢١	٢٣٠٧	٠.٨٣٧	٠.٩٣٥
رجاج البواقد	٢١	٢٧٢٣	٠.٨٣٧	٠.٧٧٩
خشب البلوط الحبيبي	٢١	٨١٧	٢.٣٨٦	٠.٢٠٨
(متعامد على الالياف)				
خشب البلوط الحبيبي	٢١	٨١٧	٢.٣٨٦	٠.٣٤٦
(موازي مع الالياف)				
خشب الصنوبر الحبيبي	٢١	٤٩٧	٢.٨٠٥	٠.١٠٤
(متعامد على الالياف)				
خشب الصنوبر الحبيبي	٢١	٤٩٧	٢.٨٠٥	٠.٢٤٢
(موازي مع الالياف)				

* المصدر: أ.د. أحمد فريد السهرجي (١٩٨٦)

الملاحق

جدول معامل انتقال الحرارة بالتوصيل لبعض المواد الغذائية *

المنتج	المحتوى الرطوبي (%)	درجة الحرارة (°م)	معامل انتقال الحرارة بالتوصيل (وات/متر.كلفن)
تفاح	٨٥.٦	٢٦:٢	٠.٢٩٢
صلصة تفاح	٧٨.٨	٢٦:٢	٠.٥١٦
لحم بقرى مجفف			
-عند ضغط ١٠٠٠ ملم زئبق	-	صفر	٠.٠٦٥
-عند ضغط ١٠٠٠٠ ملم زئبق	-	صفر	٠.٠٣٧
لحم بقرى خالص			
-متعامد على الالياف	٧٨.٩٠	٧	٠.٤٧٦
-متعامد على الالياف	٧٨.٩٠	٦٢	٠.٤٨٥
-موازي للالياف	٧٨.٧٠	٨	٠.٤٣١
-موازي للالياف	٧٨.٧٠	٦١	٠.٤٤٧
دهن لحم بقرى	-	٢٨:٢٤	٠.١٩٠
زبد	١٥.٠	٤٦	٠.١٩٧
سمك القد	٨٣.٠	٢.٨	٠.٥٤٤
زبد صفراء	٠.٩١	٥٢:٨	٠.١٤١
	٣٠.٢٠	٥٢:٨	٠.١٧٢
بيض كامل مجمد	-	٦-:١٠-	٠.٩٧٠
بياض البيض	-	٢٦	٠.٥٧٧
سفار البيض	-	٢٢	٠.٣٢٨
بضلة السمك	-	صفر: ١٠	٠.٥٥٧
يمنون هندي كامل	-	٣٠	٠.٤٥٠
نسل	١٢.٦٠	٢	٠.٥٠٢
	٨.٠٠	٢	٠.٣٤٤
	١٤.٨٠	٦٩	٠.٦٢٣
	٨.٠٠	٦٩	٠.٤١٥
صير تفاح	٨٧.٤٠	٢٠	٠.٥٥٩
	٨٧.٤٠	٨٠	٠.٦٢٢
	٣٦.٠	٢٠	٠.٣٨٩
	٣٦.٠	٨٠	٠.٤٣٦

المنتج	المحتوى الرطوبي (/)	درجة الحرارة (°م)	معامل انتقال الحرارة بالتوصيل (وات/متر.كلفن)
لحم ضاني			
-متعامد على الالياف	٧٨ . ٨٠	٥	٠ . ٤٥٠
		٦١	٠ . ٤٧٨
-موازي للالياف	-	٥	٠ . ٤٦٥
	٩٠ . ٩٠	٦١	٠ . ٤٢٢
حليب	-	٢٧	٠ . ٥٣٠
حليب مكثف	٩٠ . ٩٠	٢٤	٠ . ٥٧١
		٧٨	٠ . ٦٤١
	٥٠ . ٥٠	٢٦	٠ . ٣٢٩
	-	٧٨	٠ . ٣٦٤
حليب مقشود	-	١٠٠	٠ . ٥٣٨
	-	٨٠	٠ . ٦٣٥
حليب مجفف خالي من الدهن	٤٠ . ٢٠	٢٩	٠ . ٤١٩
زيت الزيتون	-	١٥	٠ . ١٨٩
	-	١٠٠	٠ . ١٦٣
برتقال ، مختلط	-	٣٠	٠ . ٤٣١
حيات البسلة ذات نقط سوداء	-	١٧ : ٢	٠ . ٣١٢
لحم خنزير			
-متعامد على الالياف	٧٥ . ١٠	٦	٠ . ٤٨٨
-موازي للالياف	-	٦٠	٠ . ٤٥٠
	-	٤	٠ . ٤٤٣
		٦١	٠ . ٤٨٩
دهن خنزير	-	٢٥	٠ . ١٥٢
بطاطس ، خام	٨١ . ٥٠	٢٢ : ١	٠ . ٥٥٤
بطاطس ، جل نشوي	-	٦٧ : ١	٠ . ٠٤٠

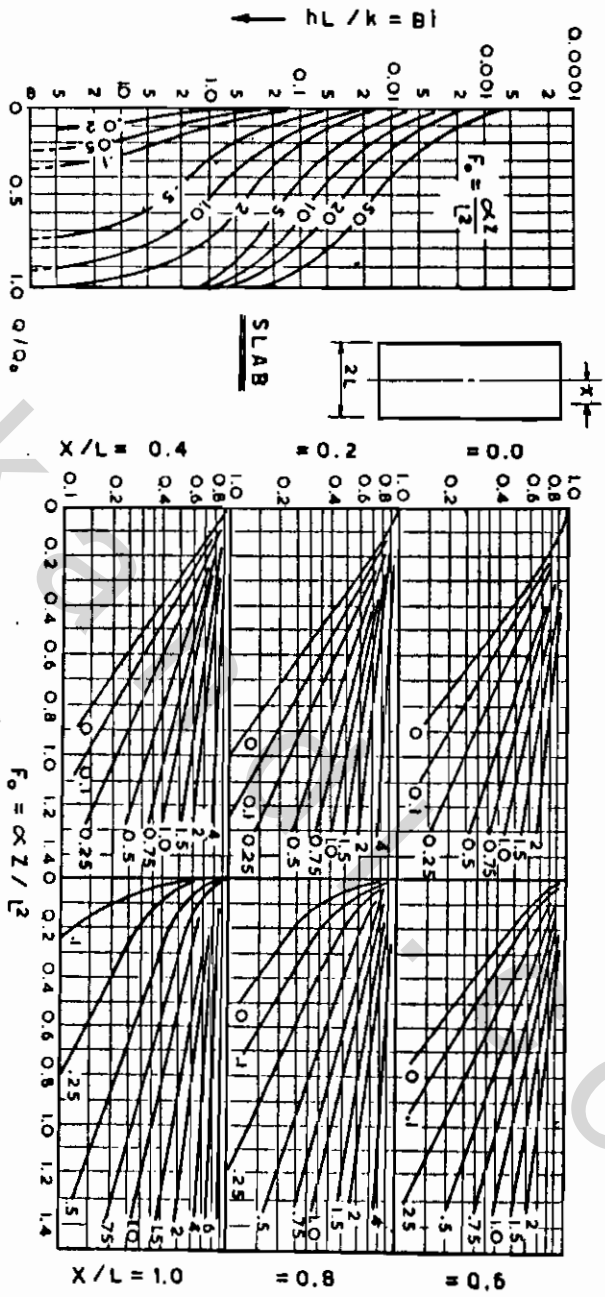
تابع ماقبله ٢.

المنتج	المحتوى الرطوبي (/)	درجة الحرارة (°م)	معامل انتقال الحرارة بالتوصيل (وات/متر كلغ/م)
طيور داجنة، عضلات ساخنه	٧٤ ٩:٦٩ ١	٢٧ ٤	٤١٢ .
سمك السلمون			
-متعامد على الالياف	٧٢ .	٤	٥٠٢ .
ملح	-	٨٧	٢٤٧ .
خليط النقائق	٦٤ ٧٢	٢٤	٤٠٧ .
زيت فول الصويا	١٣ ٢٠	١٠٠٧	٦٩ .
فراوله	-	٢٥ ٤-	٦٧٥ .
سكريات	-	٦٢ ٢٩	٢٢٠٠٠٨٧ .
ديك رومي ، صدر			
متعامد على الالياف	٧٤ .	٣	٥٠٢ .
موازي للالياف	٧٤ .	٣	٥٢٣ .
لحم عجل			
متعامد على الالياف	٧٥ .	٦	٤٧٦ .
موازي للالياف		٦٢	٤٨٩ .
	٧٥ .	٥	٤٤١ .
		٦٠	٤٥٢ .
زيوت نباتيه وحيوانيه	-	١٨٧ ٤	١٦٩ .
دقيق القمح	٨ ٨٠		٤٥٠ .
		٦٥ ٥	٦٨٩ .
		١٠٧	٥٤٢ .
مصل اللبن (شرش)	-	٨٠	٦٤١ .

* المصدر (1981) Heldman and Singh

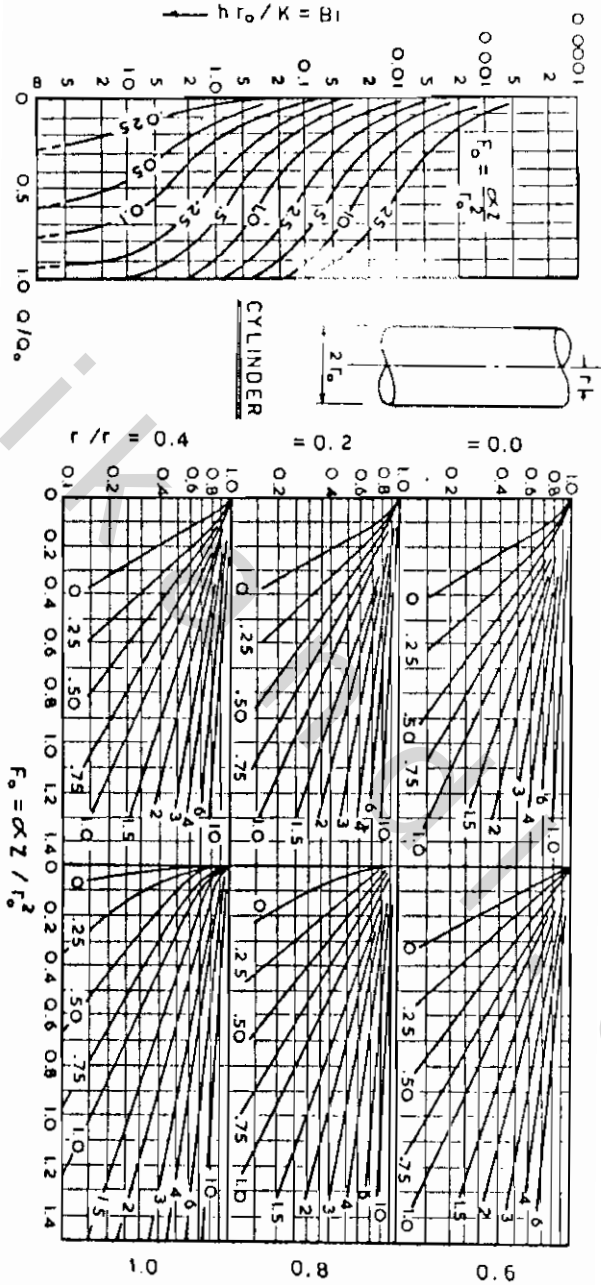
ملحق رقم (٤)

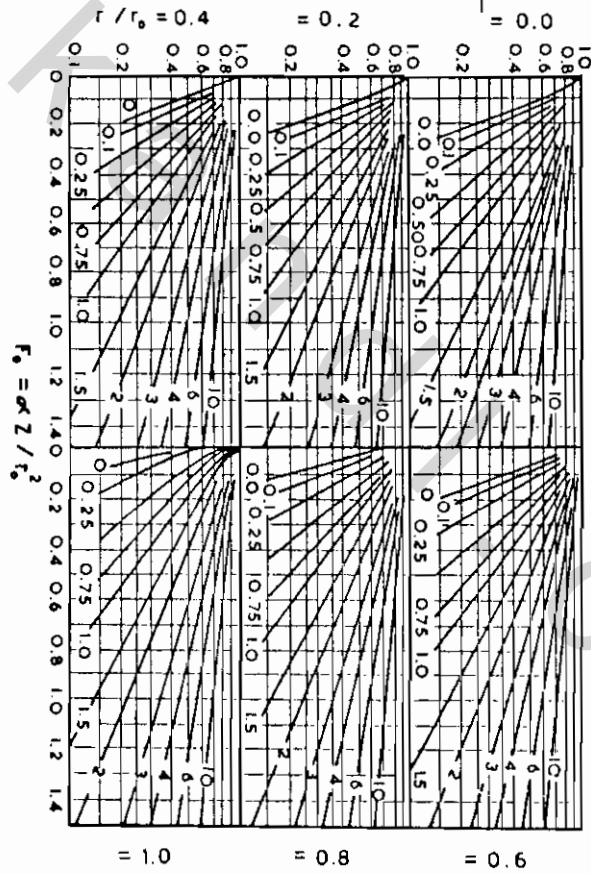
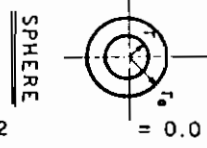
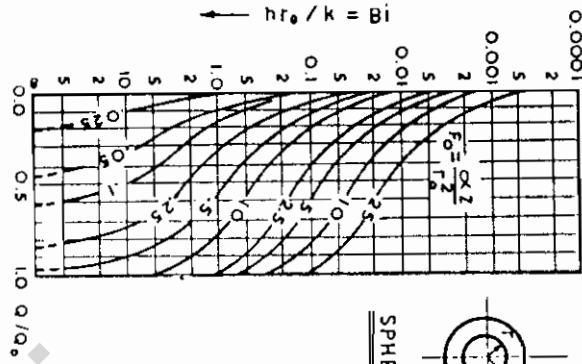
خرائط انتقال الحرارة غير المستقر
Transient Heat Transfer Charts



TEMPERATURE DISTRIBUTION AND HEAT TRANSFER FLOW IN SLAB, CYL. AND SPHERE

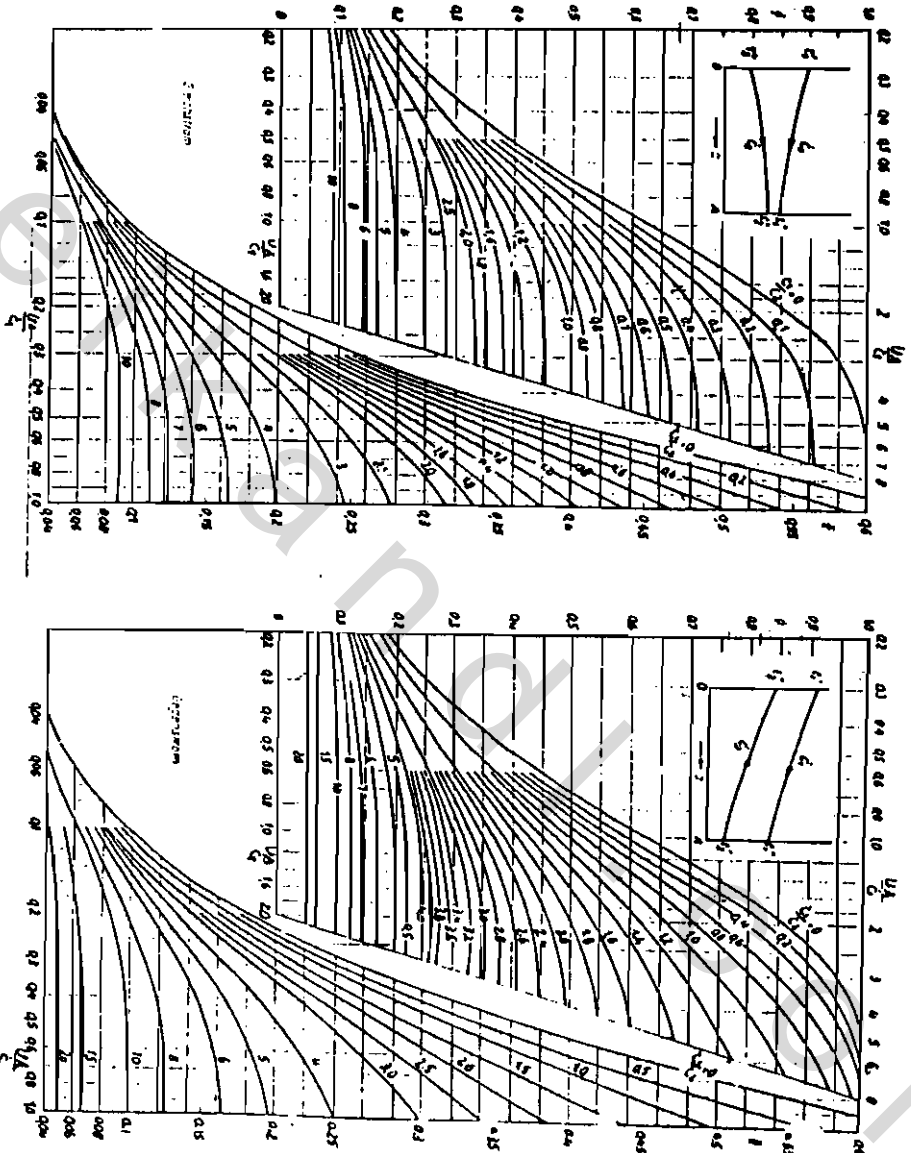
Source : Eckert and Drake (1959)





ملحق رقم (٥)

خرائط التبادل الحرارى
Heat Exchange Charts

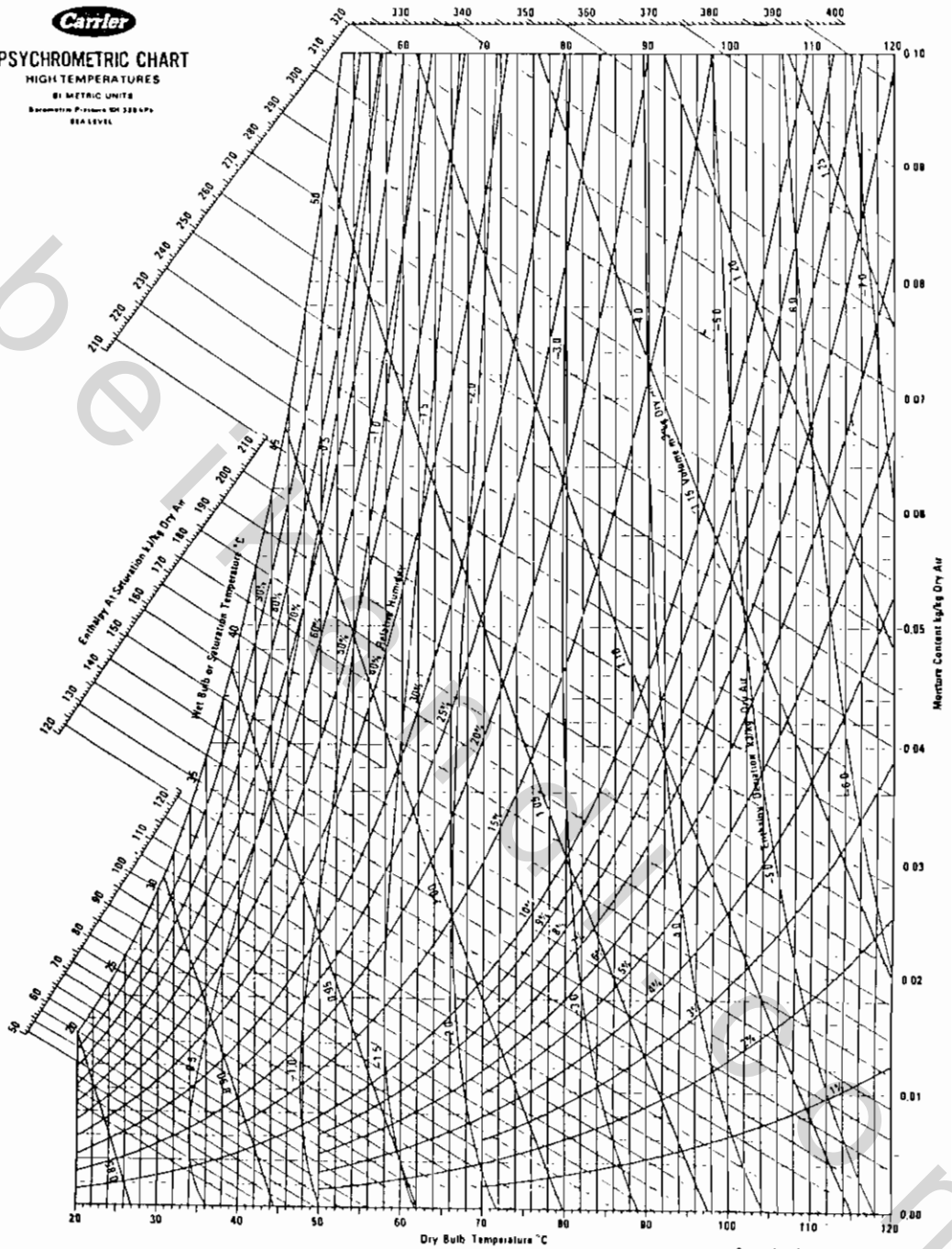


Source : Eckert and Drake (1959)

ملحق رقم (٦)

الخريطة السيكرومترية
Psychrometric Chart

Carrier
PSYCHROMETRIC CHART
HIGH TEMPERATURES
 BY METRIC UNITS
 Barometric Pressure 1013.25 hPa
 SEA LEVEL



PSYCHROMETRIC CHART

Copyright © Carrier Corporation 1975
 Cat. No. 794 005 Printed in U.S.A.

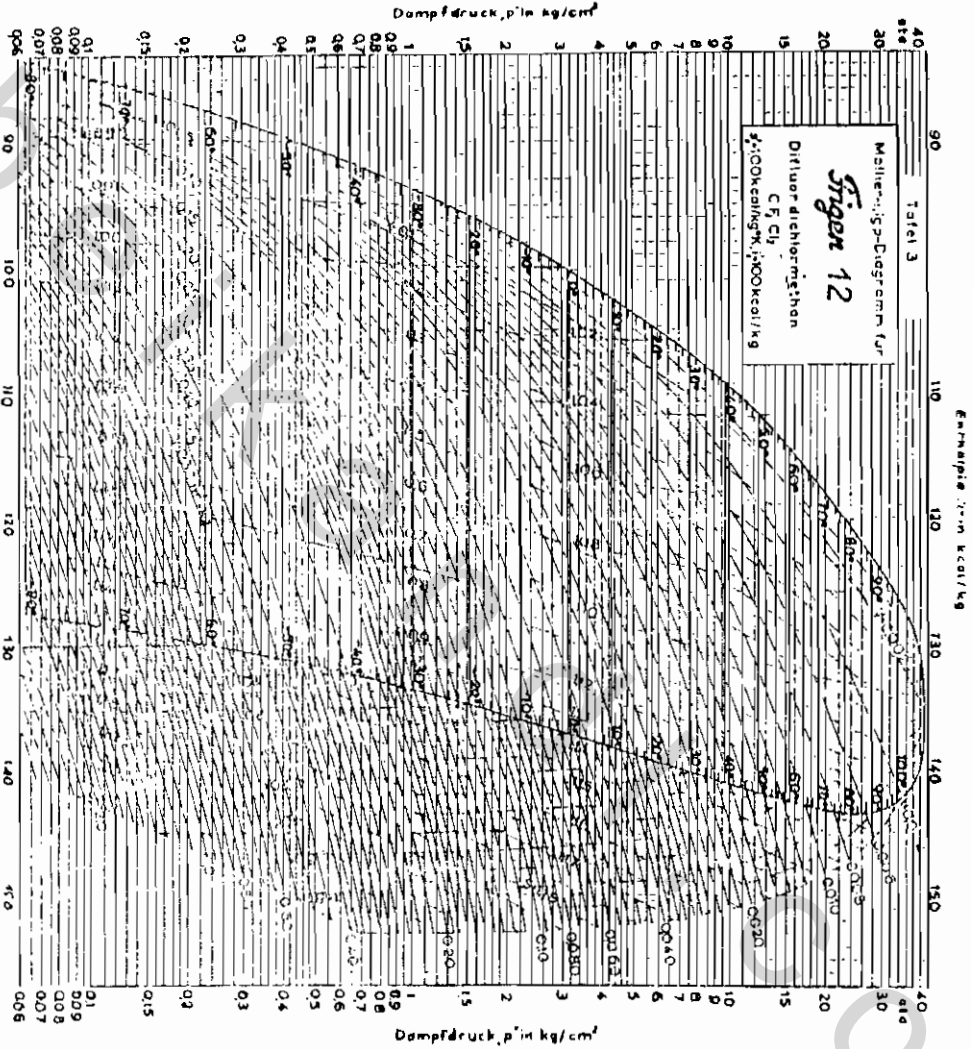
Source : Copyright Carrier Corporation (1975)

ملحق رقم (٧)

خرائط موائع التبريد

Charts of Fluid Refrigerants





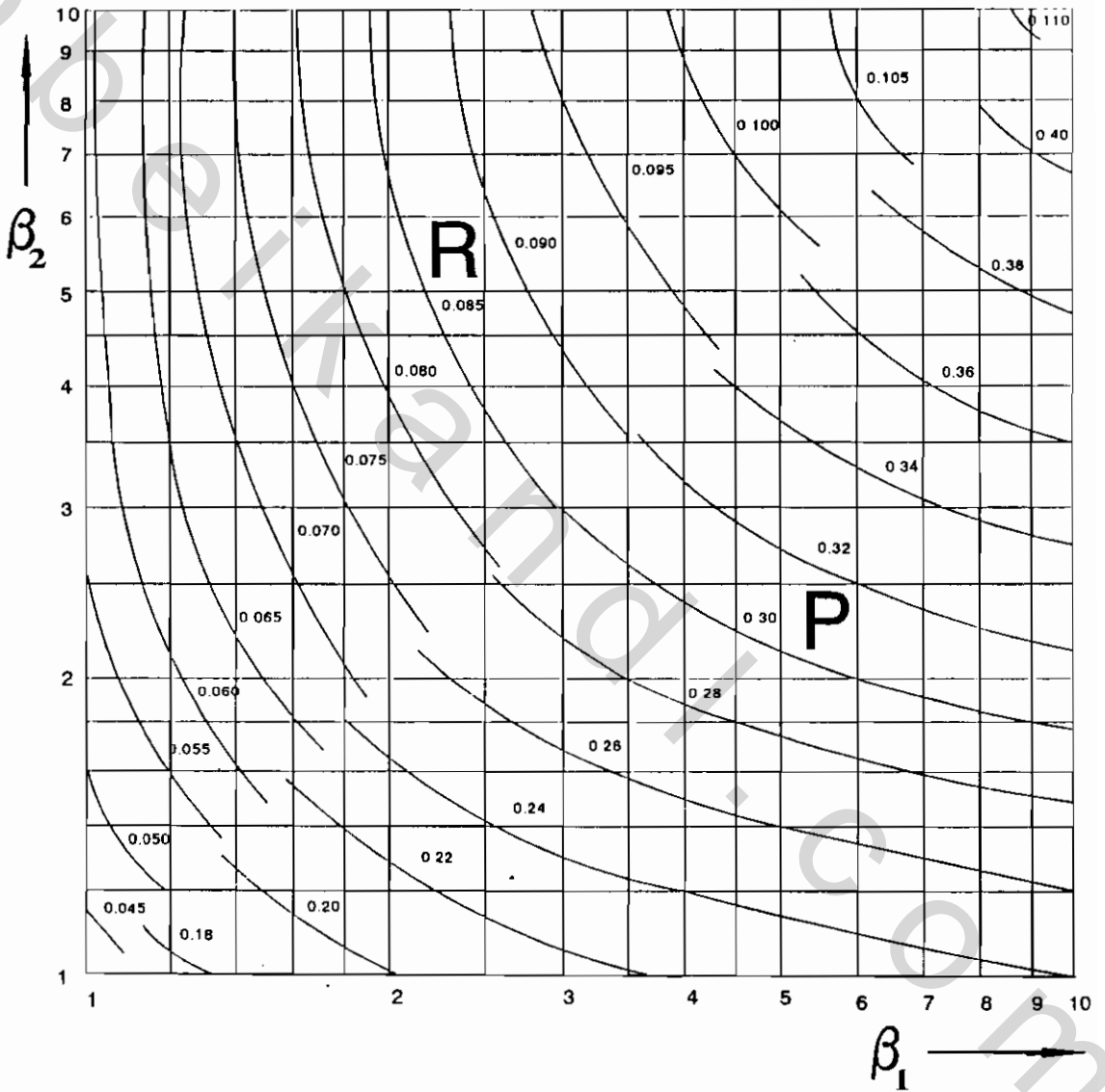
Source : Refrigeration Charts, Collage of Engineering, Alexandria University, (1990).



ملحق رقم (٨)

خريطة ثوابت بلانك للتجميد

Chart For Constants Of Plank Freezing Equation



Source : Cited from Heldman and Singh (1981)

ملحق رقم (٩)

قائمة الرموز المستخدمة

List of Symbols

قائمة الرموز المستخدمة

A	=	مساحة مقطع او مساحة سطح
a	=	مساحة ، طول ، ثابت
B.H.P	=	القدرة الفرمليه للمحرك
B.T.U	=	وحدة حراريه بريطانيه
C	=	السرعه المتوسطة للجزيئات ، ثابت
C _p	=	الحراره النوعيه تحت ضغط ثابت
C _s	=	معامل التغير فى طاقة الحركة
C _v	=	الحراره النوعيه تحت حجم ثابت
C _y	=	معامل الطول الاضافى (زيادة الطول)
C.O.P	=	معامل اداء مضخة الحراره أو الثلاجة
D	=	القطر
d	=	القطر ، السمك ، علامة التفاضل
D.B.T	=	درجة الحراره الجافه
E	=	الطاقه ، معامل المرونه (معامل يانج)
e	=	نسبة الاشعاع الحرارى للجسم
F	=	القوه ، القوه الناتجه عن الاحتكاك
f _c	=	معامل الاحتكاك
Gr _e	=	رقم رينولدز العام
Gr	=	رقم جراسوف
g	=	عجلة الجاذبيه الأرضيه
g _c	=	ثابت الجاذبيه الأرضيه
H	=	الانثالبى او المحتوى الحرارى
ΔH	=	التغير الكلى فى الانثالبى
HP	=	القدرة الحصانيه
h	=	معامل انتقال الحراره بالحمل ، الانثالبى النوعى ، مقدار الرفع الكلى
h _f	=	الفقد فى الرفع
h _r	=	معامل انتقال الحراره بالأشعاع
h _s	=	الرفع الاستاتيكي

i	=	الحرارة الكلية
$i_{D\&S}$	=	الحرارة الكلية لوحدة وزنيه من البخار الجاف والمشييع
$i_{S/H}$	=	الحرارة الكلية لوحدة وزنيه من البخار المحمص
i_{Wet}	=	الحرارة الكلية لوحدة وزنيه من البخار الرطب
K	=	درجة كلفن ، معامل القوام ، ثابت التجفيف فى معادلة Page
KE	=	الطاقة الكينيتيكية
k	=	معامل انتقال الحرارة بالتوصيل أو الرمز للكيلو
L	=	الطول ، المسافه ، الحرارة الكامنه للانصهار ، الحرارة الكامنه للتبخر ، الحرارة الكامنه للتجميد
l	=	الطول
M	=	الوزن الجزيئى ، المحتوى الرطوبى للمادة على الاساس الجاف
M_c	=	المحتوى الرطوبى الحرج
M_e	=	المحتوى الرطوبى الاتزانى (المتوازن)
M_o	=	المحتوى الرطوبى الابتدائى
MR	=	معدل التجفيف
m	=	الكتله ، عدد الجزيئات فى وحدة الكتله ، المحتوى الرطوبى على الاساس الرطب ، المولاليه
$\dot{m}$	=	المعدل الوزنى للسريان (معدل سريان الكتله)
N	=	عدد جزيئات الغاز فى وحدة الحجم ، سرعة الدوران ، ثابت تجريبى فى معادلة Page
n	=	عدد لفات عمود الإدارة فى وحدة الزمن ، دليل سلوك السريان ، اس منحنى الانضغاط والتمدد فى الإجراء البوليتروپى
Nu	=	رقم نوسيلت
P	=	الضغط المطلق للغاز ، الضغط البخارى ، ثابت فى معادلة بلانك
p	=	الضغط الجزيئى للغاز
ΔP	=	الفرق فى الضغط
PE	=	طاقة الوضع
P_r	=	رقم براندل
Q	=	كمية الحرارة اللازمه لتسخين الهواء ، معدل انتقال الحرارة
R	=	الثابت النوعى للغاز ، ثابت فى معادلة بلانك
Re	=	رقم رينولدز
RH	=	الرطوبه النسبيه
R_o	=	الثابت العام للغازات

$^{\circ}R$	=	درجة رانكن
r	=	نصف القطر
S	=	الانتروپى النوعى
ds	=	التغير فى الانتروپى
SI	=	النظام الدولى
T	=	درجة الحرارة المطلقة
t	=	الوقت ، درجة الحرارة
t_{sat}	=	درجة حرارة التشبع
Δt_m	=	الفرق المتوسط فى درجات الحرارة
Δt_{lm}	=	المتوسط اللوغاريتمى للفرق فى درجات الحرارة
U	=	الطاقة الداخليه ، المعامل الكلى المكافئ لانتقال الحرارة
u	=	الطاقة الداخليه النوعيه
Δu	=	التغير فى الطاقة الداخليه
V	=	السرعه ، السرعه المتوسطه للسريان ، الحجم المولى للغاز
V	=	معدل السريان الحجمى
v	=	الحجم النوعى ، الحجم الرطب
W	=	الشغل ، كمية الرطوبه المزاله فى وحدة الزمن ، الوزن
W_d	=	الوزن الجاف للماده
W_m	=	وزن الرطوبه للماده
W_t	=	الوزن الكلى للماده
$W.B.T$	=	درجة الحرارة الرطبه
X	=	نسبة جفاف او جودة البخار ، المحتوى الرطوبى للهواء ، نسبة تركيز السائل
x	=	المسافه ، السمك
α	=	معامل الانتشار الحرارى ، ثابت الانتشار الكلى فى حساب معدل التجفيف
β	=	معامل التمدد الحجمى (مقلوب درجة الحرارة المطلقة للمائع)
γ	=	معدل القص ، النسبه بين C_p / C_v ، أس منحنى الانضغاط والتمدد فى الاجراء الادياباتيكي
Δ	=	الفرق
λ'	=	الحراره الكامنه للتبخر
λ	=	الحراره الكامنه للانصهار
η	=	الكفاءة أو الجودة

θ	=	الزمن
ρ	=	الكثافة
μ	=	اللزوجة ، معامل اللزوجة
μ_A	=	اللزوجة الظاهريه
σ	=	ثابت ستيفان - بولتسمان
π	=	النسبه التقريبية
τ	=	الزمن ، اجهاد القص
Ω	=	عزم الدوران
ω	=	السرعه الزاويه

الباب الأول

الأبعاد والوحدات الهندسية Engineering Dimensions and Units

فى بداية أى دراسته هندسيه يجب الاطلاع بموضوع الابعاد والوحدات المستخدمه للتعبير عن المقادير الطبيعیه التي تستخدم فى الدراسات الهندسيه وكذلك معرفة كيف يمكن اجراء التحويلات بين الوحدات المختلفه .

الابعاد Dimensions

يستخدم الاصطلاح (بعد) Dimension للتعبير عن نوع كمية طبيعيه معينه ولذلك فانه على سبيل المثال نجد أن الطول ، المساحه ، الحجم ، الزمن ، القوه الكتله ، السرعه ، درجة الحراره ، الطاقه ، الشحنه الكهربيه ... الخ جميعها ابعاد مختلفه ومن الواضح انه يمكن التعبير عن بعض هذه الابعاد باستخدام ابعاد اخرى ولذلك فان بعض الابعاد يعتبر مشتق والبعض الآخر يعتبر بسيط أو اساسى والمجموعه الاخيريه هى التى لايمكن التعبير عنها باستخدام ابعاد اخرى مثل الوقت والطول فى حين نجد انه على سبيل المثال البعد (المساحه) يمكن التعبير عنها كمربع لبعد الطول والسرعه يمكن التعبير عنها كحاصل قسمة البعد بين الطول على الزمن واذا رمزنا للمساحه بالرمز [A] ، الطول بالرمز [l] ، السرعه بالرمز [V] ، الزمن بالرمز [t] فان المعادلات التاليه توضح التعبير عن الابعاد المشتقه باستخدام الابعاد البسيطه :-

$$[A] = [l^2] \text{ المساحه}$$

$$[V] = [l/t] \text{ السرعه}$$

الوحدات Units

يستخدم الاصطلاح (وحده) Unit لقياس حجم او مقدار كمية بعد معين ولذلك فان البوصه ، القدم ، السنتيمتر ، الميل جميعها وحدات لقياس بعد الطول. ونجد ان البيانات الهندسيه يمكن الحصول عليها في عدة وحدات وتوجد علاقات محدده بين الوحدات الخاصه لـ (بعد) معين وباستخدام تلك العلاقات يمكن التحويل بين وحده الى اخرى . وعلى سبيل المثال اذا كان لدينا الكميّه ٦٠ ميل/ساعه ويراد تحويلها الي قدم/ثانيه فنلاحظ ان كلا من الوحدتين ميل/ساعه ، قدم/ثانيه تستخدم لقياس الـ (بعد) السرعه ولأجراء هذا التحويل يجب ان نحصل اولاً على العلاقه المحدده بين كل من الميل والقدم وكذلك بين الساعه والثانيه واذا علمنا أن هذه العلاقات هى كما يلي :-

١ ميل = ٥٢٨٠ قدم ، ١٠ ساعه = ٣٦٠٠ ثانيه

ومن تلك العلاقات نحصل علي مايلى:

$$٥٢٨٠ \text{ قدم/ميل} = ١ \text{ ، } ٣٦٠٠ \text{ ثانيه/ساعه} = ١$$

وحيث ان عوامل التحويل الاخير ه مساويه للوحده فان أى كميه يمكن ضربها أو قسمتها عليها دون ان يحدث تغيير فى قيمتها ولذلك فان تلك العوامل يمكن استخدامها بالطريقه التي تؤدى إلى اختصار الوحدات غير المرغوبه فيتبقى الوحدات المرغوبه كما يلى :

$$(٦٠ \text{ ميل/ساعه}) \cdot (٥٢٨٠ \text{ قدم /ميل}) \cdot (١ \text{ ساعه/} ٣٦٠٠ \text{ ثانيه}) = ٢٥٨٠ \times ٦٠ \text{ قدم/ثانيه}$$

ويوجد جداول خاصه بعوامل التحويل

نظم القياس Systems of Measurement

كما هو معروف أنه يمكن التعبير عن (بعد) معين بعدة وحدات ولذلك فيوجد عدة نظم للتعبير عن الوحدات حيث يمكن تقسيمها الي مجموعتين الاولى تعرف بالنظم الانجليزيه والاخرى تعرف بالنظم المترية وتضم كل مجموعه نظامين احدهما شائع الاستعمال في الأغراض العلميه والاخر شائع الاستعمال في الأغراض الصناعيه ومما يذكر ان وحدات كلا من الطول والكتله والزمن وحدات اساسيه بينما وحدات القوه تكون مشتقه فيما عدا النظم الانجليزيه والامريكيه الهندسيه تكون فيها وحدات القوه هي وحدات أساسيه وتصبح وحدات الكتله هي الوحدات المشتقه ولقد وجد أن وجود عدة وحدات تعبر عن (بعد) معين يؤدي الي شيء من الارتباك مما أدى الي ظهور نظام جديد عام اقترح استخدامه في كل من الأغراض العلميه أو الصناعيه دوليا ليحل محل النظم الانجليزيه والمترية ويعرف هذا النظام باسم النظام الدولي ويرمز له بالرمز SI وهي الحروف الاولى من كلمات النظام الدولي باللغة الفرنسيه وتم اعداد هذا النظام في عام ١٩٦٠ بواسطة مؤتمر عام للموازين والمقاييس وان كان هذا النظام يعتبر نظام مترى ويوضح جدول رقم (١-١) مقارنة لوحدات بعض الابعاد في النظم المختلفه بما فيها النظام الدولي SI.

جدول رقم (١-١) نظم المقاييس (النظم الانجليزية)

الانجليزي المطلق British Absolute	الانجليزي الهندسي British Engineering	الامريكي الهندسي American Engineering
الاستخدام	علمي	صناعي امريكي
الطول	قدم	قدم
الكتلة	رطل كتلة	رطل كتلة
الزمن	ثانيه	ثانيه
درجة الحرارة	°ف	°ف
القوة	باوندال	رطل قوة
الطاقة	و.ح.ب	و.ح.ب
	قدم باوندال	قدم رطل قوة
مقلوب ثابت	١ رطل كتلة . قدم	١٧٤ رطل كتلة . قدم
معادلة نيوتن	باوندال . ثانيه ^٢	رطل قوة . ثانيه ^٢

النظم المتريه

الاستخدام	علمي	صناعي	الدولي
الطول	سنتيمتر	متر	متر
الكتلة	جرام	كيلوجرام	كيلوجرام
الزمن	ثانيه	ثانيه	ثانيه
درجة الحرارة	°م	°م	°ك
القوة	داين	كجم قوة	نيوتن
الطاقة	كالوري ، أرج	كيلو كالوري ، جول	جول
مقلوب ثابت	١ جم . سم	٨٠٧ رطل كتلة . متر	١ كجم متر
معادلة نيوتن	داين . ثانيه ^٢	كجم قوة . ثانيه ^٢	نيوتن . ثانيه ^٢

النظام الدولى للوحدات SI System

يعتمد هذا النظام على اتخاذ وحدة كقاعده للتعبير عن (بعد) معين ويمكن تكبيرها أو تصغيرها باضافة (بادئه) مناسبه لاسم الوحدة المستخدمه والبادئه المستخدمه هي لمضاعفات الرقم عشره فعلى سبيل المثال تتخذ الوحدة (متر) كقاعده للتعبير عن الطول ويمكن تكبيرها باضافة البادئه (كيلو) فتصبح كيلومتر كما يمكن تصغيرها باضافة البادئه (ميللى) فتصبح ميللى متر الا انه يجب ملاحظه انه لايمكن اضافة بادئتين معا على القاعده كما يجب اختيار البادئه قبل الوحدة التى تجعل الرقم المذكور يقع فى المدى من ٠.١ إلى ١٠٠٠ وفيما يلى بعض الامثله :-

- يجب التعبير عن ١٠٠٠٠ سم بالقيمه ١٠٠ متر ولايمكن التعبير عنها بالقيمه ١٠ كيلو سم بالرغم من ان كلا الرقمين يقع فى المدى المذكور الا أن الرقم الاخير يحتاج إلى استخدام بادئتين هما (كيلو) ، (سم) .
- يجب التعبير عن ٠.٠٠٠٠٠١ متر بالقيمه ١ ميكرومتر.
- يمكن التعبير عن ١٠٠٠٠ نيوتن/متر^٢ بالقيمه ١٠ كيلو باسكال ولايمكن التعبير عنها لـ ١٠ كيلو نيوتن/متر^٢ .
- لايمكن التعبير عن ٢٠٠٠ متر^٢ بالقيمه ٢ كيلو متر^٢ .

والجدول رقم (١-٢) يوضح أهم الوحدات الاساسيه والمشتقه فى النظام الدولى.

تحويل الابعاد Conversion of Dimensions

يتضح من التعريف المذكور من قبل للأصطلاح (بعد) انه لايمكن تحويل بعد الي آخر فلايمكن تحويل البعد (طول) الي البعد (مساحه) وهذا صحيح دائما الا فى حالة كل من البعد (الكتله) والبعد (القوه) نظرا لوجود علاقه بينهما فيما يعرف بقانون نيوتن الثاني وبالتالي فباستخدام معامل خاص كما سيتضح من المناقشه التاليه يمكن احوال كلا من البعدين (الكتله والقوه) كلاهما محل الآخر . فمن قانون نيوتن الثاني الذي يدل على ان القوه تتناسب مع حاصل ضرب الكتله والعجله ويمكن التعبير عن ذلك رياضيا بالمعادله التاليه :-

$$\text{القوه} = \text{ثابت التناسب} \times \text{الكتله} \times \text{العجله} .$$

جدول رقم (١-٢)

بعض الوحدات الأساسية والمشتقة في النظام الدولي

البعد	إسم الوحدة	رمزها	تكوينها
الطول	متر	م (m)	-
الكتلة	كيلوجرام	كجم (kg)	-
التيار الكهربائي	أمبير	أمبير (A)	-
درجة الحرارة	كلفن	كلفن (K)	-
كمية المادة	مول	مول (mol)	-
الزمن	ثانية	ث (s)	-
القوة	نيوتن	نيوتن (N)	كجم.م/ث ^٢
الطاقة ، الشغل	جول	جول (J)	نيوتن.م
كمية الحرارة	وات	وات (W)	جول/ث
القدرة	فولت	فولت (V)	وات/أمبير
الجهد الكهربى، القوة الدافعة الكهربيه	أوم	أوم (ohm)	فولت/أمبير
المقاومه الكهربيه	باسكال	باسكال (Pa)	نيوتن/م ^٢
الضغط			

وبالتالى فان وحدات ثابت التناسب هى وحدات [القوة/(الكتلة × العجلة)]
أي وحدات [(قوة × مربع الزمن)/(الكتلة × الطول)]

وتتوقف القيمة العددية لثابت التناسب على الوحدات المستخدمه للتعبير
عن الابعاد :- الكتلة ، القوة ، الطول ، الزمن .

وعندما يكون لدينا كتله مقدارها ١ رطل وخضعت لقوة الجاذبيه الأرضيه
فاننا نحصل علي قوة مقدارها رطل قوة وبالتعويض في قانون نيوتن الثاني فان :-

١ رطل قوة = ثابت التناسب × ١ رطل كتله × ٣٢.١٧ قدم/الثانيه^٢
وبالتالى فانه :-

$$١/ \text{ثابت التناسب} = ٣٢.١٧ \text{ رطل كتله} / \text{قدم} / \text{رطل قوة} \text{ ثانيه}^٢$$

ولما كانت القيمة العددية لمقلوب ثابت التناسب متساويه عدديا فقط مع
القيمة العددية للجاذبيه الارضيه فانه يرمز لمقلوب ثابت التناسب بالرمز g_c
حيث يرمز للجاذبيه الارضيه بالرمز g ويجب ان يكون واضحا ان وحدات الـ g_c
تختلف تماما عن وحدات البعد (عجله) والجدول رقم (١) يوضح وحدات مقلوب ثابت
تناسب قانون نيوتن الثاني وقيمته العددية فى النظم المختلفه للوحدات . ومما هو
جدير بالذكر انه عند ضرب أو قسمة أى قيمة بالثابت g_c فإن قيمتها لا تتغير
ولذلك فهو يستخدم عندما يكون المرغوب فيه احوال أى من الكتله أو القوة كلاهما
محل الآخر وبمعنى آخر فان g_c يعتبر احد معاملات التحويل وهو يساوى الوحده
شأنه فى ذلك شأن المعامل ٦٠ ثانيه/دقيقه أو ١٢ بوصه/قدم أو الخ

تحويل الوحدات Conversion of Units

عند كتابة القيمة العددية لـ (بعد) فان أهميته أو قيمته الحقيقيه لن
تتضح الا اذا ذكرت الوحده المميزه له ولذلك اذا تم التعويض في احدى المعادلات
بالقيم العددية متبوعه بوحداتها فاننا نحصل على معادله تعرف باسم المعادله
البعديه The Dimensional Equation وفى مثل تلك المعادلات فان الوحدات
تعامل معاملها الرموز الجبريه من حيث العمليات الحسابيه وبمعنى آخر فان جميع
العمليات الحسابيه التى تجرى علي القيم الرقميه يتم اجرائها ايضا على الوحدات

ولذلك فإن (٤ متر)^٢ = ١٦ متر^٢
 ° (جول/كيلوجرام . درجة كلفن) ١٠ × كيلوجرام × ° درجة كلفن

$$= ٥ \times ١٠ \times ٥ \text{ جول} \cdot \text{كيلوجرام} \cdot \text{درجة كلفن} = ٢٥٠ \text{ جول} \\ \text{كيلو جرام} \cdot \text{درجة كلفن}$$

وعندما يكون المطلوب تحويل وحدة الي أخرى لنفس (البعد) فإنه يمكن استخدام معادله بعديه لاجراء ذلك التحويل حيث تكتب معادله أحد طرفيها الوحدة المطلوبه في الطرف الايمن والطرف الاخر به الوحدة الموجوده المطلوب تحويلها مضروبه في معامل التحويل المناسب وعندئذ يتم الحصول علي معامل التحويل المناسب الذي باستخدامه يؤدي الي اختصار الوحدات الواجب التخلص منها وظهور الوحدات المطلوب الحصول عليها كما في المثال التالي :-

المطلوب تحويل وحدة حرارية بريطانية/رطل درجة فهرنهايت الي
 جول/جرام درجة كلفن .

جول/جرام درجة كلفن = وحدة حرارية بريطانية/رطل درجة فهرنهايت ×
 معامل التحويل المناسب

وبفحص طرفي المعادله نجد ان البسط يحتوى علي جول في الطرف الايمن وعلى وحده حرارية بريطانية في الطرف الايسر ولذلك يجب الحصول علي معامل التحويل بينهما وكذلك نجد ان المقام في الطرف الايمن يحتوى على جرام درجة كلفن بينما الطرف الايسر يحتوى المقام على رطل درجة فهرنهايت ولذلك يجب الحصول على معامل التحويل من رطل الى جرام ومعامل التحويل من درجة كلفن الى درجة فهرنهايت . ويجب ان تكون وحدات المعاملات المطلوب الحصول عليها هي جول/وحده حرارية بريطانية ، رطل/جرام ، درجة فهرنهايت/درجة كلفن. وعند البحث في جداول معاملات التحويل قد نجد معاملاتا وحده حرارية بريطانية/جول أي مقلوب الوحدات المطلوبه فيستخدم في هذه الحالة مقلوب ذلك المعامل المتاح حتى يتم الاختصار المطلوب في المعادله البعديه ولذلك فان المعامل المطلوب هو ١.٥٤٨ جول/وحده حرارية بريطانية فاذا لم يكن متوافر وكان المعامل الموجود هو ٩٤٨ × ١٠^{-٤} وحده حرارية بريطانية/ جول فانه يتم التعويض بمقلوبه أي بالقيمه جول/٩٤٨ × ١٠^{-٤} وحده حرارية بريطانية.

- بالنسبة للمعامل الثاني هو 1.046×10^{-2} رطل/جرام أو رطل/503.6 جرام والمعامل الثالث هو 1.8 درجة فهرنهايت/درجة كلفن ويجب ملاحظة أن العلاقة هنا بين درجة فهرنهايت ودرجة كلفن هي العلاقة على المقياس نفسه والآن بعد الحصول على معاملات التحويل المطلوبه فبالتعويض بهما فى المعادله البعديه السابق كتابتها نحصل علي التحويلات المطلوبه كما يلي:-

$$\text{جول/جرام} \cdot \text{درجة كلفن} = (\text{وحده حراريه بريطانيه/رطل درجة فهرنهايت}) \times (1.046 \times 10^{-2} \times 1.8)$$

$$\therefore \text{جول/جرام} \cdot \text{درجة كلفن} = (\text{وحده حراريه بريطانيه/رطل} \cdot \text{درجة فهرنهايت}) \times (1.8)$$

أحيانا مانجد ان المطلوب تحويل وحدة مشتقه الى أخرى لنفس (البعد) ولانجد لدينا معامل التحويل المناسب بينهما متوافر ففى هذه الحاله يجب ارجاع الوحدات المشتقه أو التعبير عنها بما يكافؤها من وحدات بسيطه حسب تعريف تلك الوحده المشتقه وعندئذ يمكن استخدام معاملات التحويل المتوفره بين الوحدات البسيطه لإجراء التحويل المطلوب والمثال الآتي يوضح ذلك :-

المطلوب تحويل وحدة حراريه بريطانيه الي كيلووات ساعه ؟
كيلووات ساعه = وحده حراريه بريطانيه $\times$ معامل التحويل المناسب.
يجب ملاحظة ان الوات هي وحدة القدره في النظام الدولى وهى إسم يطلق على (جول/ثانيه)، ومن العلاقات التاليه يمكن الحصول على المعاملات المطلوبه :-

$$\text{كيلووات} = 1000 \text{ وات} \quad \therefore \text{كيلووات/} 1000 \text{ وات} = 1$$

$$\text{وات} = \text{جول} \cdot \text{ثانيه}^{-1} \quad \therefore \text{وات/جول ثانيه}^{-1} = 1$$

$$\text{ساعه} = 3600 \text{ ثانيه} \quad \therefore \text{ساعه/} 3600 \text{ ثانيه} = 1$$

$$\text{وحده حراريه بريطانيه} = 1.046 \text{ جول} \quad \therefore 1.046 \text{ جول/وحده حراريه بريطانيه} = 1$$

$$\therefore \text{كيلووات ساعه} = \text{وحده حراريه بريطانيه} \times \frac{1}{3600} \times \frac{1}{1.046}$$

$$= \text{وحده حراريه بريطانيه} \times 2.928 \times 10^{-4}$$

- أحيانا مانجد أن المطلوب تحويل وحدة الى أخرى لنفس (البعد) إلا أن احدهما تحتوى على وحده كتله والأخرى تحتوى على وحدة قوه ففى هذه الحاله نستخدم مقلوب ثابت معادله نيوتن السابق ذكره مع احدى الوحدتين

حتى يتم ظهور الكتلة فقط أو القوة فقط في كلا طرفي المعادلة البعديه وبعد ذلك يتم اجراءات التحويل كما سبق ذكره والمثال الآتى يوضح ذلك :-
المطلوب تحويل رطل قوه الي وحدات القوة فى النظام الدولى ؟

لما كانت القوة هى حاصل ضرب الكتلة فى العجله فانه يمكن الحصول على وحدات القوة فى النظام الدولى وهى كيلوجرام . متر/ثانيه^٢ ويطلق عليها نيوتن وبالتالى فالمعادله البعديه هى :-

كيلوجرام . متر/ثانيه^٢ = رطل قوه × معامل التحويل المناسب .

فى هذه الحاله يجب استخدام معامل التحويل g_c بالضرب فيه حتى يمكن اخفاء وحدة رطل قوه واظهار وحدة الكتله رطل كتله بدلا منها حيث

$$g_c = 32.174 \text{ قدم رطل كتله / رطل قوه ثانيه}^2 .$$

وعندئذ سنجد ان طرفى المعادله تحتوى على وحدات كتلة وطول وزمن ولما كان وحدة الزمن هى الثانيه فى طرفى المعادله فاننا نحتاج إلى معاملين تحويل يمكن الحصول عليهما كما يلي :-

$$1 \text{ رطل} = 4.448 \times 10^{-1} \text{ كيلوجرام} \quad \therefore 4.448 \times 10^{-1} \times 1 = 1 \text{ كيلوجرام / رطل كتله}$$

$$1 \text{ قدم} = 32.174 \times 10^{-1} \text{ متر} \quad \therefore 32.174 \times 10^{-1} \times 1 = 1 \text{ متر / قدم}$$

بالتعويض فى المعادله البعديه نحصل على :-

$$\begin{aligned} \text{كجم متر/ثانيه}^2 &= \text{رطل قوه} \times 32.174 \times 4.448 \times 10^{-1} \times 1 \\ &= \text{رطل قوه} \times 4.448 \\ \therefore \text{نيوتن} &= \text{رطل قوه} \times 4.448 \end{aligned}$$

وفيما يلي مثال آخر :-

المطلوب تحويل وحدة الضغط رطل قوه/بوصه^٢ الى باسكال واذا علمت أن الضغط الجوى يساوى ١٤.٧ رطل قوه/بوصه^٢ فما قيمة الضغط الجوى بوحدات الباسكال ؟

تعتبر الوحده باسكال وحدة مشتقه للضغط فى النظام الدولى فيجب كتابتها بصوره تحتوى على وحدات اساسيه باستخدام تعريفها كما يلي :-

$$\text{باسكال} = \text{نيوتن/متر}^2 , \text{ نيوتن} = \text{كيلوجرام} \cdot \text{متر/ثانيه}^2$$

∴ باسكال = كيلوجرام . متر/متر^٢ ثانية^٢

= كيلوجرام/متر ثانية^٢

والآن يمكن كتابة المعادلة البعديه حيث تكتب الوحده المطلوب التحويل إليها فى الطرف الايمن:-

كيلو جرام/متر ثانية^٢ = رطل قوه/بوصه^٢ × معامل التحويل المناسب.

والآن نحصل على معاملات التحويل اللازمه فنجد أنه يلزم معامل التحويل gc ويجب الضرب فيه حتى يحل رطل كتله بدلا من رطل قوه ومن العلاقات

التاليه يمكن الحصول على المعاملات الأخرى المطلوبه :-

قدم = ١٢ بوصه ∴ ١٢ بوصه/قدم = ١

متر = ٣٩.٣٧ بوصه ∴ ٣٩.٣٧ بوصه/متر = ١

رطل كتله = ٤.٥٣٥٤ ر. كيلوجرام ∴ ٤.٥٣٥٤ ر كيلوجرام/رطل كتله = ١

ويلاحظ ان الضرب فى المعامل ١٢ بوصه/قدم يؤدى الى اختصار البوصه المربعه التي فى مقام الوحده المطلوب تحويلها الى بوصه فقط ، ثم استخدام المعامل ٣٩.٣٧ بوصه/متر يؤدى الى احلال المتر فى المقام بدلا من البوصه أما المعامل الاخير وهو ٤.٥٣٥٤ ر. كيلوجرام/رطل كتله يؤدى الى احلال الكيلوجرام بدلا من الرطل كتله الذى ظهر لاستخدام المعامل gc وبالتعويض عن تلك المعاملات فى المعادله البعديه ينتج :-

كيلوجرام/متر . ثانية^٢ = رطل قوه/بوصه^٢ × ٢٢.١٧٤ × ١٢ × ٣٩.٣٧ × ٤.٥٣٥٤ ر.

= رطل قوه/بوصه^٢ × ٦٨٩٣.٩٣٧

∴ باسكال = رطل قوه/بوصه^٢ × ٦٨٩٣.٩٣٧

وهذا يعنى أنه للتحويل من رطل قوه/بوصه^٢ الى باسكال يجب

الضرب فى معامل التحويل الذى تم الحصول عليه ٦٨٩٣.٩٣٧.

لذلك فان قيمة الضغط الجوى ١٤.٧ رطل قوه/بوصه^٢ اذا ضربت فى هذا المعامل

نحصل على قيمة الضغط الجوى بالوحدات الدوليه (باسكال) كما يلى :

الضغط الجوى = ١٤.٧ رطل قوه/بوصه^٢ × ٦٨٩٣.٩٣٧

= ١٠.١٣٤٠ باسكال

= ١.١ كيلو باسكال

التجانس البعدى للمعادلات Dimensional Consistency of Equations :-

نلاحظ ان المعادلات الصحيحة يجب ان تكون متجانسه بعديا وبمعنى آخر فيجب ان تكون الابعاد متماثله في كل من الطرفين وعند استخدام معادله لاول مره ويكون المطلوب معرفة وحدات احد المتغيرات بها فيمكن كتابة المعادله على هيئة معادله بعديه ونتيجة لتجانس الطرفين يمكن معرفة الوحدات المناسبه لهذا المتغير والامثله التاليه توضح ذلك :-

المطلوب معرفة وحدات معامل الانتقال الحرارى بالحمل فى النظام الدولى فى المعادله التاليه

$$Q = h A \Delta T$$

نلاحظ ان (Q) هى معدل الانتقال الحرارى وبالتالي فلها وحدات طاقه/زمن أى ان وحداتها فى النظام الدولى هى جول/ثانيه (J/s) والمعروفه بالاسم وات (W) أما (A) فهى المساحه وبالتالي فوحداتها فى النظام الدولى متر² (m²) أما (ΔT) فهى الفرق فى درجات حرارة ووحداتها فى النظام الدولى درجة كلفن (K) وبالتعويض بالوحدات فى المعادله السابقه نحصل على المعادلات البعديه التاليه :-

$$Q (W) = h () A (m^2) \Delta T (K)$$

وبضم القيم العديده المختلفه بالمتغيرات المختلفه فى المعادله فى جانب واحد نحصل على :-

$$W = () (m^2) (K) \times h A \Delta T / Q$$

والقوس الذى لايتحوى على شئ يجب ان يحتوى على وحدات الـ (h) وحتى تصبح المعادله متجانسه بعديا فيجب ان يكون محصله الوحدات على الجانب اليمين هى (W) كما فى الجانب الايسر ولذلك فان وحدات الـ (h) يجب ان تكون W/m^2K أى وات/متر² درجة كلفن .

فى المعادله التاليه :-

$$V = \frac{(p_1 - p_2)}{m p_1 p_2} + \frac{M_2}{p_2}$$

المطلوب معرفة الوحدات التى يمكن استخدامها للتعبير عن الكثافه (ρ) عندما يتم التعبير عن :- (V) بوحدات مل/مول (الحجم المولى)
(m) بوحدات مول/جرام (عدد الجزيئات فى وحدة الكتله)

(M) بوحدات جرام/مول (الوزن الجزيئى للماده)

نلاحظ ان التجانس البعدى للمعادله يحتم ان يكون محصلة الوحدات فى الطرف الايمن هو وحدات الطرف الايسر أى (مل/مول) ونلاحظ ان الطرف الايمن يتضمن جزءين مجموعين فيجب ان يكون كل جزء منهما له وحدات (مل/مول) أى ان وحدات V هى وحدات $\frac{M_2}{p_2}$ وبالتالى يمكن كتابتها فى معادله بعديه كما يلى :-

$$V \text{ (ml/mol)} = M_2 \text{ (g/mol)} \cdot 1/p_2 \text{ ()}$$

وبضم القيم العدديه المختلفه بالمتغيرات المختلفه فى المعادله فى جانب واحد نحصل على :-

$$\text{ml/mol} = \text{g/mol} \times 1 \text{ ()} \times M_2 / V p_2$$

والقوس الذى لا يحتوى على شئ يجب ان يحتوى على وحدات الكثافه (p_2) وللحصول على التجانس البعدى يجب ان يعبر عنها بوحدات تؤدى إلى اختفاء الجرام (g) وظهور المليلتر (ml) فى الجانب الايمن وبالتالى فان وحدات الكثافه الواجب استخدامها هى وحدات جم/مل (g/ml) .

اسئلة وتمارين

- ١- حدد أى الاصطلاحات التالية يعتبر (بعد) وأيها يعتبر (وحدة) ؟
 - أ- الطول ب- كيلو جرام ج- ساعة
- ٢- وحدة اللزوجة المعروفة باسم بواز poise هي عبارة عن داين ث/سم^٢
هل هذه الوحدة تعتبر أساسية ام وحدة مشتقة ؟
- ٣- فى أى الوحدات يمكن التعبير عن الكميات الطبيعية الآتية باستخدام النظام الدولى SI ؟
 - أ- الوزن (لاحظ ان الوزن وحداته وحدات القوة)
 - ب- الضغط ج- درجة الحرارة د- الارتفاع
 - هـ- الكتلة و- الحجم ز- كمية الحرارة
 - ح- القدره الكهربيه ط- القدره الميكانيكيه
- ٤- عبر عن الكميات الآتية باستخدام قواعد النظام الدولى :-
 - أ- ١٠ ملليمتر ب- ٠.٠١ ر نيوتن/م^٢
- ٥- اوجد معاملات التحويل المناسبه فى كل من المعادلات الآتية :-
 - أ- رطل/قدم^٢ = (رطل/جالون) × معامل التحويل المناسب .
 - ب- رطل/بوصه^٢ = (رطل/قدم^٢) × معامل التحويل المناسب .
 - ج- وات = (كالورى/ث) × معامل التحويل المناسب .
- ٦- من المعلوم ان المعادله التاليه تستخدم لحساب كمية الحرارة اللازمه لتغير درجة حرارة مادة من درجة حرارة T₁ الى درجة حرارة T₂ .

$$Q = m c_p (T_2 - T_1)$$

احسب كمية الحرارة اللازمه لرفع درجة حرارة قطعة من اللحم كتلتها ١٠ رطل من درجة حرارة ٤٠°ف الى درجة حرارة ١٢٠°ف مع العلم ان الحرارة النوعيه للحم (c_p) قيمها ٠.٨ و. ح. ب/رطل°ف معبرا عن كمية الحرارة اللازمه بوحدات وات. ساعة .

٧- احسب القدره المطلوبه لسخان كهربى يستخدم لتسخين ١٠ جالون ماء من درجة حرارة ٧٠°ف الى درجة حرارة ٢١٢°ف فى مدة ١٠ دقائق وعبر عن القدره بوحدات جول/دقيقه وبوحدات (وات) مستخدما معاملات التحويل التاليه :-

$$\begin{aligned} \text{الحراره النوعيه للماء} &= ١ \text{ و.ح.ب/رطل}^\circ\text{ف} \\ ٦٠ \text{ دقيقه/ساعه} &، ٢٤١٤ \text{ و.ح.ب/وات} \cdot \text{ساعه} ، \\ ٨٢٣ \text{ رطل ماء/جالون} ، ١٠٥٤٥ \cdot ١٠ \times \text{جول/و.ح.ب} \end{aligned}$$

٨- اذا علمت ان (طن تبريد) هو معدل سحب الحراره لتجميد ١ طن (٢٠٠٠ رطل) من الماء عند درجة حرارة ٣٢°ف فى خلال مدة ٢٤ ساعه . ما هى قيمة (طن تبريد) معبرا عنها بوحدات (وات) ، وحدات (و.ح.ب/ساعه) ، الحراره الكامنه لانصهار الماء هى ٨٠ كالورى/جم.

٩- أ- فى المعادله :- $\tau = \mu (\gamma)$
اوجد وحدات الـ (τ) عند التعبير عن (μ) بوحدات (داين.ث/سم^٢) وعن (γ) بوحدات (ث^{-١})
ب- عند التعبير عن (μ) بوحدات (رطل كتله/قدم ثانيه) ، عن (τ) بوحدات (رطل قوه/قدم^٢) ، عن (γ) بوحدات (ث^{-١})
ما هو التعديل المطلوب اجرائه على المعادله المذكوره حتى نحصل على التجانس البعدى ؟

١٠- المطلوب اجراء التحويلات الآتيه باستخدام القيم القياسيه للعلاقات بين وحدات الطول والعلاقه بين وحدات الكتله :-

- أ- ٩٢٥ سم/ث الى ميل/ساعه
- ب- ٤٨٠ سم/ث^٢ الى قدم/ساعه^٢
- ج- ٦٢٤ رطل كتله/قدم^٢ الى جم/سم^٢
- د- ١٣.١٠ × ١٠ داين/سم^٢ الى رطل قوه/بوصه^٢
- هـ- ٨٧٥٠ قدم.رطل قوه الى جول والى كيلوات ساعه
- و- ١٠ كيلوات الى قدم رطل قوه/ثانيه
- ١ ميل = ١٦٠٩ كم ١ قدم = ٣٠.٤٨ سم ١٢ بوصه = ١ رطل = ٤٥٤ جرام.

١١- باستخدام المعلومات الآتية المطلوب حساب معامل لتحويل وحدات الضغط من ملليمتر زئبق الى رطل قوه/بوصه^٢ مع العلم ان الضغط عند قاع عمود السائل يساوى وزن هذا السائل مقسوما على مساحة مقطع العمود . استخدم هذا المعامل لايجاد قيمة الضغط الجوى القياسى بوحدات رطل قوه/بوصه^٢ :-

$$\begin{aligned} \text{كثافة الزئبق} &= ١٣.٦ \text{ جم/سم}^3 \\ ١ \text{ بوصة} &= ٢.٥٤ \text{ سم} \\ ١ \text{ رطل} &= ٤٥٤ \text{ جم} \\ \text{عجلة الجاذبيه الارضيه} &= ٩٨٠ \text{ سم/ث}^2 = ٣٢.١٧ \text{ قدم/ث}^2 \\ \text{الضغط الجوى القياسى} &= ٧٦٠ \text{ ملليمتر زئبق} \end{aligned}$$

١٢- من المعتاد قياس كمية الطاقه الحراريه بوحدات الكالورى أ ، و.د.ب. احسب معامل يستخدم لتحويل الـ BTU الى قدم رطلقوه باستخدام المعلومات الآتية فقط :-

$$\begin{aligned} ١ \text{ كالورى} &= ٤.١٨٥ \text{ جول} \\ ١ \text{ و.د.ب} &= ٢٥٢ \text{ كالورى} \\ ١ \text{ رطل} &= ٤٥٤ \text{ جرام} \\ ١ \text{ قدم} &= ١٢ \text{ بوصة} = ٣٠.٤٨ \text{ سم} \\ \text{عجلة الجاذبيه الارضيه (g)} &= ٩٨٠ \text{ سم/ث}^2 = ٣٢.١٧ \text{ قدم/ث}^2 \\ \text{المعامل (gc)} &= ٩٨٠ \text{ جم.سم/سم}^3 \text{ ث}^2 \\ &= ٣٢.١٧ \text{ رطل كتله.قدم/رطلقوه}^2 \text{ ث}^2 \end{aligned}$$

١٣- ينساب احد الموائع له كثافه (ρ) خلال ماسوره بسرعة (V) وكان الانخفاض فى الضغط (P)
وضح ان الطاقه الكينتيكيه لكل رطل مائع له نفس البعد لنتاج قسمة الانخفاض فى الضغط P على الكثافه ρ مع العلم بأن الطاقه الكينتيكيه تعرف بانها نصف حاصل ضرب الكتله فى مربع السرعة ؟
اذا علمت ان الكثافه مقدارها ٧٠ رطل/قدم^٣ ، السرعة ٣ متر/ث ، الانخفاض فى الضغط مقداره ٢٥ رطلقوه/بوصه^٢ . احسب النسبه بين الطاقه الكينتيكيه والانخفاض فى الضغط .

الباب الثانى

الغازات المثالية

Ideal or Perfect Gases

تعريف :

الغاز المثالى يتكون نظريا من جزيئات دقيقة كروية الشكل كاملة المرونة لا توجد بينها قوى جذب . والحجم الذى تشغله صغير جداً اذا ما قورن بالحجم الموجود بين هذه الجزيئات .

وطبقا لقوانين علم الفيزياء تبين العلاقة الآتية ارتباط ضغط الغاز المثالى بعدد وسرعة سريان جزيئات الغاز :-

$$P = \frac{N.M.C^2}{3} \quad (2-1)$$

حيث ان :

P = الضغط المطلق للغاز .

N = عدد جزيئات الغاز الموجوده فى وحدة حجم .

M = الوزن الجزيئى للغاز .

C = السرعة المتوسطة للجزيئات .

$$C = \sqrt{\frac{C_1^2 + C_2^2 + \dots + C_N^2}{N}} \quad (2-2)$$

ويمكن كتابة العلاقة المذكورة سابقا لضغط الغاز المثالى كما يلى :-

$$P = \frac{2}{3} N \left(\frac{MC^2}{2} \right) \quad (2-3)$$

اى ان الضغط النوعى للغاز المثالى يساوى عدديا ثلثى الطاقة الكينيتيكية للجزيئات المحتوى عليها فى وحدة حجم . فاذا فرض ان حجم الغاز يساوى V فيكون :

$$PV = \frac{2}{3} N.V \left(\frac{MC^2}{2} \right) \quad (2-4)$$

$$= \frac{2}{3} n \left(\frac{MC^2}{2} \right) \quad (2-5)$$

حيث ان :

$NV = n$ = عدد الجزيئات الموجوده فى الحجم V

ومن النظرية الكينيتيكية للغازات نجد أن الطاقة الكينيتيكية تتناسب طرديا مع درجة الحرارة المطلقة للغاز أى أن :

$$\frac{MC^2}{2} \propto T \quad (2-6)$$

حيث :

T = درجة الحرارة المطلقة للغاز ($^{\circ}C + 273.15$) درجة حرارة كلفن

أو $= (^{\circ}F + 459.67)$ درجة حرارة رانكن .

قوانين الغازات :

١- قانون بويل : Boyle's Law

يتناسب ضغط الغاز (P) مع حجمه (V) تناسباً عكسياً تحت درجة حرارة ثابتة
أى أن

$$PV = \text{Constant} \quad (2-7)$$

٢- قانون شارل : Charl's Law

عند ثبوت الضغط ، الاحجام المتساوية من جميع الغازات المثالية تتمدد أو تنكمش بنفس المقدار للتغير الثابت فى درجة حرارة الغازات .

أى أن

$$\frac{V}{T} = \text{Constant} \quad (2-8)$$

٣- قانون أفوجادرو : Avogadro's Law

عند ثبوت كلا من ضغط الغاز ودرجة حرارته ، تحتوى الاحجام المتساوية من جميع الغازات المثالية على اعداد متساوية من الجزيئات . أى أن كثافة أى غاز تتناسب مع الوزن الجزيئى لهذا الغاز فمثلا ٢٢ جم O_2 ، ٢٨ جم N_2 ، ٢ جم H_2 ، ٤٤ جم CO_2 ... الخ تشغل نفس الحجم عند ضغط ودرجة حرارة ثابتين .

هذا الوزن الذي يختلف باختلاف الغازات ويشغل تقريبا نفس الحجم يسمى (المول) mol وقد وجد ان حجمه يساوى ٢٢.٤ لترًا تحت الضغط الجوى ودرجة الحرارة العادية (760 mm Hg - 0°C or 14.7 lbf/in² - 32°F)

٤- قانون جول Joule's Law

الطاقة الداخلية لغاز مثالي تعتمد على درجة حرارته فقط ولا تعتمد على حجمه او الضغط الواقع عليه .

$$\Delta U = m \cdot c_v \cdot \Delta t \quad (2-9)$$

٥- القانون العام للغازات المثالية Universal Ideal Gas Law

وهو نتيجة لقانونى بويل وشارل :

$$PV = n R_0 T \quad = \quad \text{or} \quad Pv = R_0 T \quad (2-10)$$

وحيث يسمى الثابت " R_0 " بالثابت العام للغازات وقيمته بالوحدات المختلفه

كما يأتى:-

$R_0 = 1545$	lbf. ft/lb mol. R
$= 848$	Kp.m/k mol. K
$= 8314.4$	N.m/k mol. K
$= 8.3144$	KJ/k mol. K
$= 1.986$	BTU/lb mol. R
$= 1.986$	Cal/gm mol. K
$= 1.986$	K Cal/k mol. K

وتكون V فى هذه الحاله هى الحجم المولى للغاز .
والقانون العام ينطبق على الغازات المثالية فقط . لذلك فان جميع الغازات التى تكون عند درجة حرارة بعيدة لا يمكن تطبيقه عليها وكذلك على الابخره المختلفه (بخار الماء مثلاً) لان جزئياتها تكون ملاصقه لبعضها ولا يمكن اهمال طاقة الشغل الكامله لضغط الجزئيات الى بعضها أو فصلها عن بعضها .

٦- قانون دالتون للضغط الجزئى Dalton's Law

ضغط مخلوط من الغازات او الابخره يساوى مجموع الضغوط الفرديه لكل غاز او بخار كما لو كانت موجوده بمفردها تحت نفس درجه الحراره وفى نفس الحجم الذى يشغله المخلوط أى ان :

$$P = P_1 + P_2 + P_3 + \dots \quad (2-11)$$

ووزن المخلوط يكون مجموع اوزان الغازات المكونه له :

$$m = m_1 + m_2 + m_3 + \dots \quad (2-12)$$

وباستخدام القانون العام للغازات باعتبار V هى الحجم الكلى لجزئيات الغاز :

$$V = \frac{m}{M} \cdot R_o \cdot T \quad (2-13)$$

حيث ان :

m = الوزن الكلى للغاز (كتلة الغاز) .

M = الوزن الجزيئى للغاز .

$n = \frac{m}{M}$ = عدد الجزيئات فى الغاز .

ولمخلوط من الغازات او الابخره موجوده فى حجم " V "

$$\therefore \frac{m \cdot R_o \cdot T}{M \cdot P} = \frac{m_1 \cdot R_o \cdot T}{M_1 \cdot P_1} = \frac{m_2 \cdot R_o \cdot T}{M_2 \cdot P_2} = \dots \quad (2-14)$$

$$\therefore \frac{m}{M \cdot P} = \frac{m_1}{M_1 \cdot P_1} = \frac{m_2}{M_2 \cdot P_2} = \dots \quad (2-15)$$

٧- قانون اماجات للحجوم الجزيئى Amagat's Law

حجم مخلوط من الغازات او الابخره يساوى مجموع الاحجام الفرديه لكل غاز او بخار كما لو كانت موجوده بمفردها تحت نفس درجه الحراره وتحت الضغط الواقع على المخلوط .
أى ان :

$$V = V_1 + V_2 + V_3 + \dots \quad (2-16)$$

مثال :

خزان من الصلب حجمه ٢ متر مكعب يحتوى على هواء جاف عند ضغط مانومتري ٢ر٧٥ بار ودرجة حرارة ٢٠°م. احسب وزن الهواء الموجود داخل الخزان . ماهو الوزن اللازم اضافته من النتروجين الجاف الى هواء الخزان لكي يرتفع ضغط المخلوط إلى ٤ر١٥ بار عند نفس درجة الحرارة .

الحل :

$$\text{Atmospheric Pressure} = 1.013 \text{ bar}$$

$$\text{Absolute Pressure of Air} = 2.75 + 1.013 = 3.763 \text{ bar}$$

$$\text{Absolute Pressure of mixture} = 4.15 + 1.013 = 5.163 \text{ bar}$$

$$\text{Manometric Pressure of nitrogen} = 5.163 - 3.763 = 1.4 \text{ bar}$$

ويمكن حساب وزن الهواء باستخدام القانون العام للغازات .

$$\begin{aligned} \text{Mass of Air (m)} &= \frac{P.V.M}{R_o.T} \\ &= \frac{3.763 \times 10^5 \times 2 \times 28.97}{8314.4 \times (20 + 273.15)} = 8.95 \text{ kg} \end{aligned}$$

ويمكن حساب وزن النتروجين من نتيجة قانون دالتون :

$$\frac{m_1}{M_1.P_1} = \frac{m_2}{M_2.P_2}$$

أى ان :

$$\frac{8.95}{28.97 \times 3.763 \times 10^5} = \frac{m_2}{28.02 \times (1.4 + 1.013) \times 10^5}$$

$$\therefore \text{Mass of Nitrogen (m}_2\text{)} = 5.55 \text{ kg.}$$

الباب الثالث

مبادئ الديناميكا الحرارية

Principles of Thermodynamics

مقدمه :

تعتمد جميع الكائنات الحيه فى بقائها حيه على الطاقه وتوجد الطاقه فى صور عديده ابتداء من الطاقه الموجوده فى ذرات الماده نفسها وحتى الطاقه التى تشعها الشمس وفيما بينهم نجد لدينا مصادر عديده على سبيل المثال الطاقه الكيماويه للوقود وطاقه الوضع للكميات الكبيره للماء المتبخر بواسطه أشعة الشمس والمهم ان توجد الوسيله التى تؤدى إلى الانتفاع بالطاقه من مصدرها لخدمة البشريه فمثلا يتم تحويل طاقه الوضع للكميات الضخمه من الماء الى طاقه كهربيه بوضع توربينات مائيه فى طريق انحدارها من الجبال إلى البحار مثلا . كذلك يمكن استخدام طاقه احتراق الفحم لانتاج البخار الذى يستخدم بدوره لتوليد الطاقه الكهربيه بواسطه التوربينات البخاريه كما يستخدم طاقه احتراق الوقود البترول فى آلات الاحتراق الداخلى لتسخين الهواء حتى يتمدد ويدفع المكبس لينتج طاقه ميكانيكيه .

[ونجد أن علم الديناميكا الحرارية هو العلم الذى يقوم بدراسة العلاقه بين الحراره والشغل وخواص النظم . كما يهتم بالوسائل اللازمه لتحويل الطاقه الحراريه من مصادرها المتاحه إلى الشغل الميكانيكى]. ويطلق اسم الآله الحراريه Heat Engine علي النظام الذى يعمل فى دورة لينتج شغل من مصدر حراري .

ويجب ان نقوم بتعريف للمفاهيم المستخدمه عند دراسة الديناميكا الحرارية كما يلى:-

١- الحراره Heat

هى احدى صور الطاقه ويمكن ان تنتقل من جسم الى آخر ذو درجة حراره أقل.

٢- النظام System

يعرف النظام بأنه مجموعه من الماده له حدود معرفه وهى ليست من الضروري أن تكون حدودا غير مرنه ويمكن ان يكون النظام :-

- نظام مغلق Closed System :- على سبيل المثال المائع فى اسطوانة آلة تردديه خلال شوط التمدد يمكن ان يعرف علي انه نظام وحدوده جدران الاسطوانه وهو نظام مغلق حيث لا يوجد انتقال للكتله عبر الحدود المعرفه .

- نظام مفتوح Open system :- على سبيل المثال المائع فى توربين يمكن أن يعرف على أنه نظام حدوده تتضمن التوربين وبداية ماسورة الدخول والخروج إلا أن انتقال المائع خلال التوربين أى انتقال كتلة يجعله نظاما مفتوحا . والنظام له ضغط يمكن تعريفه بأنه القوة الواقعة على وحدة المساحات من الحدود المحيطة بالنظام .

كما أن للنظام حجم نوعى وهو الحجم الذى يشغله وحدة الكتلة من النظام .

٢- الشغل Work :

يعرف الشغل بأنه حاصل ضرب القوة $\times$ المسافة التى تتحركها فى اتجاه القوة وعندما تتحرك حدود نظام مغلق للخارج فى اتجاه القوة المسلطة عليها يقال أن النظام بذل شغلا على ما يحيط به أما إذا تحركت حدود النظام للداخل فيقال أنه بذل شغل على النظام .

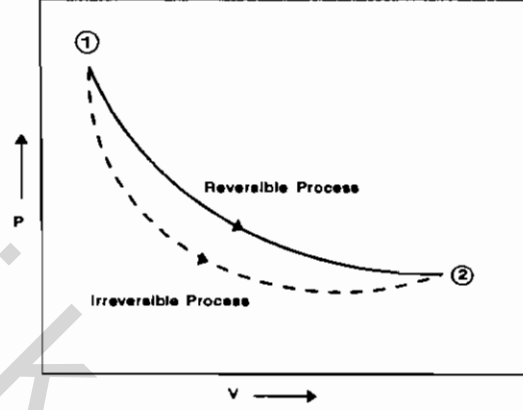
وكل من الشغل والحرارة طاقة يمكن أن تنتقل ويجب ألا يحدث خطأ بين مفهومها وبين مفهوم الطاقة الداخلى لنظام . فعلى سبيل المثال إذا وجد أسطوانة تحتوى على غاز تحت ضاغط ومعزولة عزلا جيدا وتم تحريك الضاغط للداخل فإن درجة حرارة وضغط الغاز سترتفع ولما كان الأسطوانة معزولة جيدا فهذا يعنى عدم تسرب كمية من الحرارة منها أو إليها وتكون نتيجة الشغل الذى يبذل على الغاز هو ازدياد الطاقة الداخلى للنظام . ومن جهة أخرى نفترض أنه لدينا وعاء صلب يحتوى على غاز وتم تسخينه فإن حدود النظام صلبة ولا تتحرك وبالتالي لا يستطيع الغاز أن يتمدد ويبذل شغلا نتيجة الحرارة المضافة إليه ولكن نجد أن درجة الحرارة ترتفع وتزداد الطاقة الداخلى للنظام وبالتالي يتضح أن الطاقة الداخلى يمكن أن تزداد بزيادة شغل أو إضافة حرارة .

٤- مائع الشغل The Working Fluid :

من الوجهة العلمية نجد أن المادة الموجودة داخل حدود أى نظام قد تكون سائل أو بخار أو غاز ويطلق عليها اسم مائع الشغل The Working Fluid وفى لحظة ما يمكن تعريف حالة المائع بمعرفة خواصه الترموديناميكىة والتى تتضمن :-

درجة الحرارة (T) ، الحجم النوعى (v) ، الطاقة الداخلى النوعية (u) والانتالپى النوعى (h) ، الانتروپى النوعى (s) ولقد وجد أنه لموانع الشغل النقية مجرد معرفة خاصيتين له يمكن معرفة حالة المائع تماما (State) ويمكن تحديده على خريطة توضح العلاقة بين تلك الخاصيتين بنقطة مثل خرائط p.v التى توضح العلاقة بين الضغط والحجم النوعى .

-٥- الانعكاسية Reversibility:



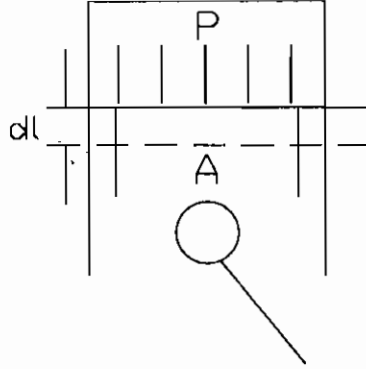
شكل (١-٢) الاجراءات الانعكاسية والغير انعكاسية

لقد تم ايضاح انه بمعرفة خاصيتين لمائع الشغل يمكن تحديد حالته بنقطة علي الخريطة التي تمثل العلاقة بين هاتين الخاصيتين واذا حدث تغيير لحالة المائع فيمكن تحديد حالته الجديدة بنقطة جديدة واذا كانت النقطة الاولى هي رقم 1 فيمكن تسمية النقطة الثانية برقم 2 . وعندما يكون من الممكن تحديد جميع النقط الواقعة بين النقطتين 1 ، 2 فان هذا التعبير من الحالة (1) الى الحالة (2) اجراء Process كما هو مبين بالشكل (١-٢) وبالتالي يكون الاجراء انعكاسي وعادة يتم تمثيله على الخريطة بخط متصل، وعلميا عندما يحدث اجراء على مائع ولا يمكن تحديد النقط الوسيطة بين حالته الابتدائية والنهائية فنقول ان الاجراء غير انعكاسي Irreversible ويرسم الخط بين الحالتين مقطع وليس متصلا .

ويمكن تعريف الانعكاسية كما يلي :-

عندما يتم اجراء انعكاسي فانه يمكن اعادة المائع ومايحيط به الى حالتهم الاصليه . ويتضمن الاجراء الانعكاسي عدم وجود احتكاك .

٦- الشغل الانعكاسى Reversible Work



شكل (٢-٣) حركة الكباس داخل الاسطوانة

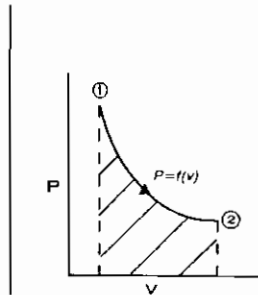
الاسطوانة المقابلة تحتوى على مائع مثالى ولا يوجد احتكاك فى النظام وضغط ودرجة حرارة المائع منتظمه فى اجزائه . افترض ان مساحة مقطع الكباس "A" وضغط المائع "p". افترض ان القوة المحيطة على الكباس هي "p A". افترض ان الكباس تحرك تحت قوة المائع للخارج مسافة صغيره "dl". كما هو مبين فى شكل (٢-٣) وبالتالى فان الشغل المبذول بواسطة المائع على الكباس هو حاصل ضرب قوة المائع فى المساحة التي تحركها الكباس أى أن :

$$\text{Work done} = (pA) \times dL = pdV \quad (3-1)$$

حيث ان "dV" ازدياد صغير فى حجم المائع وعندما تكون كمية المائع وحدة كتلة فان "V" تصبح الحجم النوعى v ، dV تصبح dv. وبالتالى فان عند حدوث انعكاس من الحالة 1 الى الحالة 2 ، يمكن حساب الشغل من المعادلة :

$$\text{Work} = \int pdv \quad (3-2)$$

وبالتالى عندما يتم تمثيل التغير من الحالة ١ الى الحالة ٢ ، لاجراء انعكاسى على خريطة (p-v) كما فى الشكل (٢-٣) فان المساحة المظلمة تمثل الشغل المبذول بواسطة المائع.

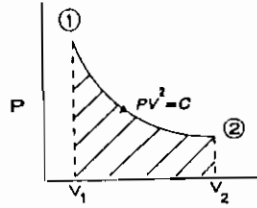


شكل (٣-٣) تمدد الغاز داخل الاسطوانة

مثال رقم ١ :-

مائع عند ضغط ٢ بار وذو حجم نوعي ٠.١٨ م^٣/كجم موجود في أسطوانة وزاء كباس وتمدد انعكاسيا الى ضغط مقداره ٠.٦ بار. تبعا للمعادلة $(p = c/v^2)$ حيث c ثابت). احسب الشغل المبذول بواسطة المائع علي الكباس؟

الحل



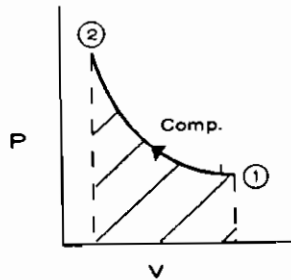
الشكل السابق يوضح الاجراء المذكور والمساحة المظلة تمثل الشغل المبذول. ولما كانت العلاقة بين الضغط والحجم معلومة فيمكن حساب الشغل كما يلي :-

$$w = \int_{v_1}^{v_2} p dv = \int_{v_1}^{v_2} c/v^2 dv = c [-1/v]_{v_1}^{v_2}$$

$$c = p_1 v_1^2 = (3) (10^5) (0.18)^2 = 9720 \text{ Pa (m}^3/\text{kg)}^2$$

$$v_2 = (c/p_2)^{0.5} = 0.402 \text{ m}^3/\text{kg}$$

$$\therefore W = 9720 [(1/0.18) - (1/0.402)] = 29840 \text{ joule/kg} \\ = 29.840 \text{ kj/kg}$$

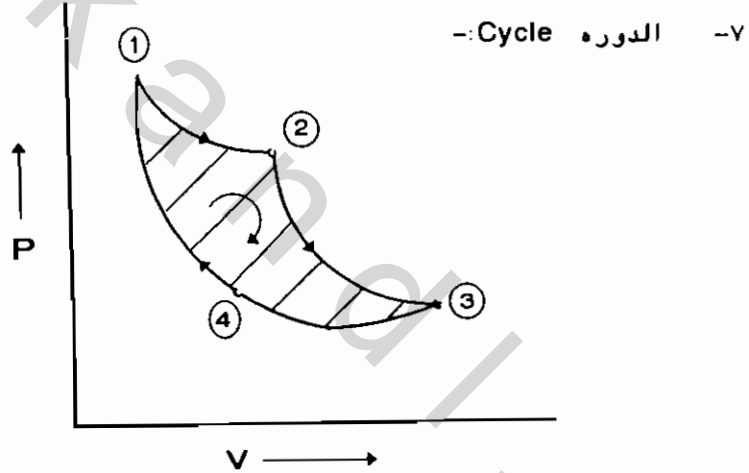


شكل (٣-٤) انضغاط الغاز داخل الاسطوانة

عندما يتم إجراء بحيث يتم ضغط المائع انعكاسيا من الحالة (1) إلى الحالة (2) فإن الشغل هنا يكون قد بذل على المائع وعند تمثيل الإجراء على خريطة $(p-v)$ كما في الشكل (٣-٤) فإن الشغل المبذول على المائع تمثله المساحة المظلمة وعند معرفة علاقته بين الضغط والحجم يمكن حساب هذا الشغل وسنجد أن قيمته ذات إشارة سالبة حيث تعنى تلك الإشارة أن الشغل مبذول على المائع.

$$\text{Work done} = \int p dv$$

وكقاعده عندما يتم توضيح الإجراء على خريطة $p-v$ فإذا كان اتجاه خط الإجراء من اليسار إلى اليمين فإن الشغل موجب مبذول بواسطة المائع وإذا كان اتجاه خط الإجراء من اليمين إلى اليسار فإن الشغل سالب مبذول على المائع .

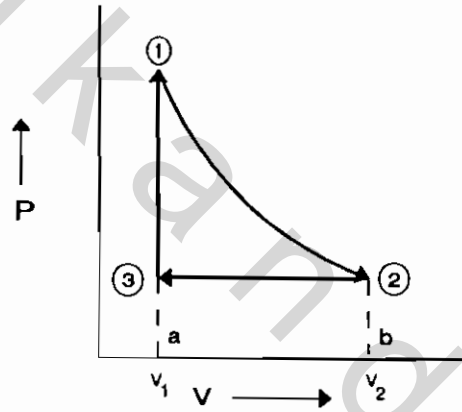


شكل (٣-٥) تمثيل الدوره على خرائط ال $P-v$

عندما يتم عمل عدة إجراءات متتاليه على مائع وفى الإجراء النهائي يعود المائع إلى حالته الاصلية فإنه يكون قد تم إجراء "دوره" وعندما تكون إجراءات الدوره انعكاسية فإن الدوره أيضا تكون انعكاسيه . ويمكن تمثيل الدوره أيضا على خريطة $(p-v)$ وتأخذ شكلا مغلقا حيث المساحه داخله تمثل الشغل المبذول بواسطة المائع أو عليه وعندما يتم إجراء الدوره ويتم وصف اجرائها فى ترتيب مماثل لاتجاه دوران عقارب الساعه فإن الشغل الصافي للدوره يكون مبذولا بواسطة المائع أي موجب القيمة والعكس صحيح (شكل ٣ - ٥).

مثال رقم ٢ :

اسطوانه تحتوى على ١ كجم من مائع عند ضغط ابتدائى قدره ٢٠ بار. سمح للمائع بالتمدد انعكاسيا وراء ضاغط تبعاً للمعادله $(pv^2 = c)$ حتى تضاعف الحجم بعد ذلك تم تبريد المائع انعكاسيا تحت ضغط ثابت حتى وصل الضاغط الى موضعه الاصلى ، تم اضافة كمية من الحرارة للمائع مع تثبيت الضاغط فى مكانه فازداد الضغط حتى القيمه الاصليه ٢٠ بار . احسب الشغل الصافى المبذول بواسطة المائع اذا علمت ان الحجم الابتدائى هو ٠.٥ م^٣.



الحل

الشكل السابق يوضح الدوره المذكوره

$$p_1 v_1^2 = p_2 v_2^2$$

$$\therefore p_2 = p_1 (v_1 / v_2)^2$$

$$= (20) (1/2)^2 = 5 \text{ bar}$$

الشغل المبذول من الحاله (١) الى الحاله (٢) W_{1-2} تمثله المساحه ١ ٢ ٣

$$W_{1-2} = \int \frac{C}{v^2} dv \quad c = p_1 v_1^2 = (20) (10^5) (0.05)^2$$

$$\therefore W_{1-2} = 20 \times 10^5 \times (0.05)^2 [1/0.05 - 1/0.1] = 50000 \text{ N.m}$$

الشغل المبذول من الحالة (2) الى الحالة (3) W_{2-3} تمثله المساحة 3a b 2

$$\therefore W_{2-3} = \int P dv \quad P = \text{Constant} = P_2 = P_3 = 5 \text{ bar}$$

$$W_{2-3} = P_2 (v_3 - v_2) = (5) (10^5) [0.05 - 0.1] = -25000 \text{ N.m}$$

الشغل المبذول من الحالة (3) الى الحالة (1) قيمته صفر حيث لم يتحرك الضاغط

$$W_{3-1} = \int p dv$$

$$dv = 0 \quad \therefore W_{3-1} = 0$$

صافى الشغل تمثله المساحة 1 , 2 , 3

$$W = 50000 - 25000 + 0 = 25000$$

القانون الاول للديناميكا الحرارية

اوضح العلماء فى اوائل القرن التاسع عشر مفهوم الطاقه وأنها لا تخلق من عدم ولا تفنى وهى الاساس المعروف ببقاء الطاقه . والقانون الاول للديناميكا الحرارية ماهو الا الصيغ لهذا المفهوم العام مع توضيح العلاقه بين الطاقه الحراريه والطاقه الميكانيكيه ولذلك نجد ان هذا القانون يصاغ كمايلي :-

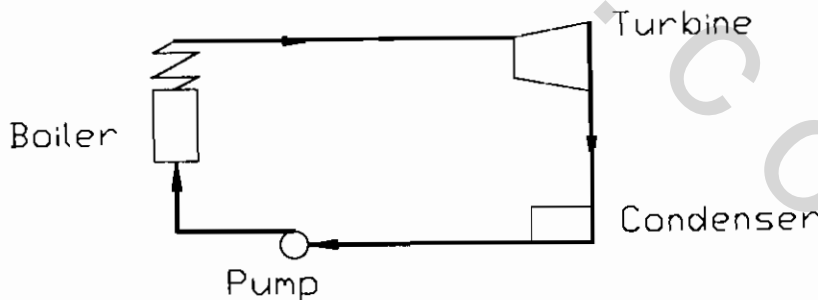
(عندما يخضع نظام لدورة ديناميكيه حراريه فان صافى الطاقه الحراريه المضافه للنظام من الجو المحيط به يساوى صافى الشغل المبذول بالنظام على الجو المحيط به) وبالتالي يمكن التعبير عنه رياضيا كما يلى :-

$$\sum dQ = \sum dW$$

حيث علامه $\sum$ تعبر عن المجموع فى دورة كامله

مثال رقم ٣ :-

ينتج توربين بخارى ١٠٠٠ كيلووات . كمية الحراره المضافه للبخار فى الغلايه ٢٨٠٠ كيلوجول/كجم. كمية الحراره المطروده الى مياه التبريد فى المكثف هى ٢١٠٠ كيلوجول/كجم. والشغل اللازم لمضخه اعاده المياه المتكثفه الى الغلايه هـ كيلوات احسب معدل انسياب البخار فى تلك الدوله بوحدهات كجم/ث. والشكل التالى يوضح الدوله المذكوره.



$$\sum dQ = 2800 - 2100 = 700 \text{ k J/kg}$$

نفترض ان معدل سريان البخار هو m كجم/ثانيه

$$\therefore \Sigma dQ = 700 \text{ m kJ/s}$$

$$\Sigma dW = 1000 - 5 = 995 \text{ kW} = 995 \text{ kJ/s}$$

وبتطبيق القانون الأول ينتج أن :-

$$\Sigma dQ = \Sigma dW$$

$$700 \text{ m} = 995$$

$$m = 1.421 \text{ kg/s}$$

أي أن معدل انسياب البخار ١٤٢١ ر/كجم/ث.

معادلة عدم السريان The non flow equation

عندما نقوم بإجراء على نظام حيث يتغير من الحالة ١ إلى الحالة ٢ وتزداد طاقته الداخلية (U) فإنه يتم التعبير عن القانون الأول للديناميكا الحرارية بأن الزيادة في الطاقة الداخلية للنظام هي الفرق بين صافي كمية الحرارة المضافة للنظام وصافي الشغل الناتج أي أن :-

$$U_2 - U_1 = dQ - dw \quad (3-3)$$

ويمكن الوصول إلى المعادلة التالية والتي تعرف بمعادلة عدم السريان :-

$$dQ = dU + dW \quad (3-4)$$

مثال رقم ٤ :-

في شوط الانضغاط لآلة احتراق داخلي وجد أن كمية الحرارة المطرودة لماء التبريد هي ٤٥ كيلوجول/كجم والشغل المبذول مقداره ٩٠ كيلوجول/كجم. احسب التغير في الطاقة الداخلية النوعية لمائع الشغل وحدد ما إذا كان التغير فقد أو اكتساب ؟

الحل

الإشارة سالبة لأنها حرارة مطرودة $Q = -45 \text{ kJ/kg}$

الإشارة سالبة لأنه شغل مبذول على النظام $W = -90 \text{ kJ/kg}$

باستخدام المعادلة التالية :

$$dQ = du + dw$$

$$Q = (u_2 - u_1) + W$$

$$-45 = (u_2 - u_1) - 90$$

ازدياد فى الطاقة الداخليه

$$u_2 - u_1 = -45 + 90 = 45 \text{ kJ/kg}$$

معادلة السريان المستقر The steady flow equation

سبق ان ذكرنا ان المائع له طاقه داخلية ترجع لخواصه الترموديناميكية إلا ان المائع اذا تحرك بسرعه "C" وكان على ارتفاع من سطح الارض أو خط مرجع "Z" فان ١ كجم مائع يحتوى بالاضافه الى طاقته النرجيه الداخليه (u) على طاقة حركيه (C²/2) وطاقة وضع Zg ، كما يحتوى على طاقة الضغط pv فاذا فرض ان المائع يتحرك بين نقطتين (١) ، (٢) ونفترض أنه يضاف إليه حرارة عند النقطة (١) وينتج شغل عند النقطة (٢) فان مجموع الطاقه فى النظام لكل ١ كجم عند اية نقطه ثابت ، وعندما ينساب المائع بمعدل انسياب كتله ثابتة فانه يقال ان الانسياب مستقر وعندئذ يمكن الحصول على المعادلة التاليه :-

$$u_1 + (C_1^2/2) + Z_1g + p_1v_1 + Q_1 = u_2 + (C_2^2/2) + Z_2g + p_2v_2 + Q_2 \quad (3-5)$$

وفى مسائل وتمارين الديناميكا الحرارية يمكن اهمال التغير فى طاقه الوضع وبالتالي يمكن رفع القيمه Zg من المعادلة السابقه كما أن مجموع الطاقه الداخليه u + طاقة الضغط pv تعرف بالانثالبي h وبالتالي يمكن الحصول على المعادلة التاليه والتي تستخدم فى حالة السريان المستقر فى حسابات الديناميكا الحراريه

$$h_1 + C_1^2/2 + Q = h_2 + C_2^2/2 + W \quad (3-6)$$

وتسمى معادلة سريان الطاقه المستقر Bernoulli's Equation مع ملاحظة ان الانثالبي هو

$$h = u + pv \quad (3-7)$$

وان معدل سريان الكتله هو

$$m = CA/v = \rho CA \quad (3-8)$$

مثال رقم ٥ :-

فى اسطوانة محرك هواء وجد ان الهواء المضغوط له طاقه داخلية نوعيه مقدارها ٤٢٠ كيلوجول/كيلوجرام عند بداية التمدد ، ٢٠٠ كيلوجول/كيلوجرام بعد نهاية التمدد .
احسب كمية الحرارة المنسابه من أو الى الاسطوانه اذا علمت ان الشغل المبذول بواسطة الهواء خلال التمدد هو ١٠٠ كيلوجول/كجم.

الحل —

باستخدام المعادله التاليه :

$$Q = (u_2 - u_1) + W \quad (3-9)$$

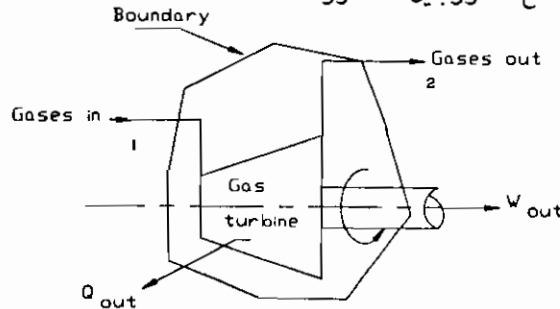
$$\therefore Q = (200 - 420) + 100 \\ = -120 \text{ kJ/kg}$$

∴ تم طرد كمية حرارة من الهواء مقدارها ١٢٠ كيلوجول/كجم (حيث الاشاره سالبه) .

مثال رقم ٦ :

تنساب الغازات خلال توربين غازى بمعدل ١٧ كجم/ث وتنطلق قدرة من التوربين مقدارها ١٤٠٠ كيلوات. قيمة الانثالبي للغازات عند دخولها وخروجها من التوربين هي ١٢٠٠ ك جول/كجم ، ٣٦٠ ك جول/كجم علي التوالي . وسرعة دخول الغازات وخروجها هي ٦٠ م/ث ، ١٥٠ م/ث على التوالي . احسب معدل طرد الحرارة من التوربين .
أوجد ايضا مساحة ماسورة الدخول اذا علمت ان الحجم النوعى للغازات عند الدخول هي ٠.٢ م^٣/كجم.

الشكل الاتي يوضح التوربين المذكور:-



الحلـ

نستخدم معادلة سريان الطاقة المستقر التاليه :-

$$h_1 + C_1^2 / 2 + Q = h_2 + C_2^2 / 2 + W \quad (3-10)$$

يمكن حساب الطاقة الكينتيكية عند الدخول

$$\begin{aligned} C_1^2 / 2 &= (60)^2 / 2 \quad (\text{m/s})^2 (\text{kg/kg}) \\ &= 180 \text{ J/kg} = 1,8 \text{ kJ/kg} \end{aligned}$$

وبالتالى نجد ان الطاقة الكينتيكية عند الخروج $C_2^2 / 2 = 11.25 \text{ kJ/kg}$.

ويمكن حساب الشغل بقسمة الطاقة علي معدل انسياب الكتله

$$W = 14000 + 17 = 823.5 \text{ kJ/kg}$$

والآن بالتعويض فى المعادله (٣-١٠) نجد ان:-

$$1200 + 1.8 + Q = 360 + 11.25 + 823.5$$

$$Q = -7.02 \quad \text{kJ/kg}$$

الاشاره السالبه تعني ان الحراره مطروده ويمكن بضربها فى (m) الحصول

على معدل طرد الحراره أى أن

$$Q = 7.02 \times 17 = 119.3 \text{ kwatt.}$$

وللحصول على مساحة ماسوره الدخول تستخدم المعادله التاليه :

$$m = CA/v$$

اى ان مساحة مقطع ماسوره الدخول هي

$$A = (v) (m) / C$$

$$A = (17 \times 0.5) + 60 = 0.142 \text{ m}^2$$

مثال رقم ٧ :

ينساب هواء انسيابا مستقرا بمعدل ٤ ر. كجم/ث خلال ضاغط هواء ويدخل

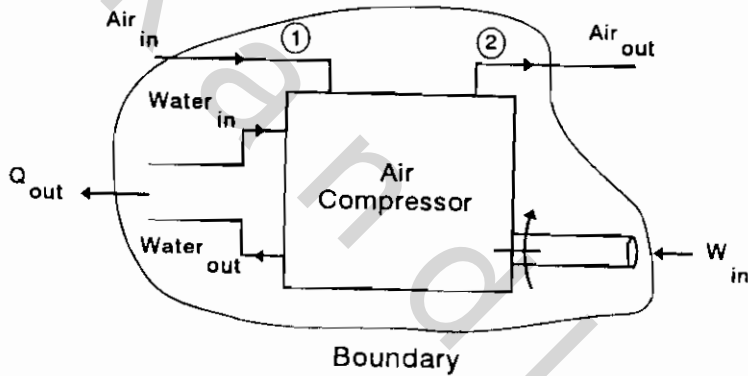
بسرعه ٦ م/ث وضغط ١ بار وحجم نوعى ٨٥ ر. م^٣/كجم ويترك الضاغط بسرعه

٤ م/ث وضغط (٦٩) بار وحجم نوعى ١٦ ر. م^٣/كجم. والطاقة الداخليه النوعيه

للهواء عند تركه الضاغط تزيد ٨٨ ك جول/كجم عن قيمتها عند دخول الضاغط .
يحيط اسطوانة الضاغط غلاف به ماء التبريد يمتص الحرارة من الهواء بمعدل ٥٩ كيلوجول/ثانيه . احسب قدره اللازمه لإدارة الضاغط ومساحة مقطع ماسورة الدخول والخروج .

الحل

يلاحظ أنه يمكن كتابة معادلة السريان بدون احتواء للرمز Z والرسم التخطيطي التالي يوضح الاجراء :-



من معادلة السريان المستقر

$$u_1 + p_1 v_1 + C_1^2 / 2 + Q = u_2 + p_2 v_2 + C_2^2 / 2 + W$$

$$W = (u_1 - u_2) + (p_1 v_1 - p_2 v_2) + \left[\frac{(C_1^2 - C_2^2)}{2} \right] + Q$$

$$W = -[88 \times 1000] + [(1) (10^5) (0.85) - (6.9) (10^5) \times (0.16)]$$

$$+ \left[\frac{(6^2 - 4.5^2)}{2} \right] - [(59/0.4) 1000] = -260892.13 \quad \text{J/kg}$$

$$= -260.9 \text{ kJ/kg}$$

لاحظ ان كمية الحرارة مفقوده ولذا عوض عنها بإشارة سالبيه وتم قسمتها على معدل سريان الكتله لتصبح كمية حرارة/كجم وإشارة الشغل سالبيه لانه بذل علي المائع .

القدرة اللازمه لإدارة الضاغط :

$$\text{Power} = 260.9 \times 0.4 = 104.4 \text{ kJ/s} = 104.4 \text{ kW}$$

مساحة مقطع ماسورة الدخول (A₁) :

$$m = C_1 A_1 / v_1$$

$$A_1 = \frac{m \cdot v_1}{C_1} = \frac{0.4 \times 0.85}{6} = 0.057 \text{ m}^2$$

مساحة مقطع ماسورة الخروج (A₂) :

$$m = C_2 A_2 / v_2$$

$$A_2 = \frac{m \cdot v_2}{C_2} = \frac{0.4 \times 0.16}{4.5} = 0.014 \text{ m}^2$$

الغاز التام The perfect gas

الغاز التام هو غاز مثالي ينطبق عليه القانون العام للغازات تماما حيث عمليا لا يوجد غاز يتبع هذا القانون تماما ولكن الكثير من الغازات تقترب من هذا القانون والقانون العام للغازات يكتب بالصيغه التاليه :

$$PV = mRT \quad (3.11)$$

حيث P ضغط الغاز ، V حجم الغاز ، m كتلة الغاز ، T درجة حرارة الغاز المطلقة ، R فيعرف بالثابت النوعى للغاز . ويلاحظ ان تلك المعادله تجمع خواص الغاز المختلفه عند حالة state معينه .

والثابت النوعي للغاز R وحداته كيلوجول/كجم كلفن وهو يساوي حاصل
قسمة الثابت العام للغازات على الوزن الجزيئي للغاز (الكتلة المولية) والثابت العام
للغازات يرمز له بالرمز R_0 وهو قيمة ثابتة لجميع الغازات إلا أنه يتوقف على
الوحدات المعبره عنه ونجد أن قيمته في وحدات S.I هي :-

$$R_0 = 8.3144 \text{ kJ/kg mol.K}$$

مثال رقم ٨ :

وعاء ذو حجم ٢ م^٣ يحتوى غاز النيتروجين عند ضغط ١٢.٠ بار ودرجة
حرارة ١٥° م. تم إضافة ٢ ر. كجم غاز نيتروجين للوعاء ، احسب الضغط الجديد فى
الوعاء عندما تعود درجة حرارة الوعاء الى الدرجة الاصلية ، الكتلة المولية لغاز
النيتروجين هي ٢٨ كجم/كيلومول.

الحل _____

يمكن حساب R للنيتروجين حيث :-

$$R = R_0/M = 8.3144/28 = 0.2969 \text{ kJ/kg K}$$

من المعادلة العامة للغازات يمكن معرفة كتلة النيتروجين حيث :

$$P_1 V_1 = m_1 R T_1$$

$$(1.013 \times 10^5) (0.2) = m_1 (0.2969) (1000) (15 + 273)$$

$$\therefore m_1 = 0.237 \text{ kg}$$

بعد اضافة النيتروجين تصبح الكتلة النهائيه m_2

$$\therefore m_2 = 0.237 + 0.2 = 0.437 \text{ kg.}$$

بتطبيق المعادلة العامة للغازات يمكن حساب الضغط النهائى للنيتروجين
كما يلى :-

$$P_2 V_2 = m_2 R T_2$$

$$(P_2 \times 10^5) (0.2) = (0.437) (0.2969) (1000) (15 + 273)$$

$$P_2 = 1.868 \text{ bar}$$

الحرارة النوعية للغازات Specific heat of gases

يوجد لكل غاز قيمتان للحرارة النوعية أحدهما تعرف بالحرارة النوعية تحت ضغط ثابت c_p والاخرى تعرف بالحرارة النوعية تحت حجم ثابت c_v .

وبالتالى عند تسخين غاز ما من درجة حرارة T_1 الى درجة حرارة T_2 فان كمية الحرارة التي تنساب اليه فى اجراء انعكاسى تحت ضغط ثابت هى :-

$$Q = m c_p (T_2 - T_1) \quad (3-12)$$

وفى حالة اجراء انعكاسى تحت حجم ثابت هى :-

$$Q = m c_v (T_2 - T_1) \quad (3-13)$$

قانون جول Joule's Law :-

يقرر قانون جول ان الطاقة الداخلية لغاز (U) دالة لدرجة الحرارة المطلقه للغاز ولتقدير تلك الداله نعتبر انه تم تسخين الكجم غاز تحت حجم ثابت وبالتالى يمكن تطبيق معادلة عدم السريان والتعويض عن dW بالقيمه صفر نظرا لثبات الحجم أى أن

$$(dW = \text{Zero})$$

$$dQ = dU + dW$$

$$dQ = dU$$

وسبق ان اوضحنا انه عند تسخين الغاز تحت حجم ثابت فان

$$Q = m c_v (T_2 - T_1)$$

لذلك فان :-

$$dQ = dU = m c_v dt \quad (3-14)$$

وباجراء التكامل فانه

$$U = m c_v T + K \quad (3-15)$$

حيث K ثابت التكامل ولكن من قانون جول الطاقة الداخلية دالة للحرارة المطلقه أى ان العلاقه بينهما خطيه وعندما تمر بنقطة أصل (صفر ، صفر) فان K تصبح قيمتها صفر ولقد اعتبر ان قيمة U صفر عند درجة حرارة الصفر المطلق ولذا فالمعادله الأخيره (3-15) تصبح :-

$$U = m c_v T \quad (3-16)$$

وبالتالى فالتغير فى الطاقة الداخليه تحسب كما يلى :-

$$U_2 - U_1 = m c_v (T_2 - T_1) \quad (3-17)$$

العلاقة بين قيمتى الحرارة النوعيه لغاز :-

عند تسخين ١ كجم غاز من درجة حرارة T_1 الى درجة حرارة T_2 تحت ضغط

ثابت فان كمية الحواره المنسابه الى الغاز هي :-

$$Q = m c_p (T_2 - T_1) \quad (3-18)$$

وبتطبيق معادلة عدم السريان نجد أن :-

$$Q = (U_2 - U_1) + W \quad (3-19)$$

وسبق ان اوضحنا ان :-

$$(U_2 - U_1) = m c_v (T_2 - T_1) \quad (3-20)$$

ويمكن حساب الشغل عند ضغط ثابت كما يلى :-

$$W = p (V_2 - V_1) \quad (3-21)$$

$$= mR (T_2 - T_1) \quad (3-22)$$

مما سبق نجد ان :

$$m c_p (T_2 - T_1) = m c_v (T_2 - T_1) + mR (T_2 - T_1) \quad (3-23)$$

وبالتالى فان :

$$c_p = c_v + R \quad (3-24)$$

or

$$R = c_p - c_v \quad (3-25)$$

الانثالبى للغاز التام :-

سبق أن عرفنا ان الانثالبى هو مجموع الطاقة الداخليه وطاقة الضغط أى

ان :-

$$H = U + PV \quad (3-26)$$

$$= m c_v T + mRT$$

$$= mT (c_v + R)$$

$$c_p = c_v + R \quad \text{ولكن :}$$

لذلك فان :

$$H = m c_p T \quad (3-27)$$

النسبة بين الحرارتين النوعيتين للغاز :-

يطلق على النسبة بين الحرارة النوعية تحت ضغط ثابت والحرارة النوعية

تحت حجم ثابت الرمز جاما γ أى أن

$$\gamma = c_p / c_v \quad (3-28)$$

ويمكن الوصول الى المعادلات التالية :

$$c_v = R / (\gamma - 1) \quad (3-29)$$

$$c_p = \gamma R / (\gamma - 1) \quad (3-30)$$

مثال رقم ٩ :

وجد ان ٠.١ كجم غاز تام معين تشغل حجم مقداره ٢.٠٠٢ م^٣ عند ضغط ٧

بار ودرجة حرارة ١٢١°م . احسب الكتلة المولية للغاز .

إذا تعدد الغاز الى ضغط ١ "بار" وحجم ٢.٠٢ م^٣ . احسب درجة الحرارة النهائية .

الحل

باستخدام المعادلة العامة للغازات والتطبيق فى الظروف الابتدائية يمكن

حساب قيمة الثابت النوعى للغاز (R) كما يلى مع ملاحظة أن :

$$T_1 = 131 + 273 = 404 \text{ K}$$

$$P_1 V_1 = m R T_1$$

$$R = P_1 V_1 / m T_1$$

$$R = (7 \times 10^5 \times 0.003) / (0.01 \times 404) = 520 \text{ J/kg.K}$$

وباستخدام المعادلة التالية يمكن حساب الكتلة المولية للغاز M

$$R = R_0 / M$$

$$M = R_0 / R$$

$$\therefore M = 8314 / 520 = 16 \text{ kg/kg mol}$$

بالتطبيق فى المعادلة العامة للغازات فى الظروف النهائية يمكن حساب درجة

الحرارة النهائية كما يلى :-

$$P_2 V_2 = m R T_2$$

$$T_2 = P_2 V_2 / m R$$

$$\therefore T_2 = (1 \times 10^5 \times 0.02) + (0.01 \times 520) = 384.5 \text{ K}$$

$$= 384.5 - 273 = 111.5 \text{ }^\circ\text{C}$$

مثال رقم ١٠ :

غاز تام معين حرارته النوعية كما يلي :

$$c_p = 0.846 \text{ kJ/kg K}$$

$$c_v = 0.657 \text{ kJ/kg K}$$

احسب الثابت النوعي للغاز والكتلة المولية للغاز

الحلــــــــــــــــ

$$R = c_p - c_v = 0.189 \text{ kJ/kg K}$$

$$R = R_0 / M$$

$$\therefore M = R_0 / R = 8.314 / 0.189 = 44 \text{ kg/k mol}$$

مثال رقم ١١ :

غاز تام له كتله موليه ٢٦ كجم/ك مول وقيمة $\gamma = 1.26$ احسب الحراره المطروده لكل ١ كجم غاز اذا :-

أ- الغاز موجود فى وعاء صلب عند ضغط ٢ (بار) ودرجة حرارة 310°C وتم تبريده حتى ضغط 10^5 بار .

ب- دخل الغاز ماسورة على درجة حرارة 280°C وينساب مستقرا الى الطرف الاخر للأنبوبة حيث درجة حرارته 20°C . مع اهمال التغير فى السرعه عند الدخول والخروج .

الحلــــــــــــــــ

$$R = R_0 / M = 0.3198 \text{ kJ/kg K}$$

$$c_v = R / (\gamma - 1) = 1.229 \text{ kJ/kg K}$$

$$c_p = \gamma R / (\gamma - 1) = 1.548 \text{ kJ/kg K}$$

أ- يمكن حساب درجة الحرارة النهائية بالتطبيق في المعادلة العامة للغازات عند الحالة الابتدائية ثم عند الحالة النهائية مع ملاحظة ان الحجم ثابت :-

$$p_1 v_1 = mRT_1 \quad p_2 v_2 = mRT_2 \quad \therefore p_2 / p_1 = T_2 / T_1$$

$$\therefore T_2 = 294 \text{ K}$$

∴ الحرارة المطروحة من كل ١ كجم غاز يتم حسابها كما يلي :-

$$Q = m c_v (T_2 - T_1)$$

$$= (1) (1.229) (294 - 488) = -361 \text{ kJ/kg}$$

الاشارة سالبة لان الحرارة مطروحة

ب- بتطبيق معادلة السريان

$$h_1 + C_1^2 / 2 + Q = h_2 + C_2^2 / 2 + W$$

وباهمال السرعات ، وعدم وجود شغل ينتج ان :

$$h_1 + Q = h_2$$

$$\therefore Q = h_2 - h_1 \quad \therefore h = c_p T$$

$$\therefore Q = c_p (T_2 - T_1) = -403 \text{ kJ/kg}$$

الاجراءات الانعكاسيه Reversible processes

١- الاجراء تحت حجم ثابت :-

$$Q = (u_2 - u_1) + W$$

من معادلة عدم الانسياب وبالتعويض عن الشغل بصفر حيث لا يوجد شغل لعدم تغير الحجم عند ثبات الحجم

$$\therefore Q = U_2 - U_1 \quad (3-31)$$

٢- الاجراء تحت ضغط ثابت :-

$$Q = (U_2 - U_1) + W$$

$$W = p (v_2 - v_1) \quad \text{ومن معادلة حساب الشغل}$$

$$\therefore Q = (U_2 - U_1) + p (v_2 - v_1)$$

عند ثبات الضغط

$$Q = h_2 - h_1 \quad (3-32)$$

٢- الاجراء عند درجة حرارة ثابتة .

من معادلة عدم السريان

$$Q = (U_2 - U_1) + W$$

عند ثبات درجة الحرارة لا يوجد تغير في الطاقة الداخلية

$$\therefore Q = W = \int p dv \quad (3-33)$$

من المعادلة العامة للغازات مع ثبوت درجة الحرارة يمكن اجراء التكامل

والوصول الي :

$$W = pv \ln (v_2 / v_1) \text{ or } W = mRT \ln (v_2 / v_1) \quad (3-34)$$

ويمكن بالتعويض عن v_2 / v_1 بالقيمة p_1 / p_2

٤- الاجراء الادياباتيكي عند عدم السريان

يعرف الاجراء الادياباتيكي بأنه الاجراء الذي يتم عندما يكون النظام معزولا

عزلا جيدا وبالتالي لا تتسرب أية كمية حرارة من وإلى النظام .

ومن معادلة عدم السريان بالتعويض عن Q بالصفر ينتج ان :-

$$Q = (U_2 - U_1) + W \quad (3-35)$$

تحت الظروف الادياباتيكية

$$W = U_1 - U_2 \quad (3-36)$$

ويمكن رياضيا الوصول إلى المعادلة التالية اذا علمنا ان معادلة الاجراء هي :

$$pv^\gamma = \text{Constant}$$

$$W = (p_1 v_1 - p_2 v_2) / (\gamma - 1) \quad (3-37)$$

كما يمكن الحصول على الصيغة التالية :-

$$T_1 / T_2 = (p_1 / p_2)^{(\gamma - 1) / \gamma} \quad (3-38)$$

٥- الاجراء البولتروبي :-

لقد وجد عمليا ان العديد من الاجراءات تقترب من اجراء انعكاسي تبعا

للمعادلة ($pv^n = C$) حيث n رقم ثابت بخلاف رقم γ المشار اليها من

قبل في الإجراء الادياباتيكي ويمكن الحصول على المعادلة التالية لحساب

الشغل في حالة الإجراء الانعكاسي البولتروبي :-

$$W = (p_1 v_1 - p_2 v_2) / (n - 1) \quad (3-39)$$

ويمكن الوصول للعلاقة :

$$T_1 / T_2 = (p_1 / p_2)^{(n-1)/n} \quad (3-40)$$

ويجب ملاحظة انه فى هذا الاجراء قد يضاف طاقة الى النظام او قد يفقد طاقة من النظام ولذلك فانه يمكن الوصول الى المعادلة التالية :-

$$Q = [(\gamma - n) / (\gamma - 1)] W \quad (3-41)$$

وهى توضح العلاقة بين الشغل والطاقة وقيمة γ و"n" والشغل يكون موجبا اذا كان الاجراء تمدد وعندئذ قد تكون قيمة n أكبر من γ وبالتالي فالجانب الايمن من المعادلة تصبح قيمته سالبه اي ان قيمة Q سالبه وهذا يعنى ان النظام فقد طاقة اما فى حالة ان تكون قيمة 'n' أصغر من γ وبالتالي فالجانب الايمن من المعادلة تصبح قيمته موجب أي ان قيمة Q موجب وهذا يعنى ان النظام اكتسب طاقة . ويمكن الوصول الى عكس هذا الاستنتاج فى حالة مايكون الاجراء انضغاط وبالتالي قيمة الشغل سالبه .

الإجراءات اللانعكاسية Irreversible processes

سبق تعريف اللانعكاسية وهى عادة ماتتم فى حالة التمدد الحر Free Expansion وفيها نجد ان الطاقة الداخليه لاتتغير عند مايتم اجراء عزل جيد للنظام وان درجة الحرارة فى النهاية تكون مماثله للبدايه الا اننا يمكن ان نطلق عليه اجراء ايزوثرمالى الا انه عند تطبيق القانون العام للغازات فنجد ان $P_1 V_1 = P_2 V_2$.

كذلك نجد مثال آخر لاجراء اللانعكاسية وهى ماتعرف بالـ Throttling وفيها لاتتغير الانثالبى عند اجراء عزل النظام عزلا حراريا جيدا ولذلك تكون درجة الحرارة فى النهاية مماثله للبدايه للغازات التامة .

الاجراءات الانسيابية اللانعكاسية :-

بالرغم من أنه عادة ماتكون الإجراءات الانسيابية من الوجهه العمليه اجراءات لانعكاسيه الا انه احيانا مايكون مناسبا افتراضها انعكاسية ويمكن من

معادلة سريان الطاقة المستقر الوصول للمعادله التاليه لحساب الشغل فى حالة اجراء انسيابى انعكاسى ادياباتيكى .

$$W = (h_1 - h_2) + [(C_1^2 - C_2^2) / 2] \quad (3-42)$$

امثله حسابيه

مثال رقم ١٢ :

كمية من الهواء مقدارها ٠.٥ ر. كجم سخنت عند ضغط ثابت مقدارها ٢ "بار" حتي اصبح الحجم ٠.٦٥٨ ر. م^٣ . احسب كمية الحرارة المضافه والشغل المبذول مع العلم بأن درجة الحرارة فى البدايه ١٣٠ م°.

الحل

$$T_2 = p_2 v_2 / m R = 2 \times 10^5 \times 0.0658 / (0.05 \times 0.287 \times 10^3) \\ = 917 \text{ K}$$

كمية الحرارة المضافه تحت ضغط ثابت نتجت من المعادله

$$Q = m c_p (T_2 - T_1) = 0.05 \times 1.005 (917 - 403) \\ = 25.83 \text{ kJ}$$

الشغل المبذول يحسب كمايلى :-

$$W = p (v_2 - v_1) \\ = m R (T_2 - T_1) = 0.05 \times 0.287 \times 514 = 7.38 \text{ kJ}$$

مثال رقم ١٢ :-

كمية من النيتروجين كتلتها ١ كجم (الكتله المولييه ٢٨ كجم/كيلو مول) ضغطت انعكاسيا ايزوثرماليا من ضغط مقدارها ١.٠١ "بار" ودرجة حرارة ٢٠ م° الى ضغط ٤.٢ "بار" بفرض ان النيتروجين غاز تام احسب الشغل المبذول والحراره المنسابه اثناء الاجراء .

الحل

$$R = R_0 / M = 8314 / 28 = 0.297 \text{ kJ/kg K}$$

$$W = RT \ln (p_1 / p_2) = -124 \text{ kJ/kg}$$

الحرارة المناسبة تحسب كمايلي :-

$$Q = W = -124 \text{ kJ/kg}$$

مثال رقم ١٤ :-

هواء عند ضغط ١.٠٢ بار ودرجة حرارة ٢٢°م يشغل اسطوانة حجمها ١٥.٠ م^٣ . تم ضغطها انعكاسيا ادياباتيكا بواسطة ضاغط حتي ضغط ٦.٨ بار . احسب درجة الحرارة والحجم في النهاية والشغل المبذول وكتلة الهواء . .

الحل

$$T_1/T_2 = (p_1/p_2)^{(\gamma-1)/\gamma}$$

$$\therefore T_2 = 507.5 \text{ K}$$

$$\therefore T_2 = 507.5 - 273 = 234.5 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$p_1 v_1 = p_2 v_2$$

$$v_2 = 0.00388 \text{ m}^3$$

$$W = U_1 - U_2 = c_v (T_1 - T_2) = -152.8 \text{ kJ/kg}$$

$$m = p_1 v_1 / RT = 0.0181 \text{ kg}$$

مثال رقم ١٥ :-

ضغط ١ كجم من غاز تام من ضغط ١ بار ودرجة حراره ٢٧°م الي ضغط ٦.٨ بار تبعا للمعادله $pV^{1.3} = \text{cons.}$. احسب كمية الحرارة المناسبة من أو إلى جدران الاسطوانة في الحالات الآتية :-

أ- الغاز ايثان $c_p = 2.10 \text{ kJ/kg.}^{\circ}\text{C}$, $m = 30 \text{ kg/ K mol}$

ب- الغاز ارجون $c_p = 0.52 \text{ kJ/kg.}^{\circ}\text{C}$, $m = 40 \text{ kg/ K mol}$

الحل

$$T_1/T_2 = (p_1/p_2)^{(n-1)/n}$$

$$\therefore T_2 = 453.6 \text{ K}$$

أ- فى حالة الايثان :- $R = 8.314/30 = 0.277 \text{ kJ/kg K}$

$$R = c_p - c_v$$

$$\therefore c_v = 1.823 \text{ kJ/kg K}$$

$$\therefore \gamma = c_p / c_v = 1.152$$

$$W = R (T_1 - T_2) / (\gamma - 1) = -141.8 \text{ kJ/kg}$$

$$Q = [(\gamma - n) / (\gamma - 1)] W = +138.1 \text{ kJ/kg}$$

ب- فى حالة الأرجون :

$$R = 8.314/40 = 0.208 \text{ kJ/kg K}$$

$$R = c_p - c_v \therefore c_v = 0.312 \text{ kJ/kg K}$$

$$\gamma = c_p / c_v = 1.667$$

$$W = R (T_1 - T_2) / (\gamma - 1) = -106.5 \text{ kJ/kg}$$

$$Q = [(\gamma - n) / (\gamma - 1)] W = -58.6 \text{ kJ/kg}$$

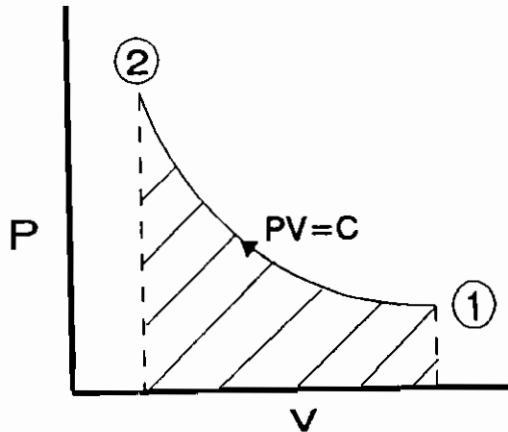
مثال رقم ١٦ :-

ضغط ١ كجم من النيتروجين (الكتلة المولية ٢٨ كجم/ك مول) انعكاسيا مع

ثبوت درجة الحرارة من ١٠.١ "بار" ، ٢٠.٥ "بار" الى ٤٢ "بار"

احسب الشغل المبذول والحرارة المناسبة اثناء الاجراء . افترض ان غاز

النيتروجين غاز تام .



الحل

يتم حساب R للنيتروجين كما يلي:

$$R = R_0 / M = 8.314 / 28 = 0.297 \text{ kJ/kg}$$

الشكل السابق يوضح الاجراء ونلاحظ أن اتجاهه من اليمين الى اليسار لذلك فان الشغل المبذول سالب حيث ان الشغل مبذول على الغاز ويمكن حسابه من المعادلة التالية :

$$W = RT \ln (p_1 / p_2)$$

$$= 0.297 \times 293 \times \ln \frac{1.01}{4.2}$$

$$= -124 \text{ kJ/kg}$$

ولما كان الاجراء تحت درجة حرارة ثابتة $\therefore W = Q$

اي ان الحرارة تم طردها $Q = -124 \text{ kJ/kg}$

مثال رقم ١٧ :-

كمية من الهواء عند ضغط ١.٢ بار ، درجة حرارة ٢٢°م تشغل اسطوانة وله حجم ابتدائي ٠.١٥ م^٣ تم ضغط الهواء انعكاسيا وادياباتيكيا بواسطة ضاغط الى ضغط ٨ بار "بار" احسب درجة الحرارة النهائية ، الحجم النهائي ، الشغل المبذول على الهواء في الاسطوانة .

الحل

من المعادلة

$$T_1 / T_2 = (p_1 / p_2)^{(\gamma - 1) / \gamma}$$

يمكن حساب درجة الحرارة النهائية (T₂)

$$\therefore T_2 = 507.5 \text{ K}$$

ومن المعادلة

$$(p_1 / p_2) = (v_2 / v_1)$$

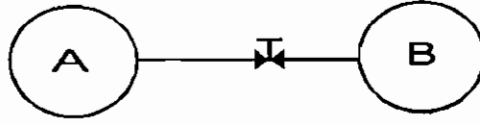
يمكن حساب الحجم النهائي (v₂)

$$\therefore v_2 = 0.00388 \text{ m}^3$$

ويمكن حساب الشغل المبذول من المعادلة :

$$W = (p_1 v_1 - p_2 v_2) / (\gamma - 1) = 2.77 \text{ kJ}$$

مثال رقم ١٨ :



فى الشكل السابق يحتوى الوعاء A على كمية من الهواء تحت ضغط ٢٠ "بار" وحجم ٢ م^٣ وفتح الصمام (x) وتمدد الهواء لشغل الحيز فى الوعاءين A,B اذا كان الوعاء (B) له نفس حجم الوعاء (A) احسب الضغط النهائي للهواء ؟

الحلــــــــــــــــ

عندما يتمدد الغاز التام تمدد حر فان درجة الحرارة الابتدائية T_1 = درجة الحرارة النهائية T_2 ولذلك بتطبيق العلاقة
يتم حساب الحجم النهائي (v_2)

$$v_2 = v_A + v_B = 1 + 1 = 2 \text{ m}^3$$

$$\therefore p_2 = p_1 v_1 / v_2 = 10 \text{ bar}$$

مثال رقم ١٩ :

توربين غازى يستقبل الغازات من غرفة احتراق عند ضغط ٧ "بار" ودرجة حراره ٦٥٠°م وبسرعة ٩ متر/ث. الغازات تترك التوربين عند ضغط ١ بار وبسرعة ٤٥٠م/ث. افترض ان التمدد ادياباتيكي انعكاسى . احسب الشغل المبذول لكل ١ كجم غاز . اعتبر ان قيمة $\gamma = 1.222$ ، $c_p = 1.11 \text{ ك جول/كجم كلفن}$.

الحلــــــــــــــــ

وباستخدام معادلة الانسياب لاجراء ادياباتيكي

$$W = (h_1 - h_2) + [(C_1^2 - C_2^2) / 2]$$

وبالتعويض عن h من المعادلة

$$h = c_p T$$

نحصل على

$$W = c_p (T_1 - T_2) + [(C_1^2 - C_2^2) / 2]$$

يتم حساب T_2 من المعادلة

$$T_1 / T_2 = (P_1 / P_2)^{1/\gamma}$$

$$\therefore T_2 = 567 \text{ K} \quad \text{فنجد ان}$$

$\therefore$ بالتعويض في معادلة الشغل نجد ان

$$W = 394.2 \text{ kJ/kg}$$

مثال رقم ٢٠ :-

خزان هواء حجمه ٣م^٦ وضغطه ١٥ بار ودرجة حرارته ٤٠٠°م فتح صمام التحكم وسمح لجزء من الهواء للأنسياب الى الجو الخارجى . ثم قفل الصمام حيث انخفض الضغط الى ١٢ بار . احسب كمية الهواء المتسربة من الخزان .

الحل

يمكن حساب كتلة الهواء فى البدايه m من المعادلة العامه للغازات كمايلي:

$$m = pv/RT = 100 \text{ kg}$$

بفرض ان العملية تحت اجراء ادياباتيكي يمكن الحصول على درجة الحرارة النهائية T من المعادلة :

$$(T/T') = (P/P')^{(\gamma-1)/\gamma}$$

$$\therefore T' = 294.2 \text{ K}$$

$\therefore$ يمكن حساب كتلة الهواء المتبقيه (m') من المعادلة العامه للغازات كمايلي :

$$m' = pv/RT' = 85.3 \text{ kg}$$

$$\therefore m = 100 - 85.3 = 14.7 \text{ kg}$$

مسائل عامة

أولاً : تعاريف على مقدمة الديناميكا الحرارية
حساب الشغل

١- تحتوي اسطوانة على مانع تحت مكبس عند ضغط ١٠ بار اذا علمت ان الحجم الابتدائي لهذا المانع ٥.٠ م^٣. احسب الشغل المبذول بواسطة المانع عند تمدده انعكاسيا فى الحالات الاتيه :-

- أ- عند ضغط ثابت الى حجم نهائي ٢.٠ م^٣
- ب- تبعا لعلاقة خطيه الي حجم نهائي ٢.٠ م^٣ وضغط نهائي ٢ بار
- ج- تبعا للمعادله $(PV^{1.2} = \text{Constant})$ الى حجم نهائي ٠.١ م^٣
- د- تبعا للمعادله $(PV^{1.2} = \text{Constant})$ الى حجم نهائي ٠.٦ م^٣
- هـ- تبعا للمعادله $[p = (A/V^2) - (B/V)]$ الى حجم نهائي ٠.١ م^٣ وضغط نهائي ١ بار مع العلم ان B , A ثوابت .
وضح جميع الاجراءات برسم تخطيطي بين الضغط والحجم.

[الاجابه :- أ (١٥٠٠٠) ، ب (٩٠٠٠) ، جـ (٢٤٦٥٧) ، د (٧٦٣٩) ، هـ (١٩٢٠٦) نيوتن. متر].

٢- مانع كتلته ١ كجم تم ضغطه انعكاسيا تبعا للمعادله $(pv = 0.25)$ حيث "p" الضغط معبرا عنه بوحدات "بار" و "v" هى الحجم النوعى معبرا عنها بوحدات م^٣/كجم. الحجم النهائي مساويا ١/٤ الحجم الابتدائي .
المطلوب : حساب الشغل المبذول على المانع مع توضيح الاجراء برسم تخطيطي للعلاقة بين الضغط والحجم [الاجابه : ٢٦٥٧ نيوتن. متر].

٣- تحتوي اسطوانه على ٥.٠ م^٣ غاز تحت مكبس عند ضغط ٦.٩ بار تعدد هذا الغاز انعكاسيا تبعا للمعادله $P.V^{1.2} = \text{Constant}$ حتي وصل الحجم ٠.٨ م^٣
احسب الشغل المبذول بواسطة الغاز مع توضيح الاجراء برسم تخطيطي يبين العلاقة بين الضغط والحجم [الاجابه : ١٥٤٧٦ نيوتن. متر]

٤- تعدد ١ كجم مائع انعكاسيا تبعا لعلاقة خطيه من ضغط ٤ر٢ "بار" الى ١ر٤ "بار" وكان الحجم الابتدائي ٢م.٠٠٤ والحجم النهائي ٢م.٠٢. بعد ذلك تم تبريد المائع انعكاسيا تحت ضغط ثابت. وفي النهاية تم ضغطه انعكاسيا تبعا للمعادله $pV = \text{Constant}$ حتي وصل الى نقطة البدايه حيث الضغط ٤ر٢ "بار" والحجم ٢م.٠٠٤. احسب الشغل المبذول في كل اجراء محدد اذا كان الشغل مبذول بواسطة المائع أو عليه. احسب الشغل الصافي للدوره. وضح الاجراءات المختلفه على رسم تخطيطي يوضح العلاقة بين الضغط والحجم.

[الاجابه : ٤٤٨٠ ، -١١٢ ، -١٨٤٦ ، ١٥١٤ نيوتن.متر]

٥- مائع حجمه ٢م.٠٩ وضغطه ٢ر٧ بار تم ضغطه انعكاسيا الى ضغط ٢ر٥ بار تبعا للمعادله $PV^n = \text{Constant}$. ثم سخن الغاز انعكاسيا تحت حجم ثابت حتي ضغط ٤ "بار" وكان الحجم النوعي عندئذ ٢م.٠٥/كجم. تم اعاده المائع إلي حالته الاصليه بتمده انعكاسيا تبعا للمعادله $(pV^2 = \text{Constant})$. احسب كتلة هذا المائع ، وقيمة "n" في الاجراء الاول ، والشغل الصافي الذي بذل بواسطة المائع أو عليه في تلك الدوره. ارسم رسم تخطيطي للدوره يوضح العلاقة بين الضغط والحجم.

[الاجابه : ٧٥٣.٠ كجم ، ١ر٨٤ ، ٨٥٤ نيوتن.متر]

٦- سخن مائع انعكاسيا تحت ضغط ثابت ١ر٠٥ "بار" حتي أصبح حجمه النوعي ١ر٠٢م.٠/كجم. عندئذ ضغط انعكاسيا تبعا للمعادله $(pV = \text{Constant})$ حتي صار الضغط ٤ر٢ بار ، ثم سمح له بالتمدد انعكاسيا تبعا للمعادله $(pV^{1.3} = \text{Constant})$ ، وفي النهاية تم تسخينه تحت حجم ثابت ليعود الي حالته الاصليه. ولقد وجد ان الشغل المبذول في الاجراء عند ثبات الضغط ١٥ نيوتن.متر وكتلة المائع ٢ر٠ كجم. احسب الشغل الصافي المبذول بواسطة المائع أو عليه في تلك الدوره ارسم رسم تخطيطي يوضح العلاقة بين الضغط والحجم.

[الاجابه : -٤٢٢ نيوتن.متر].

ثانياً : تعاريف على الإجراءات الانعكاسيه والانعكاسيه

- ١- وعاء صلب يحتوى على ١ كجم هواء عند ضغط ٨ بار ودرجة حرارة ١٥٠°م. تم تسخين الوعاء حتى ارتفعت درجة الحرارة الى ٢٠٠°م. احسب الضغط النهائي فى الوعاء وكمية الحرارة المضافه اثناء عملية الاجراء .
[الاجابه : ٢٧ بار ، ٢٥٩ كيلوجول/كجم].
- ٢- تمدد الاكسجين (الكتله المولييه ٢٢ كجم/ك.مول) انعكاسيا فى اسطوانة خلف مكبس مع ثبات الضغط ومقداره ٢ بار . الحجم الابتدائي ١ ر.م.٢ وأصبح فى النهايه ٢ ر.م.٢. درجة الحرارة الابتدائية ١٧°م. احسب الشغل المبذول بواسطة الاكسجين وكمية الحرارة من او إلى جدران الاسطوانه اثناء عملية التمدد. افترض ان الاكسجين غاز تام وله $C_p = ١٧.٩$ كيلوجول/كجم كلفن .
[الاجابه : ٦ كيلوجول ، ٢١١٦ كيلوجول].
- ٣- غاز تام حجمه ٥ ر.م. مكعب عند ضغط ٢٢ بار ينخفض ضغطه الى ١٠.٥ بار فى اجراء انعكاسى مع ثبوت درجة الحرارة . احسب كمية الحرارة المنسابه من او الى الغاز .
[الاجابه : ٥٦٤٤ كيلوجول]
- ٤- تم ضغط ١ كجم من الهواء انعكاسيا وتحت درجة حرارة ثابتة مقدارها ٢٠°م من ضغط ١ بار . احسب الشغل المبذول على الهواء وكمية الحرارة المنسابه من او الى الهواء .
[الاجابه : ١٢٩٩٦ كيلوجول/كجم ، - ١٢٩٩٦ كيلوجول/كجم].
- ٥- كمية هواء كتلتها ١ كجم عند ضغط ١ بار ودرجة حرارة ١٥°م. ضغطت انعكاسيا وادياباتيكيا حتى ضغط ٤ بار . احسب درجة الحرارة النهائية والشغل المبذول على الهواء .
[الاجابه : ١٥٥°م ، ١٠٠ كيلوجول/كجم]

٦- تمدد النيتروجين (الكتلة المولية ٢٨ كجم/ك.مول) انعكاسيا في اسطوانة معزولة حراريا تماما من ضغط ٣ر٥ "بار"، درجة حرارة ٢٠٠°م الى حجم ٩ر٠م. اذا علمت ان الحجم الابتدائي ٣ر٠م. احسب الشغل المبذول اثناء عملية التمدد. افترض ان غاز النيتروجين غاز تام وله $c_p = ٧٤١$ ر. كيلوجول/كجم كلفن.
[الاجابه : ٩٣١ كيلوجول]

٧- ضغط غاز تام معين انعكاسيا من ضغط ١ "بار"، ١٧°م الى ضغط ٥ "بار" في اسطوانة معزولة حراريا تماما. درجة الحرارة النهائية ٧٧°م. الشغل المبذول على الغاز اثناء الانضغاط ٤٥ ك. جول/كجم. احسب قيمة γ ، c_v ، R والوزن الجزيئي النسبي للغاز.
[الاجابه: ١٣٢، ٧٥ ر. كيلوجول/كجم كلفن، ٩٩ ر. كيلوجول/كجم كلفن، ٨٤]

٨- كمية هواء مقدارها ١ كيلو جرام عند ضغط ١ر٠٢ بار ودرجة حرارة ٢٠°م تم ضغطها انعكاسيا تبعا للمعادلة ($p v^{1.3} = \text{constant}$) الى ضغط ٥ر٥ "بار". احسب الشغل المبذول على الهواء وكمية الحرارة المنسابة من او الي جدران الاسطوانة اثناء الانضغاط.
[الاجابه: ١٣٣ر٥ كيلوجول/كجم، ٣٣ر٢٨ كيلوجول/كجم]

٩- ضغط غاز الاكسجين (الكتلة المولية ٣٢ كجم/ك.مول) انعكاسيا وبولي تروبيكالي في اسطوانة من ١ر٠٥ "بار"، ١٥°م الى ٤ر٢ "بار" بطريقة ما بحيث يتم طرد ٣/١ الشغل المضاف علي صورة حرارة الي جدران الاسطوانة احسب درجة الحرارة النهائية للاكسجين بفرض ان الاكسجين غاز تام وله $c_v = ٦٤٩$ ر. كيلو جول/كجم كلفن.

[الاجابه: ١١٣°م]

١٠- كمية من غاز ثاني اكسيد الكربون مقدارها ٥ر٠ كجم (الكتلة المولية ٤٤ كجم/ك.مول) تشغل حجم ٣ر٠ متر مكعب عند ضغط ١ر٠٢٥ "بار". تم ضغطها انعكاسيا حتي ضغط ٦ر١٥ "بار". احسب درجة الحرارة النهائية، الشغل المبذول على الغاز، كمية الحرارة المنسابة من او الي جدران الاسطوانة.

- أ- عندما يتم الأجراء تبعا للمعادله $(pv^{1.4} = \text{constant})$.
- ب- عندما يتم الأجراء مع ثبوت درجة الحرارة .
- ج- عندما يتم الأجراء فى اسطوانة معزولة حراريا تماما .
- افرض ان غاز ثاني اكسيد الكربون غاز تام واعتبر $\gamma = 1.3$.
- [الاجابه: 270°م ، 128°ره كيلوجول ، 1713°ره كيلوجول ، 26°م ، 51°ره كيلوجول ، -51°ره كيلوجول ، 219°م ، 25°ره كيلوجول ، صفر كيلوجول]
- ١١- هواء عند ضغط 6.9 "بار" ، درجة حرارة 260°م تم خنقه لضغط 5 "بار" قبل تمده خلال فوهة خرطوم الى ضغط 1.1 "بار" افترض ان الهواء ينساب انعكاسيا انسياباً مستقر خلال فوهة الخرطوم ولا يحدث طرد للحرارة . احسب سرعة الهواء عند خروجه من فوهة الخرطوم عندما تكون سرعة دخوله 100 متر/ثانيه .
- [الاجابه: 637 متر/ثانيه]
- ١٢- هواء عند درجة حرارة 40°م يدخل غرفة خلط بمعدل 225 كجم/ساعه حيث يتم خلطه مع هواء درجة حرارته 15°م بمعدل 540 كجم/ساعه . احسب درجة حرارة الهواء عند تركه غرفة الخلط . افرض ظروف أنسياب مستقر . افرض ان كمية الحرارة المفقوده يمكن اهمالها .
- [الاجابه: 224°م]
- ١٣- تحتوي اسطوانة صلبه علي غاز الهليوم (الكتله المولييه 4 كجم/ك.مول) عند ضغط 5 "بار" ودرجة حرارة 15°م . تم توصيل الاسطوانه مع مصادر ضخ للهليوم عند ضغط 10 "بار" ودرجة حرارة 15°م وتم قفل الصمام الموصل بالاسطوانه عندما ارتفع الضغط بالاسطوانه الي 8 "بار" . احسب درجة الحرارة النهائيه للهليوم فى الاسطوانه بفرض ان كمية الحرارة المنتقله خلال اجراء العمليه صغير ويمكن اهماله . قيمة C_v للهليوم 2.12 كيلوجول/كجم كلفن .
- [الاجابه: 615°م]

١٤- يحتوي خزان هواء علي ١٠ كيلوجرام من الهواء عند ضغط ٧ "بار" به صمام فتح خطأ وتم قفله ثانيه في خلال ثواني الا ان الضغط انخفض الي ٦ "بار" . احسب كتلة الهواء التي هربت من الخزان مع توضيح أى فروض تأخذها واحسب ايضا ضغط الهواء فى الخزان بعد ان يمر بعض الوقت بعد قفل الصمام لكى تكون درجة حرارة الهواء قد عادت إلي درجة الحرارة الاصلية . [الاجابه: ١ر.٤ كجم ، ٦٢٧ "بار"]

١٥- اسطوانه رأسيه مساحة مقطعها ٦٤٥٠ مم^٢ مفتوحة من أحد طرفيها للجو ومتصله من الطرف الاخر عن طريق ماسورة وصمام بخزان هواء كبير تم تثبيت مكبس بالاسطوانه لا احتكاك له وزن ١٠٠ نيوتن وكان الحجم الابتدائي للأسطوانه صفر . تم فتح الصمام وسمح للهواء بالمرور ببطء من الخزان الكبير إلي الاسطوانه حتي تحرك المكبس ببطء مسافة ٠.٦ م وعندئذ قفل المكبس. اذا كانت درجة حرارة الهواء فى الاسطوانه ٢٠°م عند نهاية العمليه ودرجة الحرارة للهواء في الخزان الكبير ثابتة عند ٩٠°م احسب :-

- أ- ضغط الهواء فى الاسطوانه اثناء العمليه.
 - ب- الشغل المبذول بالهواء في الاسطوانه.
 - ج- الشغل المبذول علي المكبس.
 - د- الحرارة المنتقلة من او الي الهواء في الاسطوانه اثناء العمليه .
- اعتبر ضغط الهواء الجوى ١ر.١٢ "بار"
[الاجابه: ١ر.٦٨ "بار" ، ٤٥٢ جول ، ٦٠ جول ، -٢١٠ جول]

ثالثاً : تعاريف علي القانون الاول للديناميكا الحرارية

١- يقوم مكبس هواء بعملية الضغط مع ثبوت الطاقة الداخليه ، ويتم طرد ٥٠ كيلو جول إلي ماء التبريد لكل ١ كجم هواء . احسب الشغل اللازم لشوط الانضغاط لكل رطل من الهواء [الاجابه : ٥٠ كيلو جول/كجم].

٢- وجد ان الشغل المبذول في شوط الانضغاط على الغاز بواسطة مكبس ٧٠ كيلوجول/كجم وكمية الحرارة المطروده الي ماء التبريد ٤٢ كيلوجول/كجم . احسب التغير في الطاقة الداخليه وحدد اذا كان حدث اكتساب أو فقد فيها . [الاجابه : تم اكتساب ٢٨ كيلوجول/كجم].

٢- كتلة من غاز لها طاقة داخلية ١٥٠٠ كيلوجول موجوده في أسطوانه معزوله تماما حراريا تمدد الغاز خلف مكبس حتي أصبحت طاقته الداخليه ١٤٠٠ كيلوجول احسب الشغل المبذول بواسطة الغاز .

إذا علمت ان التمدد تم تبعا للمعادله ($pV^2 = \text{constant}$) وان الضغط الابتدائي للغاز ٢٨ "بار" والحجم الابتدائي للغاز ٠.٦ م^٣ ، احسب الضغط والحجم في نهاية الاجراء .

[الاجابه : ١٠٠٠ كيلوجول ، ٤٦٠ بار ، ٠.١٤٨ م^٣]

٤- وجد ان الغازات في اسطوانة آلة احتراق داخلى لها طاقه داخلية ٨٠٠ كيلوجول/كجم وحجم نوعي ٠.٦ م^٣/كجم عند بداية التمدد . افترض ان التمدد انعكاسيا تبعا للمعادله $pV^{1.5}$ من ضغط ٥٥ "بار" الي ١٠.٤ "بار" الطاقه الداخليه بعد التمدد ٢٢٠ كيلوجول/كجم. احسب كمية الحرارة المطروده/كجم غازات الي ماء تبريد الاسطوانه اثناء شوط التمدد .
[الاجابه: ١٠.٤٢ كيلوجول/كجم]

٥- محرك بخاري يدخله البخار بمعدل ١٢٥ كجم/ثانيه وينتج ٥٠٠ كيلوات. كمية الحرارة المفقوده بين جداره يمكن اهمالها.

أ- احسب التغير في الانثاليبي النوعي عبر المحرك عند اهمال سرعة دخول وخروج البخار وكذلك الفرق في الارتفاع عند الدخول والخروج.

ب- احسب التغير في الانثاليبي النوعي عبر المحرك عندما يكون سرعة دخول البخار ٦٠ متر/ث وسرعة خروجه ٢٦٠ م/ث ومستوي ماسورة الدخول اعلي من ماسورة العادم ٢ متر .

[الاجابه : ٢٧٠.٤ كيلوجول/كجم ، ٤٢٢.٤ كيلوجول/كجم]

٦- يدخل البخار بانسياب مستقر الي مكثف وقيمة الانثاليبي له ٢٢٠٠ كيلوجول/كجم وسرعته ٢٥٠ م/ث ، بعد تكثيفه يخرج وقيمة الانثاليبي له ١٦٠ كيلوجول/كجم وسرعته ٧٠ م/ث.

احسب كمية الحرارة المنتقلة الي ماء التبريد لكل كجم بخار مكثف .
[الاجابه: ٢١٩٨.٨ كيلوجول/كجم]

٧- محرك بخاري يعمل تحت ظروف الانسياب المستقر يدخله البخار بالحاله التاليه: الضغط ١٢.٨ "بار" - الحجم النوعي ٠.١٤٢ م^٣/كجم - الطاقه

الداخليه ٢٥٩٠ كيلوجول/كجم - السرعة ٣٠ م/ث . ويخرج البخار من المحرك بحاله التاليه : الضغط ٣٥ ر. "بار" - الحجم النوعي ٤٣٧ م^٣/كجم الطاقه الداخليه ٢٢٦٠ كيلوجول/كجم - السرعة ٩٠ م/ث . تفقد الحراره للجو المحيط بمعدل ٢٥ ر. كيلوجول/ث ، ومعدل انسياب البخار ٣٨ ر. كجم/ث . احسب القدره المتحصل عليها من المحرك .
[الاجابه : ١٠٢٩٨ كيلوات] .

- ٨- تعتبر فوهة فم الخرطوم وسيله لزيادة سرعة تيار لمائع ينساب مستقرا . ولقد وجد ان قيمة الانثالبي لمائع عند دخوله فوهة فم الخرطوم ٢٠٢٥ كيلوجول/كجم والسرعه ٦٠ متر/ث . ولقد وجد ان الانثالبي للمائع عند خروجه ٢٧٩٠ كيلوجول/كجم . فوهة فم الخرطوم أفقيه والحراره المفقوده منه يمكن اهمالها
أ- اوجد سرعة خروج المائع .
ب- اذا كانت مساحة الدخول ٠١ م^٢ والحجم النوعي للمائع عند الدخول ١٩ م^٣/كجم . احسب معدل انسياب المائع .
ج- اذا كان الحجم النوعي للمائع عند الخروج ٠٥ م^٣/كجم . احسب مساحة الخروج .
[الاجابه : ٦٨٨ ر٢ م/ث ، ٢١٦ ر٢ كجم/ث ، ٢٣٠ م^٣/ث]

رابعاً : تعاريف علي Working Fluid

- استخدم القيم التاليه للهواء :-
- الثابت العام النوعي للهواء "R" ٢٨٧ ر. كيلوجول/كجم كلفن
- الحراره النوعيه تحت ضغط ثابت "Cp" ١٠٠٥ ر. كيلوجول/كجم كلفن
- الحراره النوعيه تحت حجم ثابت "Cv" ٧١٨ ر. كيلوجول/كجم كلفن
النسبه بين الحراره النوعيه تحت ضغط ثابت وتحت حجم ثابت "γ" ١٤
وللغازات التامه الاخرى يتم حساب تلك القيم باستخدام المعلومات المعطاه في التمرين .
١- الوزن الجزيئي النسبي لغاز ثاني اكسيد الكربون ٤٤ ، وجد في احدي التجارب أن قيمة "γ" له ١٣ ر١ . افرض ان غاز ثاني اكسيد الكربون غاز "تام" ، احسب الثابت العام النوعي للغاز "R" والحراره النوعيه تحت ضغط ثابت وتحت حجم ثابت . [الاجابه : ١٨٩ ر. ، ٦٣٠ ر. ، ٨١٩ ر. كيلوجول/كجم كلفن ، ٢٨ ر٢ م^٣/ث] .

٢- احسب الطاقة الداخلية والانتالبي لـ ١ كجم هواء يشعـر ٢ م.ر.ع عند ٢٠ "بار" اذا علمت ان الطاقة الداخلية ازدادت ١٢٠ كيلوجول/كجم بازدياد ضغط الهواء إلي ٥٠ بار ، احسب الحجم الجديد الذي يشغله ١ كجم مـن الهواء .

[الاجابه : ٢٥٠.١٠٦ كيلوجول/كجم ، ٣٥٠.١٧ كيلوجول/كجم، ٢٩٦ م.ر.ع].

٣- وعاء من الصلب سعته ٢ م.ر.ع مخزن به غاز الاكسجين عند ضغط ٢٠٠ "بار" ودرجة حرارة ٢٠°م . بفرض ان الاكسجين غاز تام . احسب كتلة الاكسجين المخزنه في الوعاء اذا علمت ان الوعاء مزود بصمام امان ضد ارتفاع الضغط حيث ينصهر الصمام عندما ترتفع درجة الحرارة . احسب درجة الحرارة التي يجب ان ينصهر عندها الصمام حتي يحد من ارتفاع الضغط في الوعاء الي ٢٤٠ "بار" . الكتلة المولية للاكسجين هي ٣٢ كجم/كيلومول .

[الاجابه : ٢٩٥١ م^٣ ، ٧٨٦ م°].

٤- عند تسخين غاز تام معين تحت ضغط ثابت من درجة حرارة ١٥°م الي درجة حرارة ٩٥°م فانه يحتاج الي كمية حرارة مقدارها ١١٣٦ كيلوجول/كجم . وعند تسخين نفس الغاز تحت حجم ثابت من والي نفس درجات الحرارة المذكوره فانه يحتاج الي كمية حرارة مقدارها ٨٠٨ كيلوجول/كجم . احسب كلاً من C_p ، C_v ، R ، الوزن الجزيئي النسبي للغاز .

[الاجابه : ١٤١٢ كيلوجول/كجم كلفن ، ١٠.١ كيلوجول/كجم كلفن ، ١٤.٦ ، ٤١ ، كيلوجول/كجم كلفن ، ٢٠.٢٨].

٥- مكبس هواء يدخله الهواء عند ضغط ١ "بار" ويتركه عند ضغط ٥ "بار" ودرجة حرارة الهواء عند دخوله الي المكبس ١٥°م وحجم الهواء عند بداية الانضغاط ٣ امثال حجمه عند نهاية الانضغاط . احسب درجة حرارة الهواء عند خروجه من المكبس ومقدار الزيادة في الطاقة الداخلية لكل ١ كجم هواء .

[الاجابه : ٢٠.٧ م° ، ١٣٧.٨٦ كيلوجول/كجم].

٦- تم ضغط كمية غاز تام معين من حالة ابتدائية حيث حجمه ٨٥ م.ر.ع وضغطه ١ بار الي حالة نهائية حيث حجمه ٣٤ م.ر.ع وضغطه ٣٩ "بار" الحرارة النوعيه تحت حجم ثابت ٧٢٤ م.ر. كيلوجول/كجم كلفن ، الحرارة النوعيه

تحت ضغط ثابت ١.٢ ر. كيلوجول/كجم كلفن . لوحظ ارتفاع في درجة الحرارة مقداره ١٤٦ كلفن . احسب الثابت العام النوعي للغاز "R" ، كتلة الغاز الموجوده ، مقدار الزيادة في الطاقة الداخلية للغاز .
[الاجابه : ٢٩٦ ر. كيلوجول/كجم كلفن ، ٠.٧٩ ر. كجم ، ٨٣١٦ كيلوجول].

الدورات الحرارية والقانون الثاني للديناميكا الحرارية

يبين القانون الأول أن الحرارة والشغل صورتان من صور الطاقة يمكن تحويل كل منهما إلى الأخرى كما حدد طريقة ربطهما ببعض عن طريق عامل كمي (المكافئ الميكانيكي للحرارة) . وأمكنا القانون الأول من تعريف الطاقة المخزنه كما أوضح العلاقة بين الشغل والحرارة والتغير في الطاقة الداخلية للمجموعة.

ولكن لم يضع القانون الأول أى حدود لإمكانية تحويل الطاقة من صورة إلى أخرى. فالشغل يمكن أن يتحول تماماً إلى طاقة والعكس . ولكن في الآلات الحرارية نجد أن جزءاً فقط من الطاقة الحرارية المضافة يمكن أن يتحول إلى شغل ميكانيكي مفيد بينما يخرج جزء آخر كبير من هذه الطاقة من الآلة الحرارية مفقوداً في صورة دخان عادم أو بخار ثانوى أى أن المحتوى الحرارى لماده الشغل (بخار أو غاز) لا يمكن الاستفادة منها تماماً بدون فاقد وذلك لأن مادة الشغل تخرج من الآلة على درجة حراره أعلى من درجة حراره الوسط الجوى المحيط بحيث أننا نجد أن هناك فرقاً كبيراً بين درجة حرارة العوادم الخارجة ودرجة حراره الصفر المطلق أى أن هناك فرق في المحتوى الحرارى كان يمكن استغلاله في عمليات تحول الطاقة ولكن هذا الجزء من الطاقة لا زال مهدراً وبالتالي تكون الاستفادة غير كاملة .

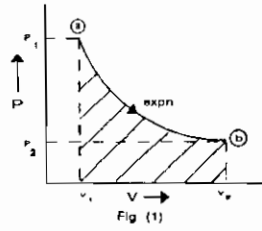
ولدراسة القانون الثانى لابد من التعرف أولاً على كيفية عمل الآلة الحرارية وعلى التعرف على الإجراءات العكسية والغير عكسية ومنها يمكن التوصل إلى صيغ مختلفه للتعبير عن القانون الثانى للديناميكا الحرارية.

الآلة الحرارية Heat Engine

هى أداة تعمل على تحويل الحرارة إلى شغل خارجى وتتكون الآلة الحرارية عادة من اسطوانه معزولة الجوانب (ماعداً قاعدة الاسطوانه) لها مكبس حر الحركة ويتحرك بدون احتكاك ويوجد بداخل الاسطوانه مادة تسمى ماده التشغيل Working Substance وماده التشغيل يمكنها أن تمتص (تكتسب) أو تطرد كمية من الحرارة وتقوم بعمل شغل (مكتسب أو مبدول) وذلك بتمدها أو بانضغاطها أى بتغيير حجمها.

والموائع وعلى الأخص الغازات مثل الهواء أو البخار أو موائع التبريد (فريون ، أمونيا ، ركلين...الخ) من أفضل المواد التى تستخدم كماده تشغيل حيث أن التغير في حجمها يكون أكبر من المواد الصلبة والسائلة ، واستجابتها لتغير حجمها عند التأثير عليها بقوى خارجية يكون سريعاً.

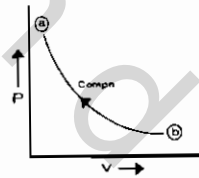
وعند عمل الآلة الحرارية فإن درجة حرارة مادة التشغيل او الشغل (الغاز) تتراوح بين درجة حراره قصوى يصل إليها الغاز عند تلامسه بمصدر حرارى ساخن Source وبين درجة حراره صفرى تكون هى درجة حراره مكثف بارد (مصعب أو بالوعه حرارية) Sink .



شكل (٦-٣) تمدد غاز داخل الاسطوانة

وكما عرفنا سابقاً فإن الشغل الذى يبذله الغاز عند تمدده من النقطة a حيث الحجم V_1 والضغط P_1 إلى النقطة b حيث الحجم V_2 والضغط P_2 يعطى بالمعادلة

$$W (\text{exp. a - b}) = \int_{v_1}^{v_2} p dv \quad (3-43)$$



شكل (٧-٢) انضغاط غاز داخل الاسطوانة

وقيمة هذا الشغل يساوي المساحة تحت المنحنى شكل (٦-٣) ولكى يمكننا تكرار نفس هذه العملية لكى نحصل على نفس قيمة شغل التمدد W فلابد من رجوع الغاز إلى حالته الأولى حيث الضغط P_1 والحجم V_1 (شكل ٧-٢) أى أنه لابد من ضغط الغاز وبهذا فإن الغاز يكون قد قام بعمل دورة حرارية فى عملية ضغط الغاز فلابد بالطبع من بذل شغل على الغاز من أى مصدر خارجى وتكون قيمة هذا الشغل

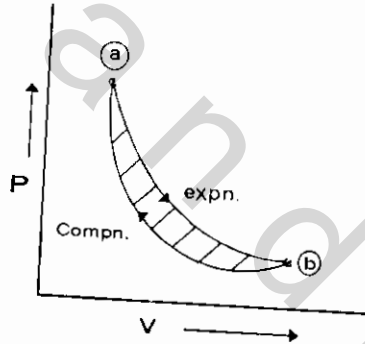
$$W (\text{comp b - a}) = \int_{v_2}^{v_1} p dv = - \int_{v_1}^{v_2} p dv \quad (3-44)$$

وحيث أن الشغل هو دالة للعملية الديناميكية الحرارية أى يتوقف على المسار بين نقطتى البداية والنهاية فإن قيمتى $W_{b-a \text{ comp}} & W_{a-b \text{ exp}}$ سوف تعتمد على مسار كل من عمليتى التمدد والضغط (حيث أن الشغل يساوى المساحة تحت المنحنى والمسار) ويكون الشغل الكلى الناتج من دورة واحدة مساوياً لـ :

$$W_c = W \exp (a - b) - W \text{ comp } (b - a) \quad (3-45)$$

فإذا انطبق منحنى التمدد على منحنى الضغط فإن الشغل الكلى الناتج أو الذى يمكن الحصول عليه من الدورة يكون مساوياً صفر . أى أن :

$$W_c = 0, \quad W \exp (a - b) = W \text{ comp } (b - a) \quad (3-46)$$



شكل (٨-٣) دورة لتمدد وانضغاط الغاز

أما إذا كان منحنى التمدد أعلى منحنى الانضغاط (شكل ٨-٣) فإن الشغل الكلى الناتج من الدورة يكون مقداراً موجباً ويكون مساوياً للمساحة بين المنحنيين وحيث أن الغاز يصل فى نهاية الدورة إلى حالته الأصلية $(P, v, t)_0$ فإن التغير فى درجة حرارته = صفر وبالتالي يكون التغير فى طاقته الداخلية مساوياً صفر $U = 0$ وطبقاً للقانون الأول للديناميكا الحرارية فإن صافى الشغل W_c الناتج عن الدورة هو

$$W_c = Q_1 - Q_2, \quad W_c = \Delta Q$$

أى أن الشغل الناتج من الدورة يكون مساوياً لكمية الحرارة المعطاه لماده الشغل (الغاز) مطروحاً منها كمية الحرارة المفقودة من مادة الشغل (الغاز) بمعنى أن جزء

من الحرارة المعطاه للغاز يتحول إلى شغل والباقي يفقد.
وتعرف الكفاءة الحرارية للآلة أو الجودة الحرارية بالتالى :
الجودة الحرارية = $\frac{\text{الشغل المبذول}}{\text{كمية الحرارة المعطاه}}$ أى أن :

$$\eta = \frac{W_c}{Q_1} \quad (3-47)$$

حيث Q_1 هى كمية الحرارة التى امتصها الغاز من المصدر الساخن ، W_c هو الشغل الخارجى الذى بذله الغاز

$$\eta = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} \quad (3-48)$$

وفى معادلة الجودة الحرارية يجب أن تكون وحدات W_c هى نفس وحدات Q_1

العمليات القابلة للعكس والغير قابلة للعكس

Reversible and Irreversible Processes

إن مفهوم قابلية العكس أو عدم قابلية العكس للعمليات المختلفة من أهم مفاهيم الديناميكا الحرارية . فإن أكبر مطامع المهندسين المشتغلين بعلوم الطاقة هو إمكانية تحويل الطاقة من صورة إلى أخرى بدون أن يفقد جزء منها إلى الوسط المحيط . فإذا أجريت عملية فى اتجاه معين من a إلى b ثم أجريت فى الاتجاه العكسى من b إلى a وعادت مادة الشغل إلى حالتها الابتدائية من حيث الضغط ودرجة الحرارة دون أن يحدث للوسط المحيط أى تغيرات فيقال أن هذه العملية قابلة للعكس Reversible فمثلاً إذا أجريت عملية فى اتجاه معين من a إلى b وامتصت كمية من الحرارة Q من الوسط الخارجى فإن تنفيذ إجراء العملية فى الاتجاه العكسى من b إلى a يجب على مادة الشغل أن تطرد نفس كمية الحرارة Q إلى الوسط الخارجى أو اذا بذلت مادة الشغل شغلاً موجباً خلال حركتها من a إلى b فيجب عند إجراء العملية فى الاتجاه العكسى من b إلى a أن يبذل عليها نفس مقدار الشغل حتى تعود إلى حالتها الأصلية .

فحركة بندول الساعة مثلاً تعتبر من الناحية النظرية عملية عكسية فبعد مدة زمنية معينة من حركة البندول فإنه يعود إلى وضعه الابتدائى (حاله الأصلية) بدون أن تحدث تغيرات معينة فى الوسط المحيط .

ولنأخذ مثال آخر للعمليات العكسية :

عند ضغط مائع التبريد المستخدم في وحدات التبريد (فريون أو أمونيا أو ركلين) من ضغط منخفض إلى ضغط مرتفع فإن شغلاً من الخارج يتم بذله لتحريك الضاغط. فإذا تم الانتهاء من ضغط المائع وأريد إرجاع الاجراء وعكسه بحيث يتم عمل نفس المقدار من الشغل المبذول إلى الوسط المحيط فإنه يمكن أن يقال أن المائع مر بدورة عكسية .

ولكن هذا غير واقعي ولا يحدث في الحياة العملية حيث إن جزءاً من الطاقة يفقد بالاحتكاك ويحد من جعل الاجراء عكسياً تماماً. وبرغم أن الإجراء العكسي صعب التوصل اليه عملياً إلا أن المهندسين يعتبرونه الاجراء المثالي (المعياري) ويحاولون أن يجعلوا من كل اجراءات تحويل الطاقة اجراءات عكسية بقدر ما أمكن ذلك عملياً. لذلك تكون العملية غير قابلة للعكس عندما تجرى في إتجاه معين a إلى b ثم تجرى في إتجاه العكسي من b إلى a فلا تعود مادة الشغل إلى حالتها الأصلية أو أن يحدث تغيرات للوسط المحيط ومن أمثله العمليات الغير قابلة للعكس :

١- الإحتكاك : فمثلاً عند توقف قطار أو سيارة فإن طاقة الحركة للقطار تتحول إلى طاقة حرارية في جهاز الفرملة مما يرفع من درجة حراره الفرامل ومن غير المعقول طبعاً أن يمكن للقطار أن يتحرك مرة ثانية عند تبريد الفرامل فالاحتكاك الذي حدث يعتبر طاقة مفقودة غيرت من الوسط المحيط.

٢- إنتقال الحرارة من جسم لآخر عند وجود فرق في درجات الحرارة بينهما فبعد الوصول إلى حاله الاتزان الحرارى فإنه يصعب إنتقال الحرارة في الاتجاه العكسي لأن اتجاه الانتقال الحرارى محدد باتجاه واحد وكذلك الحال في حالة اتزان الضغوط أو التركيزات .

٣- التمدد الحر : فإذا تمدد غاز مثلاً داخل أسطوانه فيكون هذا الاجراء غير انعكاسي بسبب وجود إحتكاك بين المكبس والاسطوانه أو لسبب إثارة الغاز داخل الأسطوانه وبالتالي تبقى بالمجموعه كمية من الطاقة أكبر .

٤- عمليات الخلط : تتم عمليات الخلط للسوائل والعجائن مثلاً بإضافة شغل ميكانيكى من الخارج مما يؤدي إلى تسخين المخلوط ورفع الطاقة الداخلية له ولكن لا يمكن تخزين الطاقة المضافة (الشغل الميكانيكى) داخل المخلوط إلى وقت آخر لحين استخدامه لشغل يمكن طرده من مجموعه السائل لذلك يطلق على الشغل المضاف شغل موزع أو متفرق وتطبق عليه المعادلة التالية :

$$W_{12} = U_2 - U_1 = W_{add} \quad (3-49)$$

ويمكن أن يطلق عليها شغل إحتكاكي أو طاقة إحتكاكية . وعموماً يمكن أن يقال إنه إذا تم الإجراء ببطء quasi - static وبدون احتكاك فإنه يمكن أن يكون إجراء عكسياً أما إذا تم بسرعه Non quasi-static فإنه يكون إجراء لاعكسياً.

والدورة الحرارية التي تتكون منها كل الاجراءات أو العمليات الديناميكية الحرارية القابلة للعكس تسمى دورة قابلة للعكس انعكاسيه اما الدورة الحرارية التي تكون فيها بعض أو كل العمليات الديناميكية الحرارية غير قابلة للعكس فهي دورة غير قابلة للعكس والجودة الحرارية للدورة الانعكاسية تمثل اقصى درجة كفاءة يمكن الحصول عليها اذا ما قورنت بالدورات الحقيقية.

دورة كارنوت المثالية Ideal Carnot Cycle

تعتبر دورة كارنوت مثالا هاما لكل الدورات الحرارية الأخرى . وهي تعتبر دورة مثالية ولكن خيالية لايمكن تحقيقها عملياً ولكن تعتبر النتائج المستخلصة منها ذات أهمية كبرى لكل الدورات الحرارية . ويمكن إجراء دورة كارنوت بواسطة غاز مثالي بواسطة أربعة اجراءات عكسية هي:

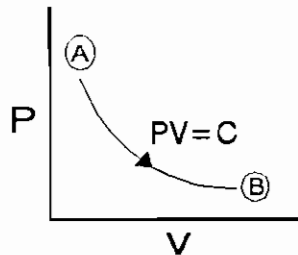
١- إجراء تمدد ذو درجة حرارة ثابتة Isothermal Expansion

٢- إجراء تمدد أديباتيكي (بدون فقد أو اكتساب حراره) Adiabatic Expansion

٣- إجراء انضغاط ذو درجة حرارة ثابتة Isothermal Compression

٤- إجراء انضغاط أديباتيكي Adiabatic Compression

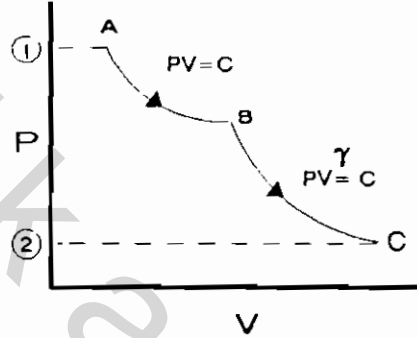
ويوضح الشكل (٩-٢) مسار دورة كارنوت على خريطة الضغط والحجم P-V Diagram وتتم الدورة بين كل من النقاط A , B , C , D حيث تحدث لها الإجراءات التالية :-



شكل (٩-٢) تمدد الغاز

١- يوجد الغاز داخل أسطوانة متصلة بمصدر حراري لانهائي درجة حرارته T_1 وضغطه P_A وحجمه V_A وينتج عن ذلك أن الغاز يتمدد تحت ظروف أيزوسيرماليه (ثبوت درجة الحرارة إلى P_B ، V_B) تحت نفس درجة الحرارة إلى أن يصل إلى الحالة B وتكون كمية الحرارة المضافة = الشغل الذي يبذله الغاز

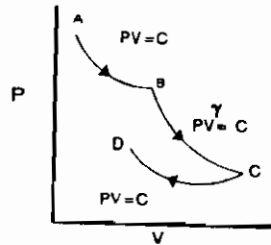
$$Q_1 = W_1 = P_1 V_1 \cdot \ln \frac{V_2}{V_1} = m \cdot R \cdot T_1 \cdot \ln \frac{V_B}{V_A} \quad (3-50)$$



شكل (١٠-٢) اجرائي تعدد الغاز

٢- عندما يصل الغاز إلى الحالة B يتم إيقاف إضافة الطاقة الحرارية من المصدر الحراري وتعزل أسطوانة الغاز تماماً عن الجو المحيط بها. ويترك الغاز ليتمدد أديباتيكياً إلى أن يصل إلى الحالة رقم 2 (شكل ١٠-٢) وينخفض درجة الحرارة من T_1 إلى T_2 ويزيد الحجم إلى V_C وينخفض الضغط إلى P_C وخلال هذا التغير يكون الغاز قد بذل شغلاً موجباً.

$$Q_2 = W_2 = P_2 V_2 \cdot \ln \frac{V_D}{V_C} = m \cdot R \cdot T_2 \cdot \ln \frac{V_D}{V_C} \quad (3-51)$$

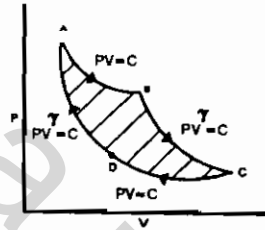


شكل (١١-٢) اجراءات تعدد وانضغاط الغاز

٣- عندما يصل الغاز إلى الحالة C يتم توصيل الأسطوانة مع مستودع حراري لانهاضي بارد درجة حرارته T_2 ثم يضغط الغاز أيزوسيرماليا عند درجة حرارة T_2 وتكون كمية الشغل المبذولة W_2 مساوية لكمية الحرارة المطرودة من الغاز Q_2 إلى المستودع الحراري اللانهاضي (شكل ١١-٣)

$$Q_2 = W_2 = mR T_2 \ln \frac{V_D}{V_C} \quad (3-52)$$

ويقل حجم الغاز إلى V_D ويرتفع الضغط إلى P_D .



شكل (١٢-٣) الدورة الكاملة

٤- عندما تصل حاله الغاز إلى الحالة D تفصل الاسطوانة عن المستودع الحراري اللانهاضي البارد ثم تعزل تماماً ويستمر ضغط الغاز أديباتيكيا إلى أن يقل حجم الغاز ويصل إلى الحجم الابتدائي V_A وترتفع درجة الحرارة من T_2 إلى T_1 والضغط من P_D إلى P_A وبذلك تتم الدورة ويصل الغاز إلى حالته الابتدائية. (شكل ١٢-٣)

الجودة الحرارية لدورة كارنوت :

حيث أن الطاقة الداخلية للغاز المثالي تعتمد فقط على درجة الحرارة فإننا نجد أن الطاقة الداخلية (U) للغاز في بداية دورة كارنوت تتساوى مع الطاقة الداخلية له في نهاية الدورة وبالتالي فإن $(\Delta U = 0)$. وطبقاً لذلك فإن معادلة القانون الاول للديناميكا الحرارية تؤدي إلى

$$Q_1 = W + Q_2$$

ويكون صافى الطاقة الحرارية المضافة Q أثناء الدورة هو عبارة عن المجموع الجبرى لكل من :-

- الطاقة الحرارية Q_1 المضافة أثناء الإجراء الأول :

$$Q_1 > 0$$

- الطاقة الحرارية Q_2 المطروقة أثناء الإجراء الثالث

$$Q_2 < 0$$

وبالتالى تكون نسبة Q (مع مراعاة الإشارات) :

$$Q = Q_1 + Q_2$$

وكذلك قيمة الشغل لها :

$$W = Q_1 + Q_2$$

وحيث أن الجودة الحرارية لجميع الآلات الحرارية تعرف على أنها ناتج قسمه الطاقة المستفاد (ويقصد بها هنا فى هذه الحالة الشغل W) على الطاقة الحرارية المضافة (هنا كمية الحرارة Q_1) والتي يكتسبها المائع عند درجة الحرارة المرتفعة أى أن :-

$$\eta = \frac{W}{Q_1} \quad (3-53)$$

$$W = Q_1 + Q_2 \quad \text{وحيث أن :}$$

$$\eta = \frac{Q_1 + Q_2}{Q_1}$$

وبالتعبير عن كل من Q_1 ، Q_2 بالمعادلات المحددة لقيمة كل منها نجد أن :-

$$\eta = \frac{mRT_1 \ln \frac{V_B}{V_A} + mRT_2 \ln \frac{V_D}{V_C}}{mRT_1 \ln (V_B/V_A)} \quad (3.54)$$

وحيث أن التغير من B إلى C ومن D إلى A يتم خلال الدورة أديباتيكيا

$$\frac{T_1}{T_2} = \frac{V_C}{V_B}$$

$$\frac{T_1}{T_2} = \frac{V_D}{V_A}$$

ومن هذه العلاقة نستخلص أن :

$$\frac{V_C}{V_B} = \frac{V_D}{V_A}$$

$$\frac{V_B}{V_A} = \frac{V_C}{V_D} \quad \text{أى أن}$$

وبالتعويض عن قيمة الحجوم فى معادلة (٣-٥٤)

$$\eta = \frac{mRT_1 \ln \frac{V_B}{V_A} + mRT_2 \ln \frac{V_B}{V_A}}{mRT_1 \ln (V_B/V_A)} \quad (3-55)$$

وبعد الاختصار نجد ان معادلة الكفاءة الحرارية تؤدي الى

$$\eta = \frac{T_1 - T_2}{T_1} \quad (3-56)$$

$$\eta = 1 - \frac{T_2}{T_1} \quad (3-57)$$

ومن هنا يتضح لنا أن :-

١- الجودة الحرارية لدورة كارنوت المثالية العكسية تعتمد على درجتى الحرارة فقط T_1, T_2 والتي تعمل بينهما الدورة .

٢- وتزداد قيمة η كلما زاد الفرق بين درجات الحرارة ($T_1 - T_2$) وكلما انخفضت درجة الحرارة T_2 .

٣- يمثل معامل الجودة الحرارية لدورة كارنوت اكبر قيمة لجميع الآلات الحرارية الأخرى فإذا امكننا التوصل الى أن تكون $T_2 = 0$ (درجة حرارة الصفر المطلقة)

فإنه يمكننا تخيليا الوصول بقيمة $\eta = 1$ وبالتالي يمكننا تحويل كل الطاقة الحرارية الى شغل ميكانيكي ولكن هذا غير ممكن عملياً فى الحقيقه .

قاعدة هامة

بينما يمكن تحويل الطاقة الميكانيكية دائماً بالكامل إلى طاقة حرارية فإن التحويل الكامل لكل الطاقة الحرارية إلى طاقة ميكانيكية من خلال دورة حرارية أى بواسطة آلة حرارية مستمرة غير ممكن حتى تحت أحسن الظروف المثالية

منطوق القانون الثانى للديناميكا الحرارية :

ومما سبق يمكن التعبير عن منطوق القانون الثانى للديناميكا الحرارية بأحد الصيغ الآتية :

- ١- ليس من المعقول أن تصمم آلة حرارية تعمل فى دورة ولاتنتج أى أثر غير استخلاص الطاقة الحرارية من خزان كبير وتحويلها كلها الى شغل مساو لها.
- ٢- لايمكن نقل الحرارة من جسم ذو درجة حرارة منخفضه إلى آخر ذو درجة حرارة مرتفعه إلا باستخدام شغل خارجى .
- ٣- يستحيل على أى جهاز يعمل طبقا لدورة أن ينتج ضغطا مع تبادل الحرارة مع أجسام عند درجة حرارة متساويه .

وهذا القانون ليس استنتاجا من القانون الأول حيث أن القانون الأول ينفى استحداث أو إفناء الطاقة فى حين أن القانون الثانى يحدد احتمالات استخدام الطاقة فى صور معينه . فإنه من المعلوم إمكانية تحويل جميع الطاقة الميكانيكية (الشغل) إلى طاقه حراريه بدون أى حدود ولكنه لايمكن تحويل الطاقة الحرارية إلى شغل بدون طرد جزء من هذه الطاقة الحرارية إلى مايحيط بالمجموعه .

قيمة القانون الثانى :

- ١- تعيين أقصى قيمة للجودة الحرارية لآلة حرارية تعمل تحت ظروف معينه .
- ٢- تعيين أقصى قيمة لمعامل أداء ثلاجة أو وحدة تبريد .
- ٣- احتمالات حدوث أى إجراء .
- ٤- تحديد الاتجاه الذى يمكن أن يتخذه أى إجراء .
- ٥- تعريف مقياس لدرجة الحرارة لايعتمد على الخواص الطبيعیه لأى مادة .
- ٦- تحديد العلاقات بين الخواص الطبيعیه للمواد .

مثال :-

- استخدم واحد كجم هواء لتشغيل دورة كارنوت فإذا كان الضغط الابتدائى للهواء ١٦ بار ودرجة حرارته 27°C وبعد التمدد الايزوسير مالى انخفض الضغط إلى ٨ بار (نقطة B) وكان اقل قيمة ضغط فى الدورة = ١.٦ بار احسب كل من :-
- ١- الضغوط والحجوم السائدة عند كل من النقاط الأربعة للدورة (A - D) .
 - ٢- كميات الحرارة المضافة والمطروده Q_2, Q_1 .
 - ٣- معامل الأداء الحرارى للدورة أو الجودة الحرارية للدورة .

الحل

$$P_A = 16 \text{ bar} = 16 \times 10^5 \text{ N/m}^2 \quad \text{المعطيات :}$$

$$t_A = 527^\circ\text{C} = 800 \text{ K}$$

$$P_B = 8 \text{ bar} = 8 \times 10^5 \text{ N/m}^2, \quad P_C = 1.6 \text{ bar} = 1.6 \times 10^5 \text{ N/m}^2$$

$$R = 287 \text{ Nm/kg.K} = 0.287 \text{ kJ/kg.K}, \quad \gamma = 1.4$$

$$V_A = \frac{RT_1}{P_1} = \frac{287 \times 800}{16 \times 10^5} \frac{\text{N.m. K.m}^2}{\text{kg. KN.}}$$

$$= 0.1435 \text{ m}^3/\text{kg}$$

$$V_B = \frac{V_A \cdot P_A}{P_B} = 0.1435 \times \frac{16}{8} = \frac{\text{m}^3 \cdot \text{bar}}{\text{kg.bar}}$$

$$= 0.287 \text{ m}^3/\text{kg}$$

من النقطة B الى النقطة C يتم التمدد أديباتيكيا

$$\frac{T_B}{T_C} = \left(\frac{P_B}{P_C} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}$$

$$\frac{T_B}{T_C} = \left(\frac{P_B}{P_C} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} = \left(\frac{8}{1.6} \right)^{0.286} = 1.583$$

$$T_C = \frac{T_B}{1.583} = \frac{800}{1.583} = 505 \text{ K}$$

وبالتالى فإن الحجم عند الحالة ٢:

$$V_2 = \frac{RT_C}{P_C} = \frac{287 \times 505}{16 \times 10^5} \frac{\text{N.m. K.m}^2}{\text{kg.KN}}$$

$$= 0.0906 \text{ m}^3/\text{kg}$$

عند النقطة D نجد أن الإجراء من D إلى A أديباتيكيا

$$\left(\frac{P_A}{P_D}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} = \frac{T_A}{T_D}$$

$$\frac{P_A}{P_D} = \left(\frac{T_A}{T_D}\right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}}$$

$$\frac{P_A}{P_D} = \left(\frac{800}{505}\right)^{\frac{1.4}{0.4}} = 5, \quad P_D = \frac{16}{5} = 3.2 \text{ bar}$$

وكذلك يمكن إيجاد الحجم عند النقطة D كالآتى :

$$V_D V_D = \frac{V_c \cdot P_c}{P_D} = \frac{0.9006 \times 1.6}{3.2} \frac{\text{m}^3 \cdot \text{bar}}{\text{kg} \cdot \text{bar}}$$

$$= 0.0453 \text{ m}^3/\text{kg}.$$

كمية الحرارة المضافة Q_1 عند A يتم إضافتها فى دورة كارنوت عند درجة حراره

$$T_1 = T_A \text{ ثابتة}$$

$$\therefore Q_1 = W_1 = RT_1 \ln (P_A/P_B)$$

$$= 0.287 \times 800 \times \ln (16/8) \text{ kJ/kg}$$

$$= 159.1 \text{ kJ/kg}$$

(اشارة الحراره موجبہ .∴ حراره مكتسبہ)

كمية الحراره المطروده Q_2 عند ٢ يتم طردها عند درجة حراره ثابتہ $T_2 = T_C$

$$\therefore Q_2 = W_2 = RT_2 \ln (P_C/P_D)$$

$$= 0.287 \times 505 \ln (1.6/3.2)$$

$$= -100.4 \text{ kJoule/kg}$$

الاشارة هنا سالبہ .∴ حراره مفقوده

∴ الشغل المستفاد فى الدورة هو الجمع الجبرى لـ : $W_C = Q_1 + Q_2$

(ومع الاحتفاظ بالاشارات)

$$= 159.1 - 100.4 = + 58.7 \text{ kJ/kg}$$

$$\therefore \eta_c = \frac{W}{Q_1} = \frac{58.7}{159.1} = 0.369$$

$$= 1 - \frac{Q_2}{Q_1} = 1 - \frac{100.4}{159.1} = 0.369$$

$$\text{or } \eta_c = 1 - \frac{T_0}{T_1}$$

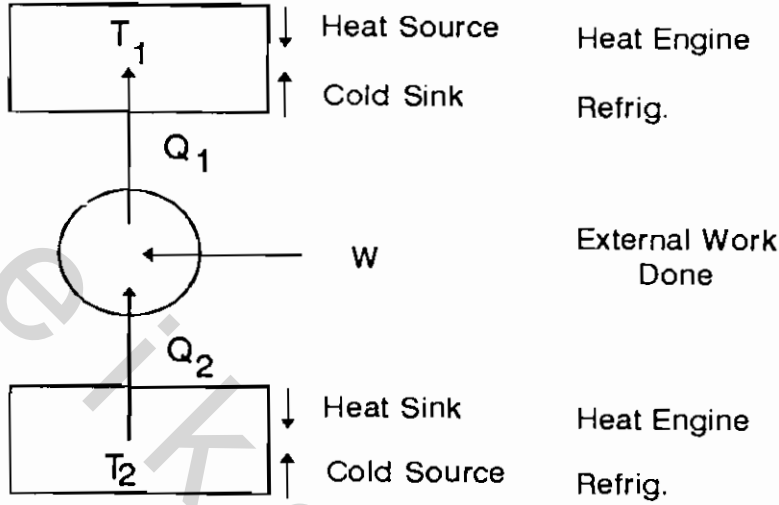
$$= 1 - \frac{505}{800} = 0.369$$

دورة آلة التبريد والمضخة الحرارية

إذا اعتبرنا غرفة التبريد الخاصة بحفظ الأغذية أنها مجموعة ثرموديناميكية درجة حرارتها أقل من درجة حرارة الوسط المحيط بالمجموعة وللمحافظة على درجة الحرارة المنخفضة داخل الحجرة (المجموعة الثرموديناميكية) فإنه يجب باستمرار امتصاص الحرارة من المادة الغذائية الموجودة داخل الغرفة ثم طرد هذه الحرارة إلى الوسط المحيط عند درجة حراره هي أعلى دائماً من درجة حراره الغرفة .

وبدلاً من اكتساب شغل في حالة آلة المضخة الحرارية فإنه يلزم في آلة التبريد بذل شغل ميكانيكي W من خارج المجموعة الثرموديناميكية لنزع كمية حراره Q_2 من غرفه التبريد والتي تمتص من خزان حراري ذو درجة حراره منخفضه T_2 وطردها Q_1 إلى خزان حراري آخر ذو درجة حراره مرتفعه T_1 (الوسط المحيط) وطبقاً لهذا المبدأ بنيت نظرية عمل الثلاجة المنزلية وكذلك ثلاجات الحفظ بالتبريد والتجميد.

ويبين الشكل التالى (شكل ١٣-٢) رسماً تخطيطياً لأجراء آلة التبريد:



شكل (١٣-٢) رسم تخطيطى لدورتى التبريد ومضخة الحرارة

ومن الشكل السابق نستنتج أن كمية الحرارة المضافة الى المجموعة من غرفه التبريد أو من الوسط المحيط بها تزيد من المحتوى الحراري لمادة الشغل العاملة فى آلة التبريد (مانع التبريد) فى صورة Q_2 ويمكن الرمز الى كمية الحرارة Q_2 ايضاً على انها كمية البرودة المتولدة وتصبح Q_2 هنا هي القدرة التبريدية وعادة ما يستخدم الفريون او الامونيا كمانع تبريد. بعد اضافة الشغل الميكانيكى الخارجى W الى مانع التبريد فإن المائع يطرد كمية حراره Q_1 الى الوسط المحيط .

وطبقاً للقانون الاول للديناميكا الحرارية فإن :

$$\text{Energy}_{in} = \text{Energy}_{out}$$

$$Q_2 + W = Q_1 \quad (3-58)$$

أى أن مجموع كل من الحرارة المضافة والشغل الميكانيكى المضاف يساوى كمية الحرارة المطرودة فى الدورة الحرارية .

ويعرف معامل الأداء بالنسبة للتلاجه أو وحدة التبريد بأنه النسبة بين كمية الحرارة المزاله وكمية الشغل اللازم إضافته.

$$\therefore \text{Coefficient of Performance} = \text{C.O.P}$$

$$\text{C.O.P} = \frac{Q_2}{W} = \frac{Q_2}{Q_1 - Q_2} = \frac{Q_2/Q_1}{1 - (Q_2/Q_1)} \quad (3-59)$$

ويعرف معامل الاداء بالنسبة لمضخة الحرارة بأنه النسبة بين كمية الحرارة المضافه وكمية الشغل اللازم لذلك :

$$\text{C.O.P} = \frac{Q_1}{W} = \frac{Q_1}{Q_1 - Q_2} = \frac{1}{1 - (Q_2/Q_1)} \quad (3-60)$$

ويلاحظ أن معامل الاداء لمضخة حرارة هو مقلوب الجودة الحرارية لآلة حرارية مناظرة أى أنه يكون دائماً أكبر من الواحد الصحيح.

الانتروبيا أو قصور الطاقة : Entropy

وجدنا من دورة كارنوت النظرية ذات الاجراءات المعكوسة أنه يمكن التعبير عن الجودة الحرارية كالآتي :-

$$\eta = 1 - \frac{Q_2}{Q_1} = 1 - \frac{T_2}{T_1} \quad (3-61)$$

حيث أن :

Q_2 = كمية الطاقة الحرارية المطرودة من الدورة عند درجة حرارة T_2

Q_1 = كمية الطاقة الحرارية المضافة في الدورة عند درجة حرارة T_1

وعلى ذلك نجد أن :

$$\frac{Q_2}{Q_1} = \frac{T_2}{T_1} \quad (3-62)$$

or

$$\frac{Q_2}{T_2} = \frac{Q_1}{T_1} \quad (3-63)$$

وبما ان قيمة Q_1 تكون سالبة حيث أنها ممتصة من الجو المحيط ، قيمة Q_2 تكون موجبة حيث أنها مطرودة إلى المحيط الخارجى .

$$\therefore \frac{Q_2}{T_2} = - \frac{Q_1}{T_1} \quad (3-64)$$

$$\therefore \frac{Q_1}{T_1} + \frac{Q_2}{T_2} = \Sigma \frac{Q}{T} = 0 \quad (3-65)$$

ويمكن اثبات هذه النتيجة لأي دورة معكوسة وذلك بتقسيم الدورة المعكوسة إلى عدد كثير من دورات كارنوت النظرية بواسطة منحنيات شبه متلاصقة، كمية الحرارة المتبادله فيها مقسومه على درجة الحرارة المطلقة مساويه للصفر. فإذا جمعنا هذه الطاقة في النهاية بالتكامل حول حدود الدورة نحصل على الآتى:

$$\sum \frac{dQ}{T} = 0$$

$$\int \frac{dQ}{T} = 0$$

ويسمى خارج القسمة $ds = \frac{dQ}{T}$ لاى اجراء معكوس بالانتروبيا أو قصور الطاقة فى هذا الاجراء Entropy.

فإذا فرض أنه يوجد لدينا دورة غير معكوسة Irreversible كما هى الحالة فى الدورات الحقيقية ، فيكون :

$$\eta = 1 - \frac{Q_2}{Q_1} < 1 - \frac{T_2}{T_1} \quad (3-66)$$

وذلك لأن الجودة الحرارية النظرية لدورة كارنوت تكون أكبر من أى جودة حرارية لدورة أخرى حقيقيه تعمل بين حدى درجات الحرارة T_1 و T_2 .

$$\therefore \frac{Q_2}{Q_1} > \frac{T_2}{T_1}$$

$$\text{or} \quad \frac{Q_2}{T_2} > \frac{Q_1}{T_1}$$

أو باستخدام الاشارة الجبرية الصحيحه للطاقة المضافه Q_1

$$\therefore \frac{Q_2}{T_2} > - \frac{Q_1}{T_1} \quad (3-67)$$

$$\frac{Q_1}{T_1} + \frac{Q_2}{T_2} > 0 \quad (3-68)$$

$$\sum \frac{Q}{T} > 0 \quad (3-69)$$

$$\text{or} \quad \sum \frac{dQ}{T} > 0 \quad (3-70)$$

لذلك نجد أن قيمة التغير في الانتروبيا

$$ds = \sum \frac{dQ}{T} > 0 \quad (3-71)$$

وعلى ذلك يمكن تلخيص نتيجة القانون الثانى للديناميكا الحرارية بأن :

للإجراء المعكوس $ds = 0$

للإجراء الغير معكوس (الحقيقى) $ds > 0$

GAS COMPRESSORS ضواغط الغازات

الغازات المضغوطة لها استخدامات كثيرة فى عمليات تصنيع الاغذية والالبان. فمثلا ضاغط الغازات يمثل جزء مهم من وحدة التبريد الصناعى بالضغط حيث يستخدم الضاغط فى ضغط الغاز (النشادر او الفريون ١٢ أو الركلين ٠٠٠) لرفع درجة حرارة تكثيفه . ويستخدم كذلك الهواء المضغوط فى عملية تجفيف اللين مثلا بطريقة الرش . وهناك نوعان من ضواغط الغازات :

١- ضواغط تردديه : Reciprocating Compressors

وهى تتكون من اسطوانه بها مكبس (ضاغط) يتحرك داخلها بواسطة طاقة خارجية (موتور كهربائى مثلا) . ويدخل الغاز الاسطوانه فى عملية السحب عن طريق صمام السحب او الدخول ويقوم الضاغط بضغط الغاز الى الضغط المطلوب حيث يخرج الغاز المضغوط عن طريق صمام الخروج . واذا كان دخول الغاز من جهة واحدة من الضاغط (البستم) يسمى الضاغط مفرد التأثير Single acting واذا كان دخول الغاز من جهة بحيث يقوم الضاغط بضغط الغاز من الجهة الاخرى بالتناوب يسمى الضاغط ثنائى التأثير Double acting . وفى العمليات الصناعيه التى تستخدم ضغوطا مرتفعه نوعا ما، يضغط الغاز فى اسطوانة الضغط المنخفض Low Pressure Cylinder ويستقبل الغاز المضغوط فى خزان يبرد من الخارج بواسطة ماء Intercooler وتقوم اسطوانة الضغط المرتفع High Pressure Cylinder بسحب الغاز من الخزان لتعيد ضغطه الى ضغط مرتفع . ويسمى الضاغط فى هذه الحالة بالضاغط متعدد المراحل Multi-Stage Compressor .

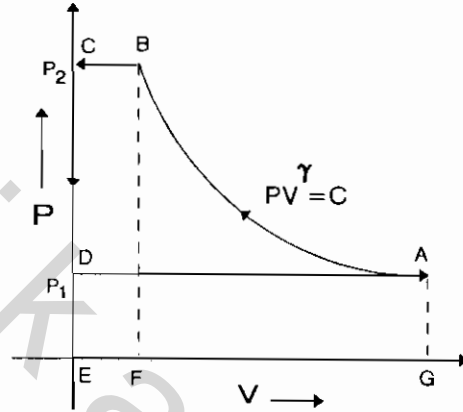
٢- الضواغط الدورانيه Rotary Compressors

والنوع الشائع الاستعمال منها هى الضواغط الطاردة المركزيه Centrifugal Compressors وتتكون هذه الضواغط من قرص مروحة مقسم الى ريش منحنيه بطريقة معينه ، ويتحرك القرص Impeller داخل غلاف خارجى يسمى Diffuser وفائدته تحويل الطاقة الناتجة عن السرعه العاليه للغاز (قوة الطرد المركزيه) الى طاقة ضغط . والضواغط الطاردة المركزيه تدور على سرعات مرتفعه اعلى بكثير من الضواغط التردديه .

وهذه عادة ما تستخدم فى ضغط كميات كبيره من الغاز تحت ضغوط بسيطه ويمكن زياده الضغط الناتج بتعدد مراحل الانضغاط واستخدام مبردات متوسطه

ومراوح الغازات ما هي الاضواغط طاردة مركزية تعمل على ضغوط منخفضة (اقل من واحد رطل قوه على البوصه المربعه) وسوف يجيء ذكرها فيما بعد .

الدوره النموذجيه او النظرية لضاغط ذو مرحله واحده :



شكل (٢-١٤) الدوره النموذجية لضاغط ذي مرحله واحده

وتتكون الدوره من :

١- سحب كمية من الغاز داخل اسطوانة الضاغط تحت ضغط ثابت P_1 تمثل بالاجراء DA.

٢- ضغط الغاز ادياباتيكيًا من حالة A الى الحاله B أى رفع الضغط الى P_2 ، ويتبع هذا الاجراء القانون :

$$PV^\gamma = C$$

٣- طرد الغاز المضغوط الى خزان الاستقبال تحت ضغط ثابت P_2 ويمثلها الاجراء BC
٤- انخفاض فى الضغط من P_2 الى P_1 وبعدها تبدأ دورة جديدة بسحب كمية اخرى من الغاز .

بالاشارة الى الرسم البيانى للدوره شكل (٢-١٤)، يكون الشغل اللازم لضغط الغاز لكل دوره كما يأتى :

$$\begin{aligned} \text{Work needed} &= \text{Area ABCD} \\ &= \text{ABFG} + \text{BCEF} - \text{ADEG} \end{aligned}$$

$$\text{Work needed} = \frac{P_2 V_2 - P_1 V_1}{\gamma - 1} + P_2 V_2 - P_1 V_1$$

$$= \frac{\gamma P_2 V_2 - \gamma P_1 V_1}{\gamma - 1}$$

$$W = \frac{\gamma}{\gamma - 1} (P_2 V_2 - P_1 V_1)$$

$$W = \frac{\gamma}{\gamma - 1} P_1 V_1 \left[\frac{P_2 V_2}{P_1 V_1} - 1 \right]$$

$$P_1 V_1^\gamma = P_2 V_2^\gamma \quad \text{ولكن}$$

$$\therefore \frac{V_2}{V_1} = \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{-1}{\gamma}}$$

$$\therefore W = \frac{\gamma}{\gamma - 1} P_1 V_1 \left[\left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1 \right] \quad (3-72)$$

مثال :

ضاغط هواء ترددي مفرد التأثير ذو اسطوانته واحدة قطرها ١٥ سم وطول مشوار مكبس الضاغط ٢٤ سم. استخدم لضغط كمية من الهواء أدبياتيكية من ضغط مطلق مقداره واحد بار ودرجة حرارة ١٧ °م إلى ضغط مطلق مقداره ٦ بار. احسب القدرة الحصانية النظرية اللازمة لتشغيل الضاغط إذا كان عدد لفات عمود الإدارة الرئيسي ١٠٠ لفة/دقيقه.

احسب كذلك كمية الهواء المضغوطة في الدقيقة .

$$\gamma = 1.4, \quad R = 287 \text{ Nm/kg. K}$$

الحل :

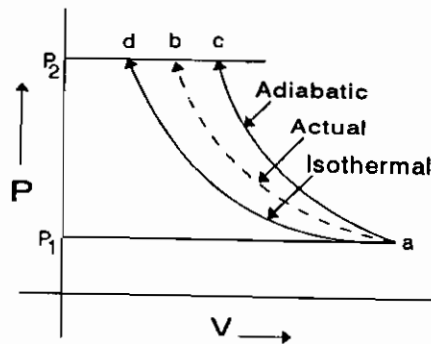
$$\text{Work } W = \frac{\gamma}{\gamma - 1} P_1 V_1 \left[\left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1 \right]$$

$$\begin{aligned}
 V_1 &= \frac{\pi}{4} D^2 L \\
 &= \frac{\pi}{4} \times \left(\frac{15}{100}\right)^2 \times \left(\frac{24}{100}\right) = 0.00424 \text{ m}^3 \\
 W &= \frac{1.4}{1.4-1} (1 \times 0.00424) \times 10^4 \left[\left(\frac{6}{1}\right)^{\frac{1.4-1}{1.4}} - 1 \right] \\
 &= \frac{1.4}{0.4} \times 1 \times 0.00424 \times 10^4 [6^{0.286} - 1] \\
 &= 148.4 [(6)^{0.286} - 1] \\
 &= 148.4 [1.6 - 1] \\
 W &= 89 \text{ kg.m/rev.} \\
 \text{H.P.} &= \frac{W.n}{\text{const.}} = \frac{89 \times 100}{4500} \\
 \text{HP} &= 1.98 \text{ hp}
 \end{aligned}$$

ومن القانون العام للغازات

$$\begin{aligned}
 P_1 V_1 &= m.R.T_1 \\
 \therefore m &= \frac{(1 \times 10^5)(0.00424) \times R.p.m}{(287)(273+17)} \\
 \therefore m &= \frac{424}{(287)(290)} \times 100 \text{ kg/min.} \\
 m &= 0.51 \text{ kg/min}
 \end{aligned}$$

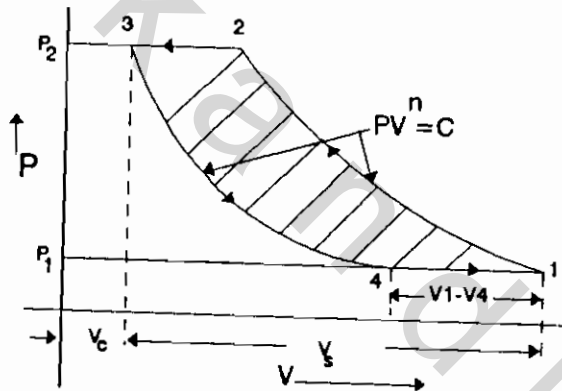
شكل الضاغط :



شكل (٣-١٥) إجراءات إنضغاط الغاز في دورة الضاغط

كما هو موضح فى شكل (٢-١٥) يمثل المنحنى a-b اجراء الضغط لكمية من غاز من ضغط P_1 الى P_2 ويعتمد نوع الاجراء ab على كمية الحرارة المزالة من الغاز اثناء اجراء الانضغاط بدون تبادل حرارى كالاجراء a-c كان هذا الاجراء اديباتيكا واذا ازيلت كمية من الحرارة من الغاز اثناء هذا الانضغاط بحيث تظل درجة الغاز ثابتة كان الاجراء ايزوسيرمالى كما فى الاجراء a-d. ولكن فى الواقع يتم اجراء الضغط طبقا للاجراء العام $PV^n = C$ ثابت، ويمثله المنحنى a-b ولما كان اجراء ثبوت درجة الحرارة هو اقل اجراءات الانضغاط المذكورة الذى يستلزم شغلا لذلك تعتبر الدورة التى يتم فيها الانضغاط بثبوت درجة الحرارة دورة مثالية.

حجم الخلوص وجودة الامتلاء الظاهريه :



شكل (٢-١٦) حجم الخلوص فى دورة الضاغاط

افترض فى جميع ماسبق ذكره ان ضاغط الغاز ذو مرحلة واحدة وبدون حيز خلوص ولكن فى الضواغط الحقيقية لابد من ترك حيز خلوص يسمح بتركيب الصمامات وحتى يمكن تفادى اصطدام المكبس بغطاء الاسطوانة (شكل ٢-١٦). وعلى ذلك فانه يتبقى فى الاسطوانة بعد ضغط الغاز كمية من الغاز المضغوط تشغل حيز الخلوص عند الحالة 3. وعندما يعكس المكبس حركته تعتمد هذه الكمية طبقا للاجراء 3-4 حتى اذا ما وصل ضغط الغاز داخل الاسطوانة الى ضغط السحب P_1 يفتح صمام السحب ويدخل الغاز الجديد وبذلك لايشغل جميع حجم الشوط اى انه تقل كمية الغاز التى تدخل الى الضاغاط اثناء شوط السحب ونتيجة لذلك يقل شغل الدورة ويصبح :

$$W = \frac{n}{n-1} P_1 (V_1 - V_4) \left\{ \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right\} \quad (3-73)$$

وذلك بفرض ان أس منحنى الانضغاط والتمدد يكون واحداً.

ويسمى الحجم $(V_1 - V_4)$ بالحجم الفعال للشوط ويؤدي وجود حيز الخلوص الى تقليل كمية الهواء المسلمه ويترتب على ذلك ان يلزم زيادة الشغل المطلوب لإدارة الضاغط او استخدام ضاغط ذو سعة اكبر حتى تعطى كمية الهواء المضغوطة نظرياً بضاغط بدون حيز خلوص.

وتسمى النسبة بين الحجم الفعال للشوط الى حجم الشوط جودة الامتلاء الظاهريه
اى ان:-

Apparant Volumetric Efficiency $(\eta_{vol.ap})$

$$\eta_{vol.ap} = \frac{V_1 - V_4}{V_{st}} \quad (3-74)$$

وجودة الامتلاء الظاهريه ليست مقياساً لكتلة الغاز الفعليه المضغوطة حيث انها لا تدخل فى الاعتبار اختلاف ظروف الغاز عند نهاية شوط التمدد عن ظروف الغاز عند الدخول الى الضاغط - وكذلك ماقد يتسرب من غاز اثناء التمدد والانضغاط داخل الضاغط وعلى ذلك تعرف جودة الامتلاء الفعليه بأنها تساوى

Actual Volumetric Efficiency $(\eta_{vol.ac.})$

$$\eta_{vol.ac.} = \frac{\text{Mass of actual compressed Volume}}{\text{Mass of swept volume at inlet conditions}} \quad (3-75)$$

وفى الضواغط التى يمكن اهمال تسرب الغاز منها وبفرض أن ضغط السحب يساوى الضغط عند نهاية شوط التمدد 3-4 فإنه :-

$$\eta_{vol.ac.} = \eta_{vol.ap.} \frac{T_o}{T_1} \quad (3-76)$$

حيث T_o = درجة حرارة الغاز عند المدخل (تعتبر عادة 20°م او 68°ف).

الباب الرابع

سريان الموائع

Flow of Fluids

ويقصد بالموائع المواد القابلة للانضغاط مثل الغازات والمواد الغير قابلة للانضغاط مثل السوائل . وفى كلا الحالتين ينحكم فى السريان القوانين الاساسيه الآتية :

١- قانون ثبوت الكتلة Conservation of Mass

٢- قانون ثبوت الطاقة Conservation of Energy

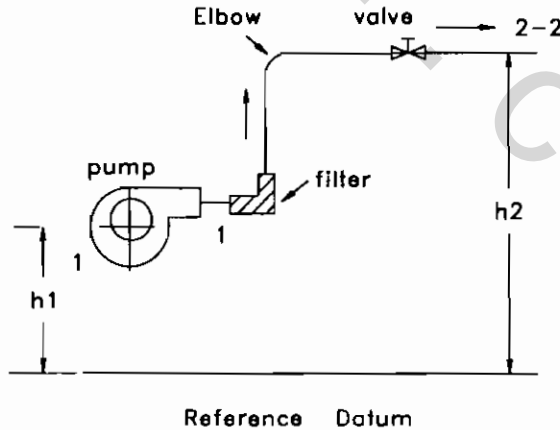
٣- قوانين نيوتن للحركة وهى :

أ- كل جسم يستمر فى حالة سكون او فى حالة حركة منتظمة فى خط مستقيم مالم تؤثر عليه قوة خارجية تغير من حالته .

ب- معدل تغير دفع المادة Momentum يتناسب مباشرة مع القوة المسببه لدفعه وفى نفس اتجاهها .

ج- لكل فعل رد فعل مساو له فى القوة ومعاكس فى الاتجاه .

فاذا افترضنا ان هناك مجموعة هيدروليكيه مكونه من مضخه ومرشح ، وصمام ، وكوع Elbow وماسورة توصيل كما هو مبين بالشكل (١-٤) .



شكل (١-٤) رسم تخطيطى للمجموعة الهيدروليكيه

واعتبرنا ان حدود هذه المجموعة هى النقطتين ١ ، ٢ فإذا كان معدل سريان السائل فى هذه الحالة ثابتا ولايتغير نتيجة لتخزين جزء منه فى المجموعة فانه يمكن وصف المجموعة رياضيا كما يأتى :-

$$M = \rho_1 A_1 V_1 = \rho_2 A_2 V_2 = \dots = \rho_n A_n V_n \quad (4-1)$$

حيث ان :

$$\begin{aligned} A &= \text{مساحة مقطع السريان} \\ V &= \text{سرعة السريان} \\ \rho &= \text{كثافة السائل} \\ M &= \text{معدل كتلة سريان السائل} \end{aligned}$$

وتسمى هذه العلاقة بالمعادلة الاستمرارية للكتلة Continuity equation

واذا طبقنا على هذه المجموعة قانون ثبوت الطاقة مع اعتبار السائل عند درجة حرارة ثابتة فان طاقة الرفع وطاقة الشغل المضاف من المضخة بعد تنزيل طاقة الاحتكاك الناتجة عن السريان ، ويمكن تمثيلها رياضيا كالآتى مع اعتبار وحدة واحدة من كتلة السائل :

$$h_1 + \frac{P_1}{\rho} + \frac{V_1^2}{2g} + W - F = h_2 + \frac{P_2}{\rho} + \frac{V_2^2}{2g} \quad (4-2)$$

حيث ان :

$$\begin{aligned} W &= \text{الشغل المضاف الى المضخة.} \\ F &= \text{طاقة الاحتكاك المفقودة فى المواسير والمرشحات والكيعان والصمامات...} \end{aligned}$$

وتسمى هذه العلاقة بمعادلة برنولى Bernoulli Equation

وطاقة الاحتكاك " F " تعتمد على عدة عوامل اهمها :

- ١- نوع السريان .
- ٢- حجم وشكل مقطع السريان .
- ٣- مدى خشونة او نعومة سطح السريان الداخلى .
- ٤- سرعة السريان .

ويمكن حساب قيمة F باستخدام معادلة دارسى Darcy Equation

$$F = f_c \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{V^2}{2g} \quad (4-3)$$

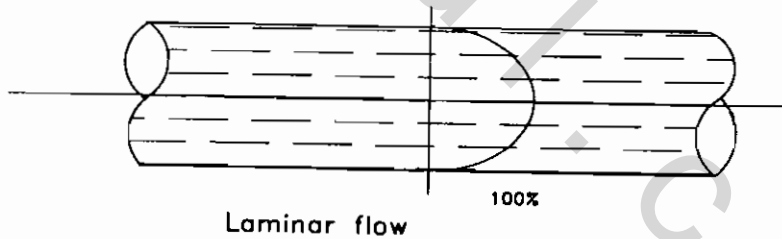
حيث أن :

$$\begin{aligned} f_c &= \text{معامل الاحتكاك (غير مميز)} \\ L &= \text{طول مجرى السريان} \\ D &= \text{قطر مجرى السريان} \\ V &= \text{سرعة السريان} \\ g &= \text{عجلة الجاذبيه الارضيه} \end{aligned}$$

يمكن حساب معامل الاحتكاك f_c بمعرفة نوع السريان ودرجة خشونة او نعومة مجرى السريان (جدول ٤-١).

انواع السريان :

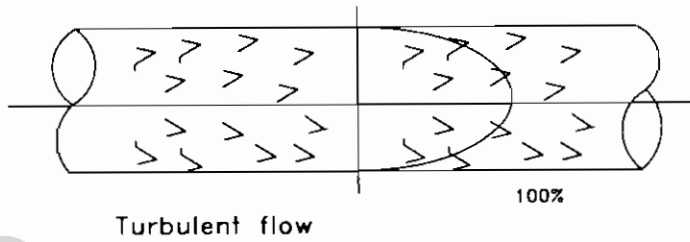
١- السريان الطبقي أو الانسيابي أو المتوازي : Streamlined or Laminar Flow



شكل (٤-٢) سريان طبقي متوازي

ويتميز بان المائع يتحرك ببطيء في شرائح موازيه لبعضها بدون اى تداخل بينها . وتكون كل شريحه من المائع سرعتها ثابتة وهذا لايعنى ان كل الشرائح تتحرك بنفس السرعة (شكل ٤-٢).

٢- السريان الدوامي المضطرب : Turbulent or Eddy Flow



شكل (٢-٤) سريان دوامى مضطرب

وفى هذا النوع من السريان يتحرك المائع بسرعات مرتفعة ولا يمكن تحديد طبقات متوازية للمائع لانها تكون متداخلة مع بعضها وفى حركة مضطربة ودوامية شكل (٢-٤).

فاذا افترضنا انه يوجد لدينا مائع يتحرك داخل مجرى اسطوانى (ماسورة مثلا) فاننا نلاحظ ان طبقة المائع الملاصقة لجدار الماسورة تكون فى حالة سكون اى سرعتها تساوى صفرا وان سرعة الطبقات الاخرى تزداد الى ان تصل عند المحور الى اعلى قيمة لها . وهذا ينطبق على السريان سواء كان متوازيا او مضطربا .

واذا زادت سرعة السريان المتوازي داخل مجرى السريان فاننا نلاحظ انه توجد مرحلة يبدأ عندها السريان فى الاضطراب وتتداخل طبقات السائل تدريجيا الى ان تصل الى حالة الاضطراب الكامل . وتسمى هذه المرحلة بمرحلة الانتقال Transition Region وتسمى السرعة التى تبدأ عندها هذه المرحلة بالسرعة الحرجة Critical velocity. وقد وجد العالم الانجليزى رينولدز Reynolds ان هذه السرعة تعتمد على اربعة عوامل حددها فى علاقة رياضية كما يأتى :

$$\text{Reynolds Modulus} = \frac{\rho V D}{\mu} \quad (4-4)$$

حيث أن :

V = السرعة المتوسطة للسريان

D = قطر مجرى السريان

ρ = كثافة المائع

μ = لزوجة المائع

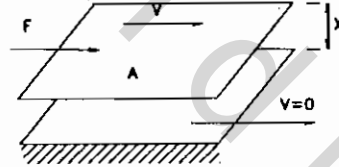
وانه من المهم جدا ملاحظة ان معامل رينولدز غير مميز ويجب مراعاة ذلك عند اختيار الوحدات، المتناظرة لمكونات هذا المعامل وقد وجد ان قيمة معامل رينولدز اذا كانت اقل من ٢١٠٠ يكون السريان متوازى واذا زادت عن ٤٠٠٠ يكون السريان مضطرب ودوامى .

وفى حالة اذا كان مجرى السريان غير اسطوانى فيستخدم القطر الهيدروليكي فى معامل رينولدز وهو يساوى :

$$\text{Hydraulic Diameter} = \frac{4 \times \text{Cross Sectional Area of Flow Conduit}}{\text{Wetted Perimeter}} \quad (4-5)$$

اللزوجة : Viscosity

وهى مقياس لمدى احتكاك طبقات الموائع مع بعضها اى انها تعبر عن مدى مقاومة الموائع لاجهادات حركتها .



شكل (٤-٤) إنزلاق طبقات السائل

فاذا افترضنا انه توجد لدينا طبقتان من مائع ما تفصلهما مسافه X ومساحة سطح كل طبقه A وان الطبقة السفلى فى حالة سكون والعليا تتحرك بسرعة V (اى ان السرعة النسبيه للطبقة العليا عن السفلى هى V) فقد وجد من الدراسات المعملية انه اذا أثرت قوة F على الطبقة العليا وتسببت فى حركتها بسرعة V فان هذه القوى تتناسب تناسبا مباشرا مع السرعة ومساحة سطح الطبقة وعكسيا مع المسافه بين الطبقتين شكل (٤-٤).

ويمكن التعبير عن ذلك رياضيا كما يلى :

$$F = \frac{\mu V}{X} \cdot A \quad (4-6)$$

حيث أن :

F = القوة المؤثرة	رطل قوة	أو جم قوة (الداين) أو نيوتن
V = السرعة	قدم/ث	أو سم/ث أو متر/ث
X = المسافة	قدم	أو سم أو متر
A = مساحة سطح الطبقة	قدم مربع أو سم مربع	أو متر مربع
μ = معامل اللزوجة	Coefficient of Viscosity	

وتكون وحدات اللزوجة $\frac{\text{Lb}_f \cdot \text{sec.}}{\text{ft}^2}$ بالوحدات الانجليزية

أو $\frac{\text{gm}_f \cdot \text{sec.}}{\text{cm}^2}$ بالوحدات المترية أو $\frac{\text{N} \cdot \text{sec.}}{\text{m}^2}$ بوحدات النظام الدولي

ويمكن التعبير عن اللزوجة بوحدات الكتلة وذلك باستخدام معامل التحويل

(gc) ٣٢.٢ رطل كتلة/قدم^٢ رطل قوة.ث^٢ بالوحدات الانجليزية أو ٩٨٠ جرام كتلة/سم^٢ جرام قوة.ث^٢ بالوحدات المترية .

وعادة مايعبر عنها بوحدات البواز Poise أو السنتيبواز Cp .

$$\text{Poise} = \frac{\text{Dyne} \cdot \text{s}}{\text{cm}^2} \text{ or } \frac{\text{g}}{\text{cm} \cdot \text{s}} \text{ or } 10 \frac{\text{kg}}{\text{m} \cdot \text{s}}$$

حساب معامل الاحتكاك :

يمكن حساب معامل الاحتكاك (f_c) في نظام السريان المتوازي المستقر من المعادله

الآتيه :

$$2100 > \text{Re} > \text{zero}, \quad f_c = \frac{64}{\text{Re}} \quad (4-7)$$

وفي حالة السريان الدوامي المضطرب يمكن حسابه من :

$$\text{Re} > 4000, \quad f_c = 0.316 \text{Re}^{-0.25} \quad (4-8)$$

ومن المتعارف عليه عمليا ان الفقد الناتج عن احتكاك المائع اثناء سريانه فى مجارى السريان ووصلاتها (مواسير - محابس - كيكان...) فانه يمكن التعبير عن الفقد باحدى الطريقتين :

١- كنسبة معينه من الطاقة الحركية اى ان :

$$C_s \times \frac{V^2}{2g}$$

٢- كطول اضافى لطول مجرى السريان يعادل :

٤٠ الى ٦٠ $\times C_y \times$ قطر مجرى السريان

حيث C_y, C_s نسب معينه يمكن الحصول عليها من جداول خاصه .

جدول (٤-١) يبين القيم المختلفة لمعامل الاحتكاك داخل الوصلات في المواسير :

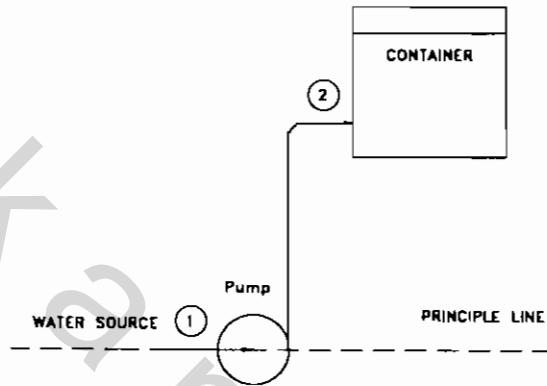
نوع الوصلة	C_y معامل الطول الاضافى	C_s معامل طاقة الحركة
كوع ٤٥°	١٥	٠.٣
كوع ٩٠° قياس	٣٢	٠.٧٤
كوع ٩٠° متوسط	٢٦	٠.٦
كوع ٩٠° طويل	٢٠	٠.٤٦
كوع ٩٠° مربع	٦٠	١.٣٠
وصلة حرف Tee (اتجاه واحد)	٦٠	١.٣٠
(اتجاهين)	٩٠	١.٩٠
محبس سكينه كامل الفتح	٧	٠.١٣
محبس كروى كامل الفتح	٣٠٠	٦.٠٠
محبس زاوية كامل الفتح	١٧٠	٣.٠٠
D_1/D_2		
تخفيض فجائى		٠.١
		٠.٣
		٠.٥
فى قطر ماسورة		٠.٧
		٠.٩

المصدر : (Handerson and Perry 1976)

مثال (١):

خزان للمياه يوجد على إرتفاع ٢ متر من مصدر للمياه اذا كانت ماسورة توصيل المياه إلى الخزان قطرها الداخلى ١٥ سم ومعدل سريان المياه ٢٠٠٠ لتر فى الدقيقة . إحسب القدرة بالحصان اللازمه لرفع هذه الكمية من المياه مع إهمال أى فقد فى الطاقة .

الحل



$$2000 \text{ Lit/min} = \frac{2000 \times 1000}{(100)^3} = 2 \text{ m}^3/\text{min}$$

$$\begin{aligned} \text{Cross - Sectional area} &= \frac{\pi}{4} D^2 \\ &= \frac{\pi}{4} \left(\frac{15}{100}\right)^2 = 0.0177 \text{ m}^2 \end{aligned}$$

سرعة السائل عند مخرج الماسورة (V)

$$V = \frac{2}{0.0177} = 113 \text{ m/min}$$

ويتطبيق معادلة برنولى وإهمال فقد الاحتكاك وتغيير الاتجاه والفقء فى أى وصلات على الخط مع أخذ مصدر المياه كخط أساس .

$$\therefore W = h + \frac{V^2}{2g}$$

$$W = 3 + \frac{(113)^2}{2 \times 60 \times 60 \times 9.81}$$

$$= 3 + 0.18$$

$$= 3.18 \text{ kgm/kg.}$$

∴ الشغل الاجمالى = المعدل الوزنى للسريان × الشغل لكل وحدة وزنيه

$$\rho_{\text{water}} = 1000 \text{ kg/m}^3$$

$$\therefore W_T = (1000) (2) (3.18)$$

$$= 6360 \text{ kg.m/min.}$$

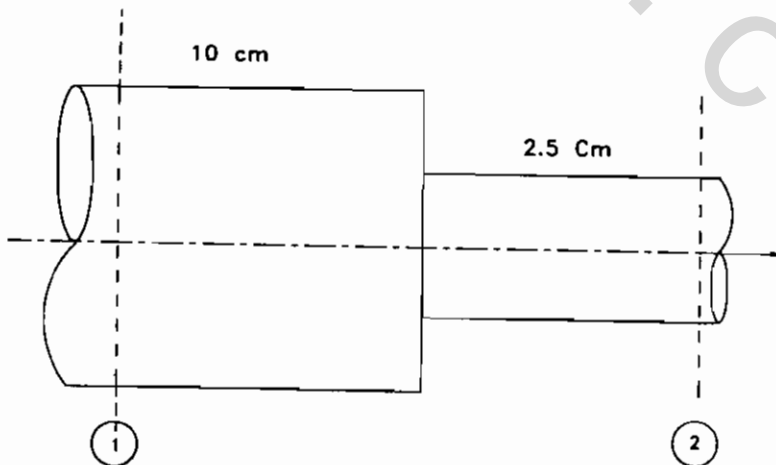
$$= \frac{6360}{4500}$$

$$W_T = 1.41 \text{ HP}$$

مثال (٢) :

تسرى المياه داخل ماسورة قطرها الداخلى ١٠سم إلى ماسورة قطرها الداخلى ٢.٥سم وذلك بمعدل ٨٠٠ لتر/دقيقه اذا كان الضغط فوق سطح الماء فى الماسورة ذات القطر الكبير هو ٢ بار ، إحسب مقدار الضغط فى الماسورة ذات القطر الصغير وذلك بإهمال الفقد فى السريان نتيجة الاحتكاك وتغيير مقطع السريان .

الحل



مساحة مقطع السريان (A_1) عند النقطة (1)

$$A_1 = \frac{\pi}{4} D_1^2$$

$$A_1 = \frac{\pi}{4} \left(\frac{10}{100} \right)^2$$

$$A_1 = 0.00785 \text{ m}^2$$

سرعة السريان (V_1) عند النقطة (1)

$$V_1 = \frac{800 \times 1000}{60 \times (100)^3 \times 0.00785}$$

$$V_1 = 1.7 \text{ m/sec.}$$

ومن معادلة الاستمرارية

$$A_1 V_1 = A_2 V_2$$

$$\therefore V_2 = \frac{A_1}{A_2} \cdot V_1$$

$$V_2 = \frac{\pi/4 D_1^2}{\pi/4 D_2^2} \cdot V_1$$

$$= \left(\frac{10}{2.5} \right)^2 V_1$$

$$= 16 \times 1.7$$

$$\therefore V_2 = 27.2 \text{ m/sec.}$$

وباعتبار أن محور الماسورة هو خط الأساس نجد من معادلة برنولى أن :

$$\frac{P_1}{\rho} + \frac{V_1^2}{2g} = \frac{P_2}{\rho} + \frac{V_2^2}{2g}$$

$$(100)^2 \times \frac{3}{1000} + \frac{(1.7)^2}{2 \times 9.81} = \frac{(100)^2 P_2}{1000} + \frac{(27.2)^2}{2 \times 9.81}$$

$$\therefore 10P_2 = 30 + 0.147 - 37.7$$

$$= -7.56$$

$$\therefore P_2 = -0.756 \text{ bar.}$$

ومعنى الاشارة السالبة أن الضغط فى ماسورة الخروج أقل من الضغط الجوى العادى
أي أن هناك تفريغ (ضغط سالب).

الباب الخامس

سريان الموائع اللانيوتونية

Non-Newtonian Fluid Flow

تكلّمنا فى الفصل السابق عن سريان الموائع النيوتونية بمعنى أنها يتحكم فى تدفقها أو سريانها قانون نيوتن ، وعامة سلوك أى مادة يتبع إحدى الحالات الثلاثة التالية : المرونة - Elasticity - اللدونة Plasticity - اللزوجة Viscosity .

ففى حالة السلوك المرن المثالى يكون الإجهاد (τ) الواقع على جسم ما يتناسب تناسباً طردياً مع الانفعال (γ) والذى يحكمه قانون هوك Hook's Law .

$$\tau = E \gamma \quad (5-1)$$

حيث E هو معامل المرونة أو معامل يانج Young Modulus وإذا أثرت قوة ما على مادة صلبة لاينتج عنها حركة حتى نصل إلى إجهاد الخضوع Yield Stress حيث تكون الحركة لحدود لها تحت تأثير هذه القوة فيكون ذلك ممثلاً لللدونة .

ومعظم المنتجات الغذائية تسلك سلوكاً مختلطاً بين المواد المرنة واللزجة وتختلف فى ذلك عن سلوك المواد (الموائع) اللانيوتونية بمعنى أن العلاقة التى تحكم تناسب إجهاد القص مع معدل القص علاقة غير خطية تعتمد على كل من الزمن ومعدل التناقص فى سرعة الطبقات على بعضها .

وفى محاولات عديدة وجد أن أنسب علاقة لتمثيل السلوك الغير نيوتونى رياضياً هو استخدام مايسمى قانون الاس Power Law

$$\tau = K \gamma^n \quad (5-2)$$

حيث :

K = معامل القوام وهو مايعادل معامل اللزوجة فى حالة الموائع

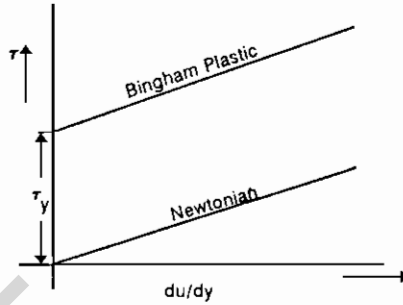
النيوتونية .

n = الاس ويساوى الواحد الصحيح فى حالة الموائع

النيوتونية .

ويمكن تقسيم الموائع غير النيوتونية إلى مايتى :-

١- موائع بنجهاام بلاستيك Bingham Plastic Fluids

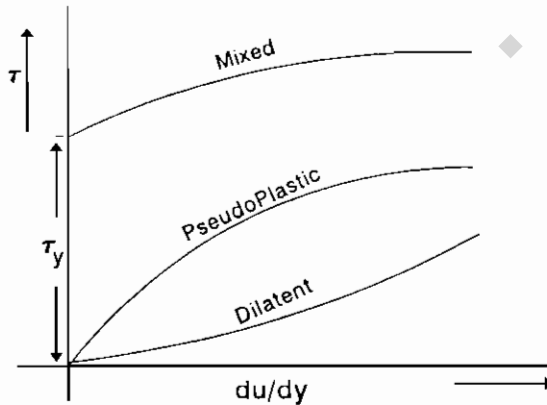


شكل (١-٥) العلاقة بين إجهاد القص ومعدل القص

وهى مواد لها خاصية عدم البدء فى السريان أو التدفق قبل الوصول إلى إجهاد خضوع Yield Stress وبعدها يكون السريان لزج عادى (شكل ١-٥).

$$\tau = K \left(-\frac{du}{dy} \right) + \tau_y \quad (5-3)$$

٢- موائع شبيهة البلاستيك Pseudo Plastic Fluids.



شكل (٢-٥) الموائع المختلفه

وهي تمثل أغلبية السوائل الغير نيوتونية حيث يكون هناك تناقص في اجهاد القص كلما زاد معدل القص وبذلك تكون قيمة n أقل من الواحد الصحيح ويكون منحنى السريان مقعرا إلى أسفل (شكل ٢-٥) .

٢- موائع ديلاطينيه Dilatent Fluids

وفيها يكون هناك زيادة في اجهاد القص كلما زاد معدل القص وتكون قيمة n أكبر من الواحد الصحيح وبذلك يكون منحنى السريان مقعراً إلى أعلى (شكل ٢-٥) .

٤- موائع مختلطة Mixed Fluids

وفيها يكون هناك اجهاد خضوع قبل السريان الشبه بلاستيكي كما هو مبين في الشكل (٢-٥) ويمكن تمثيلها بالمعادلة الآتية :

$$\tau = K \left(\frac{du}{dy} \right)^n + \tau_y \quad (5-4)$$

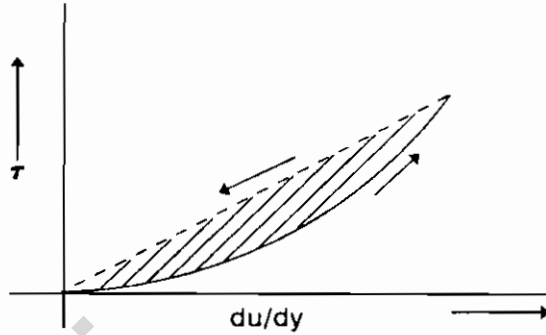
وهي الحالة العامة للموائع المختلطة .

وتكون $n > 1$ ، $\tau_y = 0$ في حالة المواد شبه بلاستيكية

وتكون $n < 1$ ، $\tau_y = 0$ في حالة المواد الديلاطينيه

وتنقسم المواد الديلاطينيه Dilatent إلى نوعين طبقا لتغير إجهاد القص

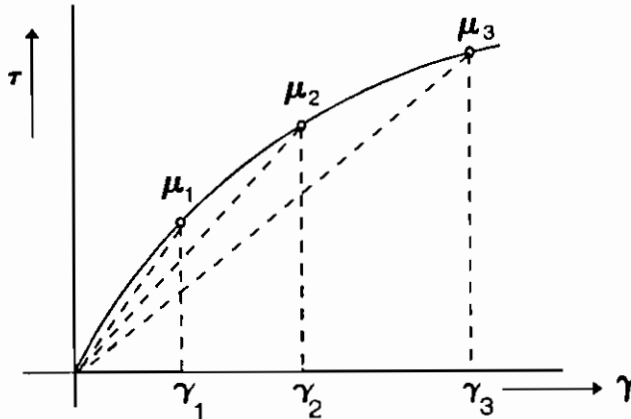
بالنسبة للزمن مع معدل القص . فإذا ما زاد إجهاد القص مع الزمن فإنه يطلق عليها موائع متزايدة القوام Rheopectic ، وإذا ما نقص إجهاد القص مع الزمن فإنه يطلق عليها مواد متناقصة القوام Thixotropic وينتج عن ذلك قصور في طاقة الاحتكاك بين الطبقات Hysteresis كما هو مبين في الشكل (٢-٥) .



شكل (٣-٥) طاقة الاحتكاك بين طبقات المائع

وتتأثر كل من اللزوجة والقوام إلى حد كبير بدرجة الحرارة ويعتبر استخدام معادلة Arrhenius Equation على نطاق واسع معبرا عن هذه العلاقة حيث يتناسب معامل اللزوجة أو معامل القوام تناسباً عكسياً مع درجة الحرارة المطلقة للمائع .

وفى كثير من تطبيقات صناعة الأغذية نجد ان هناك محاولات لقياس اللزوجة النيوتونية دون الحاجة الى معرفة خصائص انسياب السائل وينتج عن ذلك قياس اللزوجة الظاهريه Apparent Viscosity وهى التى تعبر عن اللزوجة لسائل نيوتونى له مقاومة للسريان عند قص محدد Shear Rate (شكل ٤-٥) وفى أغلب حالات الموائع الشبه بلاستيكية تتناقص اللزوجة الظاهريه عند زيادة معدل القص.



شكل (٤-٥) اللزوجة الظاهريه للمائع

μ_a = Apparent Viscosity

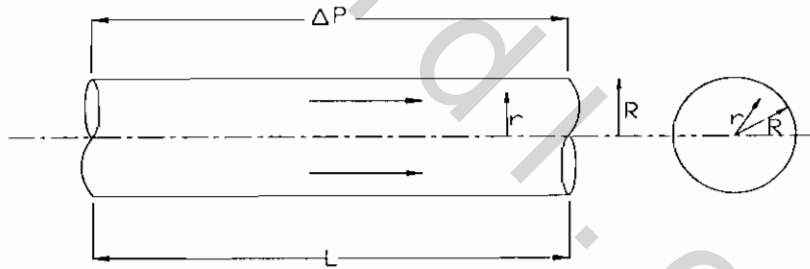
$\mu_a = \left(\frac{\tau}{\gamma} \right)$ at a given shear rate

أجهزة قياس اللزوجة أو القوام :

لقياس اللزوجة أو القوام لاي موائع غذائية يمكن إستخدام أجهزة خاصة تسمى فيسكومترات Viscometers أو ريومتترات Rheometers. ويوجد عادة جهازين أو طريقتين رئيسيتين : جهاز يعتمد على سريان المائع داخل الأنبيب ويسمى Tube Viscometer، وجهاز يعتمد على دوران المائع حول اسطوانه ومن خلال فراغ ضيق ويسمى Rotational or Coaxial Viscometer.

النوع الاول :

ريومتترات الأنبوبه الشعريه Capillary Tube Rheometers



شكل (٥-٥) ريومتترات الأنبوبه الشعريه

بصفه عامه تتضمن ريومتترات الأنبوبه الشعريه عدداً من أجهزة القياس التى تدفع السائل خلال انبويه معلوم قياساتها الهندسيه شكل (٥-٥). نستطيع الحصول على علاقه بين معدل القص واجهاد القص وذلك بقياس تدرج الضغط ومعدل السريان الحجمي للمائع خلال الأنبوبه الشعريه .

ويمكن الحصول على العلاقة بين معدل القص واجهاد القص اللازمه لدفع المائع خلال الأنبويه الشعريه عن طريق عمل ميزان للقوى على المقطع العرضى للأنبويه الشعريه .

القوه المسببه للسريان هى فرق الضغط بين طرفى الأنبويه ΔP

$$\tau = \frac{\Delta P \cdot \pi r^2}{2 \pi r L} \quad (5.5)$$

$$\begin{aligned} \text{حيث} \quad \pi r^2 &= \text{المساحة المقطعيه} \\ 2 \pi r L &= \text{المساحة السطحيه للشريحه} \end{aligned}$$

$$\therefore \tau = \frac{\Delta P \cdot r}{2L}$$

$$\begin{aligned} \tau &= K \dot{\gamma}^n \\ &= K \left(\frac{du}{dr} \right)^n \end{aligned}$$

$$\frac{\Delta P \cdot r}{2L} = K \left(\frac{du}{dr} \right)^n$$

$$\int_0^u du = \left(\frac{\Delta P}{2KL} \right)^{\frac{1}{n}} \cdot \int_0^r r^{\frac{1}{n}} dr$$

$$\int_0^u du = \left(\frac{\Delta P}{2KL} \right)^{\frac{1}{n}} \left[\frac{r^{\frac{n+1}{n}}}{\frac{n+1}{n}} \right]_0^R$$

$$\therefore u = \left(\frac{\Delta P}{2KL} \right)^{\frac{1}{n}} \frac{R^{\frac{1+n}{n}}}{\left(\frac{1+n}{n} \right)} \quad (5-6)$$

ومعدل السريان الحجمى Q

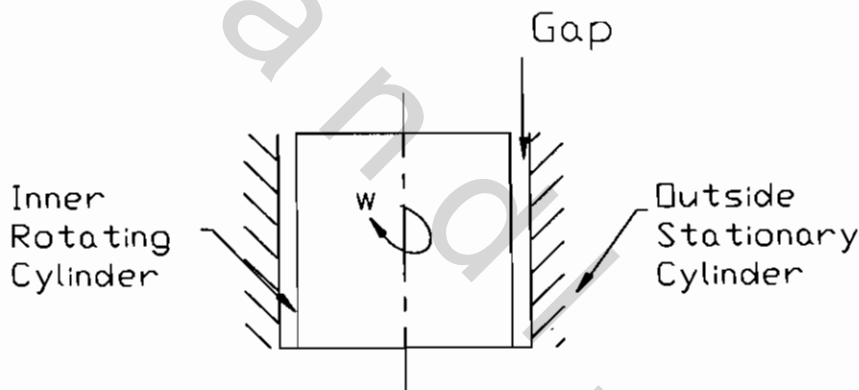
$$Q = \pi R^2 \cdot u$$

$$Q = \pi \left(\frac{n}{n+1} \right) R^{\frac{3n+1}{n}} \left(\frac{\Delta P}{2KL} \right)^{\frac{1}{n}} \quad (5-7)$$

ويمكن حساب كل من معامل القوام K والأس n وذلك برسم معدل السريان الحجمي Q مع قيمة $\left(\frac{\Delta P}{2L} \right)$ على ورق بياني لوغاريتمي فيكون ميل الخط المستقيم الناتج هو قيمة الأس n ومقدار الجزء المقطوع مع المحور الرأسى يمكن حساب قيمة معامل القوام K منه .

النوع الثانى :

الريومتلات الدورانية المتمركزة Rotational Coaxial Rheometers



شكل (٦-٥) ريومتلات الاسطوانة الدورانية

تستخدم الريومتلات الدورانية شكل (٦-٥) لقياس إجهاد القص حيث تتعرض العينة فيها إلى معدل قص منتظم ، وتتم عملية القياس على أساس قياس عزم الدوران اللازم لإدارة الأسطوانة الداخليه عند عدد معلوم من الدوران لكل وحدة زمن . ويكون :

$$\Omega = (2\pi rL) \cdot \tau \cdot r \quad (5-8)$$

$$\gamma = -r \frac{d\omega}{dr} \quad (5-9)$$

حيث $\Omega =$ عزم الدوران = القوة $\times$ ذراع العزم
 $\omega =$ السرعة الزاوية

وحيث أن

$$\tau = K \left(-r \frac{d\omega}{dr} \right)^n \quad (5-10)$$

$$\therefore \frac{\Omega}{2\pi L \cdot r^2} = K \left(-r \frac{d\omega}{dr} \right)^n$$

$$\therefore -r \frac{d\omega}{dr} = \left(\frac{\Omega}{2\pi KL} \right)^{\frac{1}{n}} \cdot \frac{1}{r^{\frac{2}{n}}}$$

$$-d\omega = \left(\frac{\Omega}{2\pi KL} \right)^{\frac{1}{n}} \cdot \frac{dr}{r^{\frac{2}{n}+1}}$$

$$-\int_{\omega_o}^{\omega_i} d\omega = \left(\frac{\Omega}{2\pi KL} \right)^{\frac{1}{n}} \int_{R_o}^{R_i} \frac{dr}{r^{\frac{2}{n}+1}}$$

$$\therefore -\omega_i = \left(\frac{\Omega}{2\pi KL} \right)^{\frac{1}{n}} \left[\frac{r^{-\frac{2}{n}+1}}{-\frac{2}{n}+1} \right]_{R_o}^{R_i}$$

$$-\omega_i = -\frac{n}{2} \left(\frac{\Omega}{2\pi KL} \right)^{\frac{1}{n}} \left(\frac{1}{R_i^{\frac{2}{n}}} - \frac{1}{R_o^{\frac{2}{n}}} \right)$$

$$\therefore \omega_i = \left(\frac{n}{2} \right) \left(\frac{\Omega}{2\pi KL} \right)^{\frac{1}{n}} \left(\frac{1}{R_i^{\frac{2}{n}}} - \frac{1}{R_o^{\frac{2}{n}}} \right) \quad (5-11)$$

ومن هذه المعادلة (رقم ٥-١١) يمكننا إيجاد قيمة كل من معامل القوام K وقيمة الأس n وذلك عند رسم العلاقة التجريبية لقيم مختلفه للوغاريتم السرعة الزاوية مع قيم لوغاريتم عزم الدوران على إحداثيات بيانية .

ويمكننا الحصول على معامل اللزوجة للسوائل النيوتونية من هذه المعادلة بوضع قيمة $l = n$ وبذلك .

$$\mu = \frac{\Omega}{4\pi \omega_i L} \cdot \left[\frac{1}{R_i^2} - \frac{1}{R_o^2} \right] \quad (5-12)$$

وبمقارنة المعادلتين الأخيرتين يمكننا الحصول على صيغه للعلاقة بين اللزوجة الظاهرية وكل من معامل القوام K والأس n . فإذا كانت السرعة الدورانية للاسطوانه الداخليه لجهاز قياس اللزوجة هي N .

$$\therefore \omega_i = 2\pi N$$

وبذلك تكون العلاقة المطلوبه هي :

$$\mu_A = - \left(\frac{1}{n} \right)^n \cdot (4\pi N)^{n-1} \cdot K \quad (5-13)$$

مثال (١) :

تم الحصول على النتائج التجريبيه التاليه من جهاز قياس لزوجة أنبوبي Tube Viscometer قطره ٢٦٧ . سم وطوله ٩١ . متر وكان المائع المستخدم هو صلصة التفاح Apple Sauce .

ΔP Pascal x 10 ⁵	Q m ³ /sec.10 ⁻⁴
١.٢	٠.٩١
١.٤٥	٢.٥
٢.٥٦	٢.١
١.٩٩	٣.٢
٢.١٢	٥.٢
٢.٤١	٨.٥
٢.٧	١٢.٤٩

إحسب كل من معامل القوام K وقيمة الأس n

الحل

معدل السريان الحجمي في الأنبوبة الشعريه يمكن الحصول عليه من المعادله :

$$Q = \pi \left(\frac{n}{n+1} \right) R^{\frac{3n+1}{n}} \cdot \left(\frac{\Delta P}{2KL} \right)^{\frac{1}{n}}$$

ويمكن إعادة الصياغة بدلالة الفقد في الضغط كالآتي :

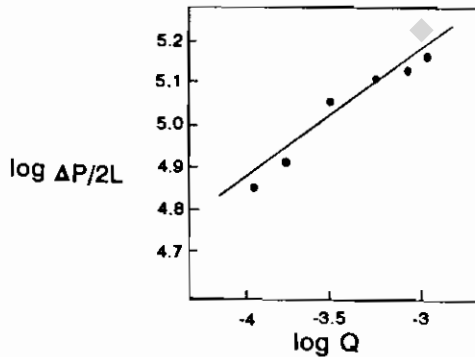
$$\frac{\Delta P}{2L} = \left(\frac{K}{\pi} \right)^n \left(\frac{n+1}{n} \right)^n \cdot \frac{1}{R^{3n+1}} \cdot Q^n$$

$$\log \left(\frac{\Delta P}{2L} \right) = \log K - n \log \pi + n \log \frac{n+1}{n} - (3n+1) \log R + n \log Q$$

وبتمثيل هذه المعادله بيانياً بحيث يكون المحور الرأسى يمثل $\log \frac{\Delta P}{2L}$ والمحور الأفقى

يمثل $\log Q$ فيكون ميل الخط المستقيم هو قيمة الأس n .

$\frac{\Delta P}{2L} \times 10^5$	$\log \frac{\Delta P}{2L}$	$\log Q$
٠.٧١٥	٤.٨٥	٤.٤٠
٠.٧٩٥	٤.٩٠	٣.٨٢
٠.٨٥٥	٤.٩٣	٣.٦٨
١.٠٩٥	٥.٠٤	٣.٥٠
١.١٧	٥.٠٧	٣.٢٩
١.٣٣	٥.١٢	٣.٠٧
١.٤٩	٥.١٧	٢.٩٠



ومن الرسم البيانى يكون الميل:

$$n = 0.28$$

وبالتعويض فى المعادله يمكن حساب قيمة K عند أى نقطة من نقاط الخط المستقيم

$$K = 4.074 \text{ Pa.s}^n$$

مثال (٢)

تم الحصول على القياسات التالية للزوجـة الظاهريـه لمركز المولاس عند درجة حرارة ٢٧٤ كلفن مستخدمين ريومتر أحادى الأسطوانه المتمركزه التى طولها ١١٤٣ . متر وقطرها ١٥٩ . متر وذلك عند سرعات دورانيه مختلفه. إحسب كل من قيمة معامل القوام K وقيمة الأس n .

$N(\text{rpm})$	$\mu_A (\text{Pa.s})$
٢٠٥	١٦.٦
٥٠٠	١٦.٠
١٠٠٠	١٥.٥
٢٠٠٠	١٥.٤
٥٠٠٠	١٤.٦
١٠٠٠٠	١٤.٢

الحل

من المعادله التى تربط اللزوجـه الظاهريـه وسرعة دوران اسطوانه جهاز الريومتر نجد أن :

$$\mu_A = \left(\frac{1}{n}\right)^n \cdot (4\pi N)^{n-1} \cdot K$$

$$\therefore \log \mu_A = n \log \left(\frac{1}{n}\right) + \log K + (n-1) \log (4\pi N)$$

ويرسم قيم كل من $\log \mu_A$ ، $\log (4\pi N)$ نجد أن .

$\log (4\pi N)$	$\log \mu_A$
٠.٢٨١-	١.٢٢٠
٠.٠٢٠	١.٢٠٤
٠.٣٢١	١.١٩٠
٠.٦٢٢	١.١٨٨
١.٠٢٠	١.١٦٤
١.٣٢١	١.١٥٢

فيكون ميل المنحنى $n-1 = -0.0417$

$$\therefore n = 0.9583$$

ويمكن التعويض في المعادلة السابقة لأى قيمة $\log \mu_A$ والمناظره لها قيمة $\log (4\pi N)$ ومنها يمكن حساب قيمة معامل القوام K

$$K = 15.5 \text{ Pa. s}^n$$

الاحتكاك Friction

إنه من الأهميه بمكان دراسة تأثير نوع السريان على معاملات الاحتكاك بين طبقات المائع وبعضها وبينها وبين الوعاء المحتوى عليها أثناء تطور الأنواع المختلفه من نظم السريان (طبقي - مرحلي - دوامي). وحيث أن معظم المواد الغذائيه المصنعه تسلك سلوك غير نيوتوني وتتأثر كثيرا بدرجة حراره أثناء معاملة هذه المواد حراريا ، وبالتالي يتطلب الأمر تطوير صيغ رياضيه للموائع الغير نيوتونيه لامكان استخدامها لوصف سلوك الموائع أثناء سريانها وبالأخص داخل الأنابيب أو المواسير الأسطوانيه .

ويتعين علينا استخدام رقم رينولدز آخر مختلف عن الموائع النيوتونيه ويسمى رقم رينولدز العام (GRe) Generalized Reynolds Number حيث :

$$GRe = \frac{\rho u^{2-n} D^n}{2^{n-3} \cdot K \left[\frac{3n+1}{n} \right]^n} \quad (5-14)$$

ومن الواضح أن رقم رينولدز العام سيتغير بتغير نفس المعاملات كما هو الحال بالنسبه لرقم رينولدز العادى ولكن يختلفان فى أن القيمه ستتغير مع تغير قيمة الأس n (دليل سلوك السريان) ويتلاحظ أن رقم رينولدز العام يساوى رقم رينولدز العادى عندما تكون قيمة $n=1$ وبالتالي تتحول K الى μ .

وفى حالة السريان الانسيابى أو الطبقي يكون

$$GRe < 2100 \quad \text{Laminar Flow}$$

$$f = \text{friction factor} = \frac{64}{GRe}$$

وفى حالة السريان الدوامي المضطرب

$$GRe < 2100 \quad \text{Laminar Flow}$$

$$f = 0.316 / GRe^{0.25}$$

ومن العوامل الأخرى الهامة فى عملية وصف سريان موائع الأغذية هو طاقة الحركة ، فإذا طبقنا قانون الأس بالنسبة لمائع يسرى داخل أنبوب اسطوانى فتكون طاقة الحركة كما يأتى :

$$K.E. = \frac{u^2}{2ag} = \text{Constant} = a$$

where

$$a = \frac{(4n+2)(5n+3)}{3(3n+1)^2}$$

ويلاحظ أن قيمته تساوى الواحد الصحيح عندما تكون $n = 1$ أى فى حالة سائل نيوتونى .

مثال (٢):

إحسب قيمة رقم رينولدز لتحديد نوع السريان لمركز المشمش ذو الخصائص الآتية :

$$n = 0.3 \quad K = 20 \text{ Pa.s}^n$$

إذا كان سريان مركز المشمش فى أنبوب قطره ٢.٥٤ سم وسرعة السريان المتوسطة تساوى ٠.٦ متر/ثانيه . ماذا تكون قيمة رقم رينولدز فى حالة سريان مياه ثقيه فى الأنبوب ؟

$$\rho_{\text{apricot}} = 1040 \text{ kg/m}^3$$

$$\rho_{\text{Water}} = 1000 \text{ kg/m}^3$$

$$\mu_{\text{water}} = 1488 \times 10^{-3} \text{ Pa.sec.}$$

الحل

$$GRe = \frac{\rho u^{2-n} D^n}{2^{n-3} K \left(\frac{3n+1}{n} \right)^n}$$

$$\text{GRe} = \frac{(1040) (0.6)^{1.7} \left(\frac{2.54}{100}\right)^{0.3}}{2^{-2.7} \cdot (20) \cdot \left(\frac{0.9+1}{0.3}\right)^{0.3}}$$

$$= 27.1$$

وعلى هذا الأساس يكون السريان طبقي متوازي

وفى حالة استخدام مياه نقيه

$$\text{Re} = \frac{\rho u D}{\mu}$$

$$= \frac{(1000) (0.6) \left(\frac{2.54}{100}\right)}{1488 \times 10^{-3}}$$

$$= 10.24$$

وكذلك يكون السريان طبقي متوازي .

مثال (٤)

يتم ضخ صلصة التفاح Apple Sauce خلال ماسورة قطرها ٥سم بسرعة متوسطة قدرها ٢ متر/ثانيه ودرجة حرارة ٢٤°م أوجد نوع السريان واحسب قيمة معامل الاحتكاك اذا كان :

$$n = 0.408 \quad k = 0.66 \text{ Pa.s}^n$$

$$\rho = 1100 \quad \text{kg/m}^3$$

الحل

$$\text{GRe} = \frac{\rho u^{2-n} D^n}{2^{n-3} \cdot K \cdot \left(\frac{3n+1}{n}\right)^n}$$

سريان الموائع اللانيوتونية

$$GRe = \frac{(1100)(3)^{1.592}(0.05)^{0.408}}{2^{-2.592} \cdot (0.66) \cdot \left(\frac{1.224 + 1}{0.408}\right)^{0.408}}$$

$$= 8519$$

وعلي ذلك يكون السريان دوامى مضطرب

ولحساب قيمة معامل الاحتكاك نستخدم المعادلة :

$$f = \frac{0.316}{GRe^{0.25}}$$

$$f = \frac{0.316}{(8519)^{0.25}} = \frac{0.316}{9.607}$$

$$f = 0.033$$

مثال (٥) :

يتم ضخ عصير الطماطم بمعدل سريان قدرة ٥ جالون/دقيقة (القدم المكعب = ٧.٤٨ جالون) في ماسورة قطرها واحد بوصة ، فإذا كانت كثافته عصير الطماطم = ١.١٣ جم/سم^٣ ومعامل القوام $K = 125$ داين.ث/سم^٢ وقيمة الأس اللانيوتوني ٤٥ احسب الفرق في ضغط العصير لمتر طولى من الماسوره .

الحل :

$$\text{Dyne} = \frac{\text{gm.cm}}{\text{sec}^2}$$

$$K = 125 \frac{\text{gm.cm} \cdot \text{sec.}}{\text{sec}^2 \cdot \text{cm}^2}$$

$$K = 125 \text{ gm/sec. cm. (Poise)}$$

$$\& n = 0.45$$

$$D = 1 \text{ " } = 2.54 \text{ cm}$$

$$\text{Volumetric flow rate} = \frac{5}{7.48} = 0.668 \text{ ft}^3/\text{min}$$

$$\pi r^2 u = 0.668$$

$$\therefore u = \frac{0.668}{\pi (0.042)^2} = 122.54 \text{ ft/min}$$

$$u = \frac{122.54 \times 100}{60 \times 3.28} = 62.27 \text{ cm/sec.}$$

$$\text{GRc} = \frac{8.D^n \cdot u^{2-n} \rho}{2^n \cdot K \cdot \left(\frac{3n+1}{n}\right)^n}$$

$$\therefore \text{GRc} = \frac{8. (2.54)^{0.45} \cdot (62.27)^{2-0.45} \cdot 1.13}{2^{0.45} \cdot 125 \cdot \left(\frac{3 \times 0.45 + 1}{0.45}\right)^{0.45}}$$

$$\text{GRc} = 23.1$$

$\therefore$ Flow is Laminar

$$\therefore f = \frac{64}{N_{\text{Gr}} \text{Re}} = \frac{64}{23.1} = 2.77$$

$$\therefore F = f \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{u^2}{2ag}$$

$$\begin{aligned} a &= \frac{(4n+2)(5n+3)}{3(3n+1)^2} \\ &= \frac{(4 \times 0.45 + 2)(5 \times 0.45 + 3)}{3(3 \times 0.45 + 1)^2} \\ &= \frac{(3.8)(5.25)}{3(2.35)^2} = 1.2 \end{aligned}$$

$$F = 2.77 \times \frac{100}{2.54} \times \frac{(62.27)^2}{2 \times 981 \times 1.2}$$

$$F = 179.6 \text{ cms} = 1.796 \text{ m}$$

$$\therefore \Delta P = F \cdot \rho$$

$$= 1.796 \times 1130$$

$$\Delta P = 2029.6 \text{ kg./m}^2$$

$$\begin{aligned} \text{or } \Delta P &= 2029.6 \times 9.81 \frac{\text{Newton}}{\text{m}^2} \text{ (Pascal)} \\ &= 19910 \\ \Delta P &= 0.199 \times 10^5 = 0.2 \times 10^5 \text{ Pascal} \end{aligned}$$

مثال (٦) :

يتم تسخين عصير طماطم في مبادل حرارى ذو مواسير عددها عشرون ماسوره وطول المبادل ٧ متر وقطر كل ماسوره $\frac{2}{8}$ بوصة . فإذا كان معدل السريان الحجمى ٤٠ لتر/دقيقه احسب مقدار الفقد فى الضغط خلال المبادل الحرارى اذا علمت أن كثافة عصير الطماطم = ١.١٢ كجم/متر مكعب ويعتبر العصير سائل لانيوتونى

$$\text{مقدار معامل القوام} = 1.12 \times 7 \times \frac{\text{داين} \times \text{ثانيه}}{\text{سم}^2} \text{ ومقدار الاس } 48 \dots$$

الحل

Every pipe will have a flow rate equal to 2 lit/min.

$$u = \frac{2 \times 1000}{\pi \times \left(\frac{0.75 \times 2.54}{2} \right)^2 \times 60} = 11.7 \text{ cm/sec.}$$

$$D = \frac{3}{4}'' = \frac{3}{4} \times 2.54$$

$$\therefore D = 1.905 \text{ cm}$$

$$\text{GRe} = \frac{8 \cdot D^n \cdot u^{2-n} \cdot \rho}{2^n \cdot K \cdot \left(\frac{3n+1}{n} \right)^n}$$

$$= \frac{8 \cdot (1.905)^{0.48} \cdot (11.7)^{2-0.48} \cdot (1.013)}{2^{0.48} \cdot (7.13 \times 10^{-7}) \cdot \left(\frac{3 \times 0.48 + 1}{0.48} \right)^{0.48}}$$

$$= \frac{(8) (1.363) (42) (1.013) (10^7)}{(1.395) (7.13) (2.18)}$$

$$\therefore \text{GRe} = 21.4 \times 10^7$$

∴ Flow is turbulent

وعلى هذا الأساس تطبق المعادلة

$$f = \frac{0.316}{\text{GRe}}$$

$$= \frac{0.316}{(21.4 \times 10^7)^{0.25}}$$

$$f = \frac{0.316}{121} = 2.61 \times 10^{-3}$$

$$\therefore F = f \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{u^2}{2g}$$

$$= (2.61 \times 10^{-3}) \cdot \left(\frac{700 \times 20}{1.905} \right) \cdot \frac{(11.7)^2}{(2 \times 981)}$$

$$F = 1.108 \text{ cm}$$

$$\Delta P = F \cdot \rho$$

$$= 1.108 \times 1.013$$

$$= 1.12 \text{ gm/cm}^2$$

$$= \frac{1.12 \times (100)^2}{(1000)} = 11.2 \text{ kg/m}^2$$

$$\text{or } \Delta P = 11.2 \times 9.81$$

$$\Delta P = 110 \frac{\text{Newton}}{\text{m}^2} \text{ or Pascal}$$

الباب السادس

المراوح والمضخات

Fans and Pumps

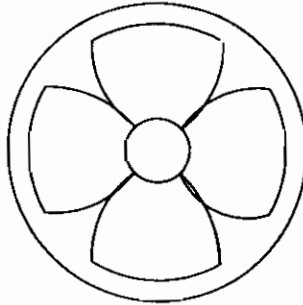
أولا : المراوح : Fans

تستخدم المراوح فى كثير من عمليات تصنيع المنتجات الغذائية مثل التسخين، التجفيف، التبريد، الحفظ فى الثلاجات التجارية، التهوية، الشفط (نقل المواد الحبيبة والمساحيق) كما سنذكر بالتفصيل فيما بعد. والفرق الوحيد بين المراوح والضواغط الدورانية للغازات هو أن المراوح تعمل عند ضغوط منخفضة (أقل من واحد رطل على البوصة المربعة) وينتج عن ذلك أن الغاز لا يضغط كلية ولكن بطريقة جزئية تتسبب فى تحريكه من جهة الى أخرى. وبذلك يكون حجم الغاز قبل وبعد المروحة ثابت تقريبا بخلاف الحالة فى الضواغط الدورانية فحجم الغازات يقل كثيرا بعد ضغطها.

وتنقسم المراوح الى مائتى :

أولا : النوع العمودى: Axial Flow or Propeller Fans

وفيه يكون مرور الغاز مواز للمحور (عمود الدوران) ويمتاز هذا النوع بأنه يعمل عند ضغط مرتفع وذو كفاءة عالية. وتستخدم هذه المراوح فى عمليات التهوية وشفط الأتربة من عنابر التصنيع وفى العمليات الصناعية التى تستلزم تقليب الغازات مع المواد المصنعة (شكل ٦-١).



شكل (٦-١) قطاع فى مروحة عمودية

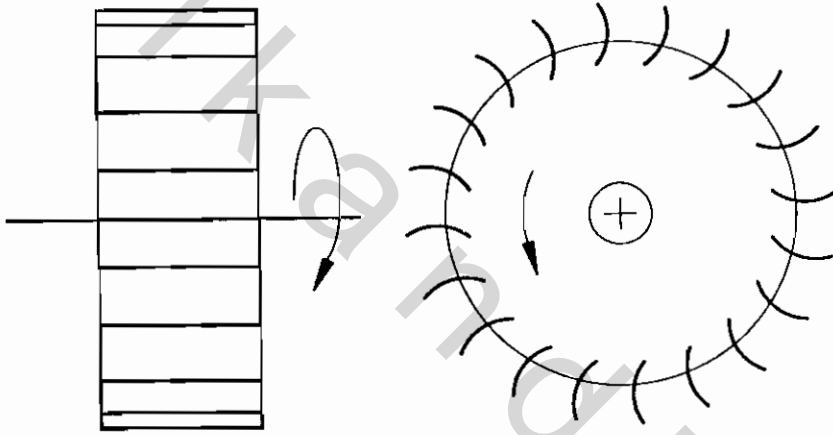
ثانيا : النوع القطرى او الطاردة المركزيه :

Radial or Centrifugal Flow Fan

وفيه تستخدم القوة الطارده المركزيه فى دفع الغازات . وتمتاز هذه المراوح بانها تدفع كميات كبيرة من الغازات عند ضغوط منخفضة . وهى ذات تصميمات متعددة اهمها :

١- المراوح ذات الريش المنحنية الى الامام:

Forward Curved Blade Fans

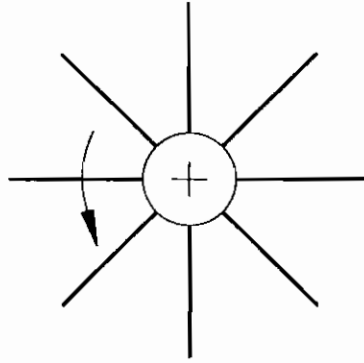


Forward Curved Blade Impeller

شكل (٢-٦) قطاع فى مروحة ذات الريش المنحنية إلى الامام

ويتكون قلب او قرص المروحة Rotor or Impeller من عدد كثير من الريش (حوالى ٦٠ ريشه) ذات سمك صغير وتكون عرضيه فى الاتجاه الموازى لعمود الحركة ومنحنيه الى الامام فى نفس اتجاه الدوران شكل (٢-٦) . وتعمل المروحة على سرعات بطيئة وتستخدم فى دفع الغازات التنظيف الخالية من الأتربة .

٢- المراوح ذات الريش المستقيمة : Straight Blade Fans



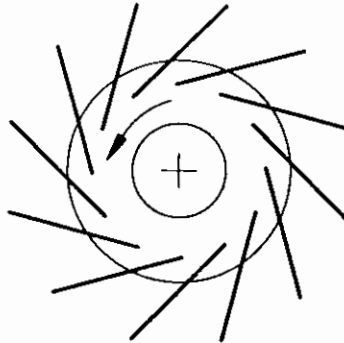
Straight Blade Impeller

شكل (٢-٦) قطاع فى مروحة ذات ريش مستقيمة

وهذا النوع له قرص يتكون من عدد قليل من الريش (حوالى ٦ الى ٢٠ ريشه على الاكثر) وطول الريشة يكون عادة حوالى ضعف او ثلاث مرات عرضها شكل (٢-٦). وتعمل المروحة على سرعات متوسطة ويمكن استخدامها فى دفع الغازات المحملة بالأتربة او المواد العالقة .

٢- المراوح ذات الريش المنحنية الى الخلف :

Backward Curved Blade Fans:



Backward Curved Blade Fan

شكل (٢-٦) قطاع فى مروحة ذات الريش المنحنية الى الخلف

ويتكون قرص ريش هذا النوع من حوالى ١٢ ريشة منحنية الى الخلف فى عكس اتجاه دوران القرص شكل (٦-٤) . وتعمل على سرعات عالية وتتميز بكفاءتها خصوصا عندما تكون الغازات خالية من الاتربة والمواد العالقة .

تقدير القدرة الحصانية والكفاءة الميكانيكية للمراوح :

اذا علم المعدل الحجمى لدفع غاز ما ، وكثافته ، ومقدار الضغط الواقع عليه من المروحة فانه يمكن تقدير القدرة الحصانية للمروحة من القانون الآتى :

$$\text{Theoretical Horse Power} = \frac{v.p.h}{\text{Standard HP}} \quad (6-1)$$

حيث أن :

$$V = \text{حجم الغاز المدفوع فى وحدة الزمن} \quad \text{ft}^3/\text{min} \text{ or } \text{m}^3/\text{min}$$

$$\rho = \text{كثافة الغاز} \quad \text{Lb/ft}^3 \text{ or } \text{kg/m}^3$$

$$h = \text{الرفع الديناميكي الكلى للمروحة} \quad \text{ft} \text{ or } \text{m}$$

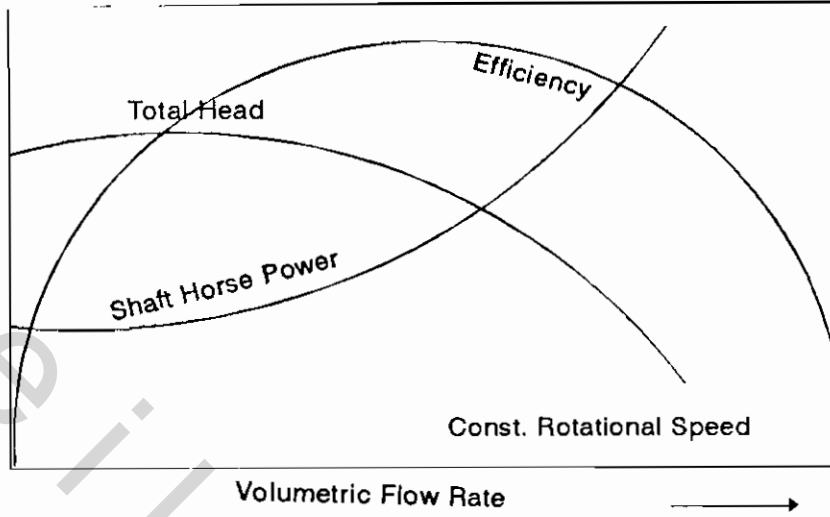
$$\begin{aligned} \text{Standard Horse Power} &= 33000 \text{ Lb.ft /min} \\ &= 4500 \text{ kg.m/min} \end{aligned}$$

Mechanical Efficiency of Fan ($\eta_{\text{mech.}}$)

$$\eta_{\text{mech.}} = \frac{\text{Theoretical Air Horse Power}}{\text{Brake Horse Power}} \quad (6-2)$$

وتعتمد القدرة الحصانية ومقدار الرفع على المعدل الحجمى لتصرف المروحة .

ويبين الرسم البيانى الآتى شكل (٦-٥) نموذج لمنحنيات تشغيل مروحة تعمل بالقوة الطاردة المركزية عند سرعة دورانية ثابتة .



شكل (٦-٥) منحنى أداء أو تشغيل المروحة

وإذا تغيرت سرعة دوران عمود ادارة المروحة فتنغير تباعا منحنيات تشغيل المروحة فيتناسب المعدل الحجمى للتصرف تناسباً طردياً مع عدد لفات عمود الادارة ويتناسب الرفع الكلى تناسباً طردياً مع مربع عدد اللفات . وتناسب القدرة الحصانية تناسباً طردياً مع مكعب عدد اللفات . وسيبين ذلك بالتفصيل عند دراسة المضخات .

ثانياً : المضخات : PUMPS

هى آلات تستخدم فى رفع ودفع السوائل من مستوى الى مستوى آخر . ونظرية عمل المضخات تشابه كثيراً نظريات عمل الضواغط والمراوح ويمكن القول بان الاختلاف الاساسى بين هذه الآلات هو ان المضخات او الطلمبات تستخدم فى دفع السوائل بينما تدفع الغازات بواسطة الضواغط والمراوح ، ولو انه هناك بعض المضخات تستخدم فى سحب الغازات والابخرة مثل طلمبات التفريغ Vacuum Pumps .

ويمكن تقسيم المضخات الى الآتى :-

- ١- مضخات ذات ازاحة ايجابية Positive Displacement Pumps وفيها تسحب وتضغط كمية معلومة ومحدودة من السوائل فى كل دورة او لفة من عمود ادارة الطلمبة .

٢- المضخة الطاردة المركزية Centrifugal Pump وهى شائعة الاستعمال فى عمليات التصنيع المختلفة وتمتاز بانه يمكن تصريف كمية متغيرة من السائل مع تغير مقدار الرفع عند سرعة دوران ثابتة .

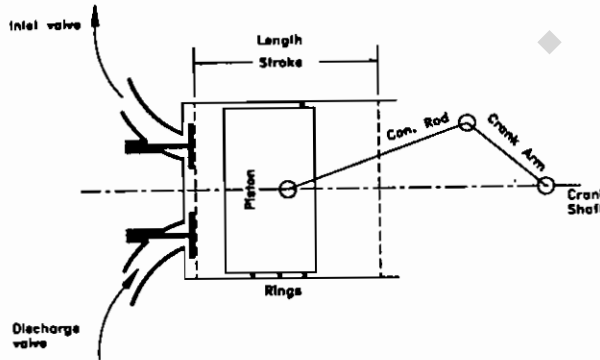
٢- المضخات الخاصة واهمها :

- أ- مضخة النافورة Jet Pump وتستخدم الطاقة الناتجة عن سرعة مرور سائل فى ماسورة فى دفع السائل من مستوى الى مستوى آخر .
- ب- مضخة دفع الهواء Air Lift Pump وتستخدم هواء مضغوط فى دفع السائل بعد ان يختلط به .

مضخات الازاحة الايجابية

١- المضخة الترددية : Reciprocating Pump

هذا النوع من المضخات يضيف طاقة ضغط الى السائل بواسطة مكبس او ضاغط يتحرك داخل اسطوانة مصنوعة من الحديد الزهر او النحاس المسبوك ، ويصنع المكبس من الصلب او النحاس ويوجد على سطحه تجاويف دائرية توضع فيها حلقات او شناوير من الصلب المرن او الكاوتشوك فائدتها تقليل احتكاك معدن المكبس مع معدن الاسطوانة وعدم السماح للسائل داخل الاسطوانة او لزيوت التشحيم داخل صندوق المرفق من الاختلاط وبذلك يمكن التحكم فى ضغط السائل داخل اسطوانة المضخة كما انها تساعد فى نقل الحرارة الناتجة عن الاحتكاك الى الهواء المحيط بالمضخة فلا يتسبب عنها زيادة فى درجة حرارة السائل المراد دفعه .



شكل رقم (٦-٦) قطاع فى مضخة ترددية ذو اسطوانة واحدة

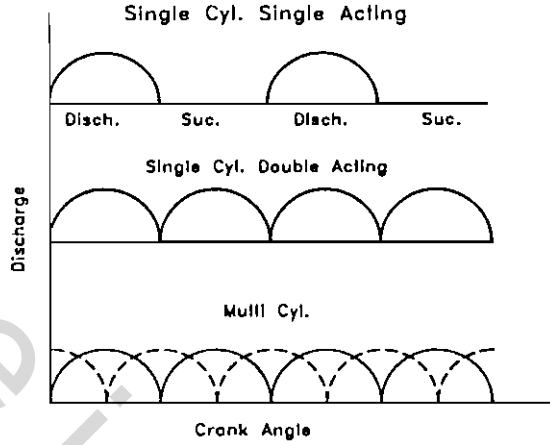
ويوجد فى رأس الاسطوانة صمامان احدهما لدخول السائل والاخر لخروجه ، وهى على هيئة اقراص صغيرة من الجلد او المعدن تفتح وتغلق حسب حركة المكبس ، ويكون فتحتها فى اتجاه حركة خروج السائل بحيث تسمح بمرور السائل الى ماسورة الطرد ولا تسمح له بالارتداد ثانيا .

وفى كل مرة يعمل فيها المكبس مشوارا كاملا Stroke تتصرف كمية ثابتة من السائل خارج الاسطوانة وتعتمد كمية السائل المدفوعة على حجم اسطوانة الطلمبة وعدد المرات التى يقوم فيها المكبس بالحركة داخل الاسطوانة ويلاحظ ان التصرف الحقيقى للمضخة فى المشوار الواحد يقل عن حجم الاسطوانة الفعلى وذلك يرجع الى فقد كمية من السائل نتيجة اما الى تسربها من بين المكبس والاسطوانة لعدم احكام الشنابر او الى عدم ملائمة الاسطوانة بالسائل ملائمة تاما . لذلك تستخدم الكفاءة او الجودة الحجمية للمضخة الترددية Volumetric Efficiency وتعرف كالاتى :

الجودة او الكفاءة الحجمية ($\eta_{vol.}$)

$$\eta_{vol.} = \frac{V}{V} \quad (6.3)$$

وتتراوح قيمتها عادة بين ٨٥ ، ٩٥٪ ويلاحظ ان تصرف المضخة يكون على دفعات ويمكن تنظيم التصرف وجعله مستمرا باستخدام مضخة متعددة الاسطوانات او مضخات ذات وجهين (ثنائية التأثير) Double Acting ويبين الرسم البيانى الاتى شكل (٦-٧) كيفية تنظيم تصرف المضخة .



شكل (٦-٧) تنظيم معدل تصرف المضخات الترددية عند التشغيل

وتستخدم هذه المضخات فى حالة الاحتياج الى تصرف بسيط نسبيا ولكن تحت ضغط مرتفع مثل مضخات تجنيس اللبن ويكون ضغطها مرتفع جدا . والمضخات الترددية تكون عادة بطيئة ، وسرعة عمود الدوران تتراوح بين ٢٠ ، ٢٠٠ لفة فى الدقيقة . ويراعى عدم استخدام هذه المضخات للسوائل التى تكون بها مواد معدنية عالقة حتى لا تتآكل جدران الاسطوانة نتيجة لاحتكاك هذه المواد المعدنية .

ويمكن حساب كمية تصرف الطلمبة الترددية (m) من القانون الآتى :

$$m = \eta_{vol} \cdot n \cdot \rho \cdot L \cdot A \quad (6-4)$$

حيث أن :

$$A = \text{مساحة مقطع الاسطوانة} = \pi r^2$$

$$L = \text{طول مشوار المكبس}$$

$$\rho = \text{كثافة السائل المراد دفعة}$$

$$n = \text{عدد لفات عمود الادارة فى الدقيقة.}$$

$$\eta_{vol} = \text{الكفاءة الحجمية للطلمبة}$$

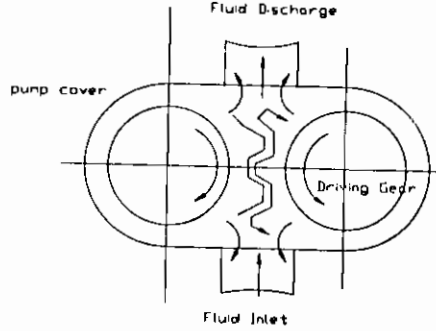
فاذا كانت h هى مقدار الرفع الديناميكي الكلى للمضخة بوحدات طولية فانة

يمكن تقدير القدرة الحصانية النظرية اللازمة لتشغيل المضخة كماياتى :-

القدرة الحصانية النظرية للمضخة (HP_{theo.})

$$HP_{Theo} = \frac{m.h}{\text{Standard H.P}} \quad (6-5)$$

ب- المضخات الدورانية : Rotary Pumps



شكل (٨-٦) قطاع في مضخة ترسيب

هذا النوع من المضخات يعمل على سحب كمية محدودة من السائل المراد دفعه حيث يحبس بين قلب المضخة Rotor والغلاف المحيط به ، وعند الدوران يدفع السائل المحبوز الى فتحة الخروج . ومن اهم تصميمات المضخات الدورانية المضخة الترسية Gear Pump وهي تتكون من ترسين معشقتان مع بعضهما ، احدهما يأخذ حركته الدورانية من عمود محرك او موتور كهربائي ، ويسمى بالترس القائد ويدور الترسان داخل غلاف خارجي به فتحتان احدهما متصله بماسورة السحب والاخرى بماسورة طرد السائل بعد زيادة الضغط الواقع عليه كما هو مبين في الشكل (٨-٦).

وسرعة هذه المضخات بطيئة نسبيا وتستخدم عند الاحتياج لنقل كميات صغيرة من السائل عند ضغوط متوسطة وقد يصل مقدار السحب فيها الى ٧ متر . وهذه المضخات تستخدم عادة لدفع السوائل ذات اللزوجة العالية مثل الزيوت والعسل والسوائل المركزة والصابون السائل ويمكن تقدير تصرف المضخة الترسية من القانون الآتي :

$$\text{Discharge rate of pump} = 2 \cdot A \cdot l \cdot n \cdot N \cdot \eta_{vol} \quad (6-6)$$

حيث أن :

$A =$ المساحة المحصورة بين كل سنة وأخرى وتتناسب مع مربع القطر

$l =$ الطول المحورى للسنة ويتناسب مع القطر

$n =$ عدد اللفات فى الدقيقه

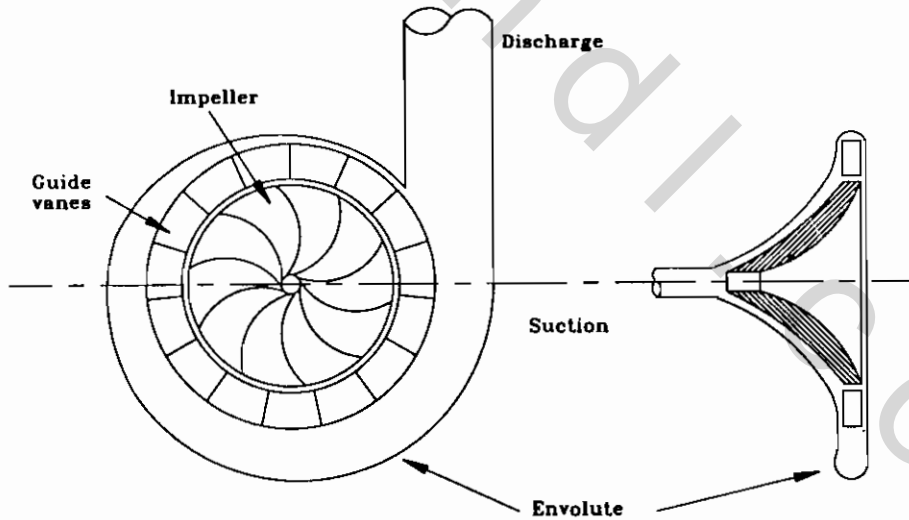
$d =$ قطر دائرة الخطوة للترس

$N =$ عدد أسنان كل ترس

أى ان مقدار التصرف فى الدقيقه = ثابت $n \cdot d^3$

٢- المضخات الطاردة المركزية : Centrifugal Pumps

هذه المضخة منتشرة الاستعمال فى عديد من عمليات التصنيع المختلفة وذلك لبساطة تصميمها وسهولة صيانتها ورخص ثمنها . وتمتاز بانها منتظمة التصرف وضغطها غير مرتفع ويمكن استخدامها فى دفع السوائل التى بها مواد عالقة وكثيفة وتستخدم فى حالة الاحتياج الى كميات تصريف عالية عند مقدار رفع متوسط .



شكل (٦-٩) قطاع فى مضخة طاردة مركزية

وتتكون المضخة المطاردة المركزية من قلب أو قرص به ريش يدور داخل غلاف خارجي ذو تصميم تزداد مساحة مقطعه في اتجاه خروج السائل كما هو مبين في الشكل (٦-٩) ويدخل السائل عادة من فتحة متصلة بماسورة سحب السائل عند مركز دوران القرص ، ويدفع السائل الى خارج القرص بالقوة الطاردة المركزية وينتج عن ذلك ان طاقة الحركة (الطاقة الكينيتيكية) Kinetic Energy تزيد بمقدار كبير من مركز الدوران الى حافة القرص الخارجية . وهذه الطاقة الناتجة عن السرعة العالية التي اكتسبها السائل تتحول في الغلاف الخارجي الى طاقة دفع او ضغط مرتفع عند ماسورة الطرد او التصريف.

وقلب المضخة عبارة عن قرص به ريش منحنية بطريقة خاصة لسهولة سريان السائل وهو اما يكون من النوع المفتوح او المغلق حسب نوع السائل المراد دفعه وطريقة الاستعمال فالنوع المفتوح يصلح لدفع السوائل التي بها مواد صلبة عالقة ، والنوع المغلق يكون للسوائل النقية ، وقرص الريش له تصميمات متعددة لتلائم الغرض المستخدم فيه تماما مثل المراوح التي سبق ذكرها . والطمبات ذات السرعات العالية تزود عادة بقرص به ريش توجيه Guide Vanes يثبت داخل غلاف المضخة حول قرص الريش الرئيسي كما هو مبين في الشكل (٦-٩).

ويجب ملاحظة ان المضخات الطاردة المركزية يلزم امتلاء غلافها الخارجي بالسائل تماما عند بدء تشغيلها حيث ان وجود اى كمية من الهواء داخلها يسبب عدم حدوث انخفاض في الضغط (تفريغ) عند مركز قرص المضخة وبذلك يقل او ينعدم سريان السائل من ماسورة السحب .

ولذلك يجب عند بدء التشغيل ملئ الغلاف الخارجي وماسورة السحب ملا تماما بالسائل وهذا ما يعرف بعملية تحضير المضخة للتشغيل Priming ويمكن تحضير المضخة اما يدويا بواسطة قمع يوضع في فتحة في اعلي بدن المضخة يوصل بخزان السائل او ميكانيكيا بواسطة مضخة تحضير خاصة عادة ماتكون من النوع الماص الكابس .

تقدير سعة المضخة والقدرة اللازمة لتشغيلها :

اذا علمت سرعة سريان السائل في ماسورة الخروج (التصريف) وكثافة السائل و قطر ماسورة الخروج فان مقدار تصرف المضخة (m) يمكن حسابه كالآتى :

$$m = \rho AV \quad (6-7)$$

حيث أن :

$$\begin{aligned} V &= \text{سرعة سريان السائل} \\ A &= \text{مساحة مقطع ماسورة التصريف} \\ \rho &= \text{كثافة السائل} \end{aligned}$$

ومقدار الرفع الكلى للمضخة هو عبارة عن مجموع الرفع الاستاتيكي الرأسى للسائل او مايعادله ومقدار الفقد فى الرفع نتيجة سريان السائل فى مواسير التوصيل بالاضافه الى طاقة الحركة الناتجة عن سرعة سريان السائل عند فتحة الخروج من ماسورة أنتوصيل .

$$h = h_s + h_f + \frac{V^2}{2g} \quad (6-8)$$

حيث أن :

$$\begin{aligned} h &= \text{الرفع الكلى للمضخة} \\ h_s &= \text{الرفع الاستاتيكي الرأسى للسائل} \\ h_f &= \text{الفقد فى الرفع نتيجة للاحتكاك داخل مواسير التوصيل} \\ V &= \text{سرعة سريان السائل فى الثانية} \\ g &= \text{عجلة الجاذبية الارضية (٣٢.٢ قدم/ ث^٢ او ٩٨٠ سم/ث^٢)} \end{aligned}$$

وفى كثير من الاوقات يلزم توصيل سائل ما الى اسطوانة تحت ضغط اعلى من الضغط الجوى مثل الغلايات او المبخرات ، وعلى ذلك يكون ضغط التشغيل معادل للرفع الاستاتيكي الرأسى فى حالة اذا كان توصيل السائل من خزان الى خزان على مستوى اعلى منه وتحكم العلاقة الآتية التحويل المطلوب :-

$$h_s = \frac{P}{\rho} \quad (6-9)$$

حيث P هي ضغط التشغيل ، ρ هي كثافة السائل بالوحدات المناظرة وتكون القدرة الحصانية النظرية لتشغيل المضخة كما يأتى :

Theoretical Pump Horse Power: ($\eta_{Theo.}$)

$$\eta_{Theo.} = \frac{\text{Discharge} \times \text{Total Head}}{\text{Standard Horse Power}} \quad (6-10)$$

ونتيجة لاحتكاك السائل على اسطح ريش قلب المضخة وريش التوجيه والسطح الداخلى لغلاف المضخة ، ويحدث هناك فقد فى القدرة ويلزم لادارة المضخة قدرة اعلى من قدرتها النظرية ، وتعبّر عن ذلك الكفاءة الهيدروليكية للمضخة:

Hydraulic Efficiency of Pump: (η_{Hy})

$$\eta_{Hy} = \frac{\text{Theo. Horse Power}}{\text{Shaft Horse Power}} \quad (6-11)$$

وعادة ما يتصل عمود ادارة المضخة بعمود المحرك عن طريق وصلة مرنة Coupling عبارة عن قرصين من المعدن متصلين ببعضهما بواسطة مسامير ربط ، او عن طريق طارات متصلة ببعضها بواسطة سيور مبططة او على شكل حرف V ، او عن طريق تروس أما معشقه مع بعضها أو متصله بجنزير من المعدن . وعلى ذلك يكون هناك فقد ميكانيكى فى القدرة حتى تصل الى عمود ادارة المضخة ويعبر عن ذلك الكفاءة الميكانيكية لتوصيل الحركة .

Mechanical Efficiency of Pump ($\eta_{mech.}$)

$$\eta_{mech.} = \frac{\text{Shaft Horse Power}}{\text{Brake Horse Power}} \quad (6-12)$$

ويمكن تلخيص ماسبق فى القانون الآتى :

Brake Horse Power of Pump (B.H.P)

$$\text{B.H.P.} = \frac{\text{Pump Discharge} \times \text{Total Head}}{\eta_{mech.} \times \eta_{Hy} \times \text{Standard H.P.}} \quad (6-13)$$

وكثيرا ما تواجهنا فى عمليات التصنيع ظروف تحتم علينا تغيير سعة المضخة ومقدار دفعها ويمكن التحكم فى هذه التغيرات من العلاقات الآتية :

١- مقدار التصرف يتناسب تناسباً طردياً مع سرعة دوران عمود ادارة المضخة :

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{N_1}{N_2} \quad (6-14)$$

٢- مقدار الرفع يتناسب تناسباً طردياً مع مربع سرعة الدوران :

$$\frac{h_1}{h_2} = \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2 \quad (6-15)$$

٣- القدرة اللازمة للتشغيل تتناسب طردياً مع مكعب سرعة الدوران :

$$\frac{HP_1}{HP_2} = \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^3 \quad (6-16)$$

وفى بعض الاحيان يلزم تغيير قرص ريش المضخة بقرص مشابه ولكن بقطر مختلف لمواجهة احتمالات تغير ظروف التصنيع وذلك عند سرعة دوران ثابتة لعمود ادارة المضخة ، ويمكن حساب ذلك من العلاقات الآتية :-

١- مقدار التصرف يتناسب مع مكعب قطر قرص الريش

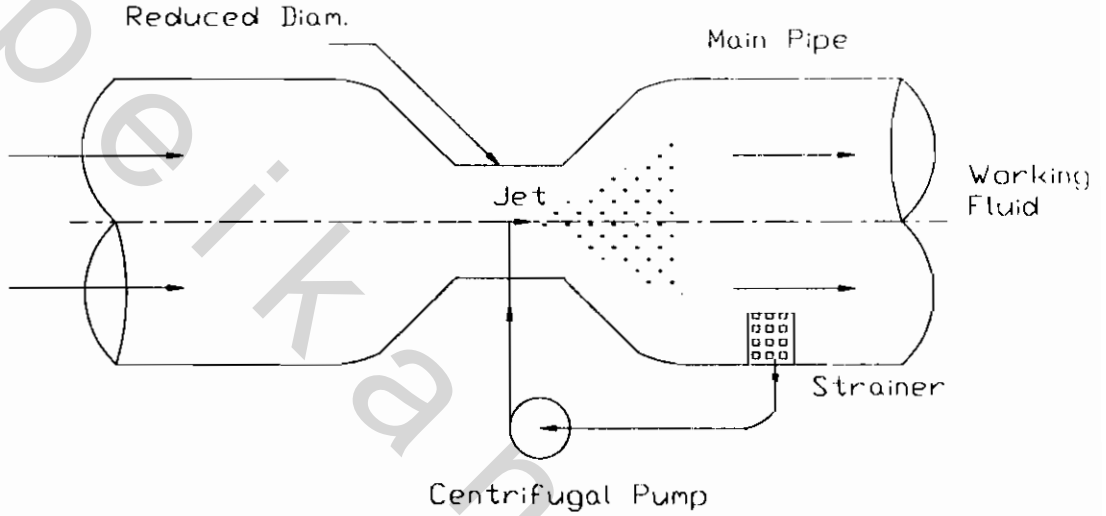
$$\frac{Q_1}{Q_2} = \left(\frac{D_1}{D_2}\right)^3 \quad (6-17)$$

٢- مقدار الرفع يتناسب مع مربع القطر .

$$\frac{h_1}{h_2} = \left(\frac{D_1}{D_2}\right)^2 \quad (6-18)$$

٣- القدرة اللازمة لادارة المضخة تتناسب مع الأس الخامس للقطر .

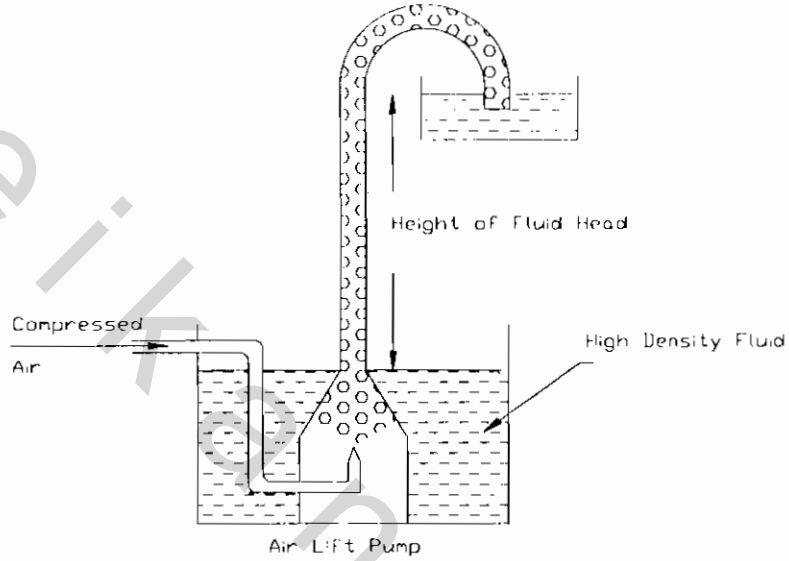
$$\frac{HP_1}{HP_2} = \left(\frac{D_1}{D_2}\right)^5 \quad (6-19)$$

١- مضخة النافورة : Jet Pump

شكل (٦-١) قطاع فى نظام مضخة النافورة

تستخدم فى دفع السوائل ذات الكثافة العالية والتي بها مواد عالقه بكثرة كالمعلقات وفضلات التصنيع المختلفة والتي لايلانمها استخدام المضخات الطاردة المركزية ونظرية تشغيل هذه المضخة تتلخص فى وجود نافورة من السائل من اختناق او عنق ماسورة التشغيل كما هو مبين فى الشكل (٦-١). هذه النافورة متصله بمضخة طاردة مركزية تقوم بسحب السائل بدون المواد العالقه به من ماسورة التشغيل الرئيسية وتدفعه الى النافورة . ونتيجة لسرعة مرور السائل من النافورة بفعل القوة الطاردة المركزية يحدث تفريغ او منطقة ضغط منخفض فى اختناق ماسورة التشغيل وبذلك يسحب السائل المراد نقله الى المنطقة التى توجد امام النافورة .

ب- مضخة دفع الهواء : Air Lift Pump



شكل (٦-١١) قطاع فى مضخة صبغ الهواء

وتستخدم فى دفع السوائل ذات الكثافة العاليه او التى بها نسب مرتفعه من الاحماض والتى لايلئمها استخدام المضخات الاخرى نتيجة لتآكل معدنها من هذه الاحماض ، كما هو موضح فى شكل (٦-١١) ويستخدم فيها هواء تحت ضغط يساوى على الاقل ارتفاع عمود السائل فى الخزان ونتيجة لذلك يرتفع مخلوط الهواء والسائل (كثافة المخلوط تكون اقل من كثافة السائل) فى ماسورة الرفع الى المستوي المراد نقل السائل اليه .

الباب السابع

النقل الآلى للمواد الغير سائلة

MECHANICAL HANDLING OF MATERIALS

نقل المواد عادة يعنى حركتها فى اى اتجاه ويشمل ذلك حركتها مباشرة الى اعلى او اسفل او بميل او حركتها افقيا . وتمر المواد الصلبه (الغير سائله) والنصف صلبه (العجائن) بمراحل عديدة اثناء تصنيعها وبالتالي فانها تنقل بواسطة انواع متعددة من وسائل النقل .

فاذا تتبعنا مادة ما من وقت استلامها بالمصنع الى ان يتم تصنيعها وتخزينها فانها تمر بالخطوات الآتية :-

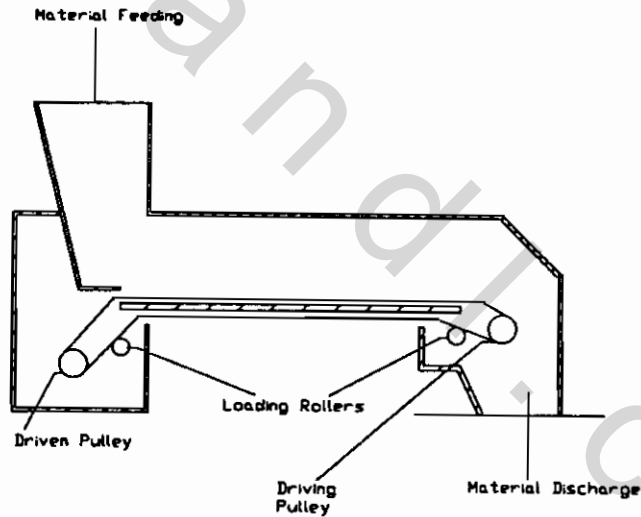
- ١- التفريغ من عربات النقل .
- ٢- وضع المادة على عربات خاصة تسمى الزحافات Skids .
- ٣- استخدام الاوناش Cranes او عربات الشوكة Fork Trucks فى نقل الزحافات الى اماكن المراجعة والتفتيش ثم تنقل مره اخرى الى المخازن العامة .
- ٤- تفريغ المواد على ناقل او اكثر Conveying Elevator وتنقل بواسطتها الى اعلى لتخزينها فى المخازن .
- ٥- تنقل المواد من المخازن بواسطة عربات الشوكة او السواقى Bucket Conveyors الى اماكن التصنيع .
- ٦- تستخدم السواقى او الناقلات الحلزونية (البريميه) Screw Conveyors فى تلقيح احدى ماكينات التصنيع .
- ٧- تنقل المادة من آلة الى اخرى حتى تتم عملية التصنيع التالىه وتستخدم فى نقلها السيور الناقله Belt Conveyors او البريمات الناقله .
- ٨- بعد الانتهاء من عمليات التصنيع المختلفه تنقل المادة المصنعه باحدى وسائل النقل المناسبه الى اماكن التخزين حيث يتم توزيعها من المصنع .

والوسائل المستخدمة فى النقل يمكن تقسيمها كالتى :

- | | |
|--|--------------------------|
| 1- السيور الناقله | Belt Conveyors |
| 2- الجنازير او السلاسل الناقله | Chain Conveyors |
| 3- الناقلات الحلزونية (البريمات الناقله) | Screw Conveyors |
| 4- القواديس والسواقى الرافعة | Bucket Elevators |
| 5- الناقلات المستخدمة للجاذبيه الارضية | Gravity Flow Conveyors |
| 6- الناقلات المستخدمة لشفط او دفع الهواء | Pneumatic Conveyors |
| 7- الأوناش | Cranes |
| 8- المصاعد والعربات | Lift and Carrying Trucks |

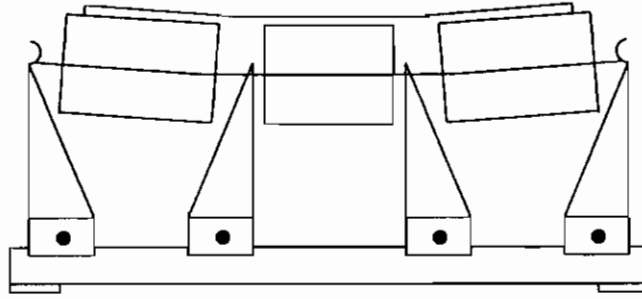
وفيما يلى شرح مختصر عن خصائص ومميزات واستخدامات هذه الانواع :-

1- السيور الناقل : Belt Conveyor



شكل (١-٧) قطاع فى سير ناقل

هو عبارة عن سير لا نهائى (شكل ١-٧) يدور حول طارتين او بكرتين احدهما متصله بموتور او عمود حركة وتسمى البكرة او الطارة القائده Driving Pulley والاخرى الطارة التابعة Driven Pulley. وعادة يحمل السير على عدة بكرات حرة تسمى بالايذر Idler شكل (٢-٧).



Rollers For Support of Flat Belt

شكل (٧-٢) بكرات تحميل السير الناقل

خصائص السير الناقل :

- ١- له كفاءة ميكانيكية عالية .
- ٢- لايتسبب في تلف المواد المنقولة وذلك لانه لا توجد حركة نسبية بين المادة المنقولة والسير .
- ٣- يعمل على سرعات عالية وينتج عن ذلك ان سعة نقل السير تكون عالية .
- ٤- يتحمل مدة تشغيل طويلة .
- ٥- يستخدم لنقل المواد لمسافات طويلة .
- ٦- زاوية ميل السير محدودة تتراوح بين ١٥ - ٢٥ درجة.
- ٧- سعر انشاؤه مرتفع نسبيا .

الشروط الواجب توافرها في السير الناقل :

- ١- يجب ان يكون السير ذو مرونة عالية حتى يتمشى مع الاقطار المختلفة للطارات . ويكون مصنوع من مادة خاصة تتحمل الشد والضغط وتقاوم عوامل التشغيل المختلفة كالاحماض ودرجات الحرارة المختلفة .

وهذه المواد تكون اما من :

- | | |
|-------------------|-----------------|
| أ- نسيج الكانفاس | Stitched Canvas |
| ب- النسيج المجدول | Solid Woven |
| ج- بالاتا | Balata |
| د- المطاط | Rubber belt |

- والنوعين أ ، ب يكونا عادة مشبعان بالكاوتشوك ومغطاه بطبقة من المطاط .
- ٢- يجب ان يكون عرض السير متناسبا مع كمية المادة المنقولة ونوعها وخصائصها .
- ٣- تكون الطارة القائدة دائما فى ناحية التفريغ .
- ٤- يجب ضبط شد السير دائما وذلك لان طوله يتغير بتغيير درجات الحرارة والرطوبة ويمكن اجراء ذلك اما يدويا بواسطة مسامير الضبط او اتوماتيكيا بتحميل اثقال اضافيه فى جهاز الشد .
- ٥- بكرات التحميل Idler Pulleys تكون اما من الخشب او من الصلب ، وذلك فى حالة السيور المسطحة Flat Belts او تأخذ البكرات شكل المجرى لزيادة السعه Troughed Belts كما هو موضح فى الشكل (٧-٢) .
- ٦- يجب الايزيد ميل السير عن 15° - 17° عند نقل الحبوب الصغيرة ولا يزيد عن 18° - 20° عند نقل الحبوب الكبيرة ، 20° الى 22° عند نقل المساحيق .

الحسابات الأولية لتصميم سير ناقل :

- ١- يتحدد عرض السير بمعرفة نوع المادة المراد نقلها وحجمها ومعدل نقلها . ويمكن حساب مساحة مقطع السير اذا علم مقدار زاوية تحميل المادة وهى الزاويه المحصوره بين الخط الافقى والمماس لمنحنى تكويم المادة وهى تختلف باختلاف المواد وتتراوح بين 10° ، 20° وتكون هذه الزاويه كبيره فى حالة نقل المواد الكبيرة الحجم خصوصا عند اختلاطها بمساحيق دقيقة وجداول (٧-١) يبين مساحة مقطع التحميل لمواد مختلفة والسرعة القصوى لنقل هذه المواد .

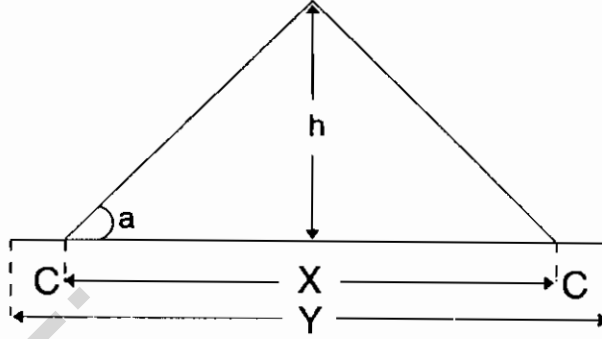
جدول (٧-١) المواصفات الخاصه بالسيور الناقله لسرعات مختلفه

عرض السير		مساحة مقطع التحميل (سم ^٢)			خلوص الحافه	
سم	سم	١٠°	٢٠°	٣٠°	سم	سم
٣٥.٥٦	٤.٣٢	٦٨.٨٢	٨٩.٢٨	١٠٨.٨١	٩١.٤٦	١٢١.٩٥
٤٠.٦٤	٤.٥٧	٩٣.٩٣	١٢١.٨٣	١٥٠.٦٦	٩١.٤٦	١٣٧.٢.
٤٥.٧٢	٤.٨٣	١٢٤.٦.	١٦٠.٨٩	١٩٩.٠٢	١٢١.٩٥	١٣٧.٢.
٥٠.٨.	٥.٠٨	١٥٨.١.	٢٠٤.٦.	٢٥٢.٩٦	١٢١.٩٥	١٥٢.٤٤
٦٠.٩٦	٥.٥٩	٢٣٩.٠١	٣٠٨.٧٦	٣٨١.٣.	١٥٢.٤٤	١٨٢.٩٣
٧٦.٢.	٦.٣٥	٣٩١.٥٣	٥٠٤.٠٦	٦٢٢.١٧	١٦٧.٦٨	٢١٣.٤٢
٩١.٤٤	٧.١١	٥٧٨.٤٦	٧٤٦.٧٩	٩٢١.٦٣	١٨٢.٩٣	٢٤٣.٩.
١٠٦.٦٨	٧.٨٧	٨٠٨.١٧	١٠٤١.٦.	١٢٧٤.١.	١٨٢.٩٣	٢٤٣.٩.
١٢١.٩٢	٨.٦٤	١٠٧٨.٨.	١٣٧٦.٤.	١٧٠١.٩.	١٨٢.٩٣	٢٤٣.٩.
١٣٧.١٦	٩.٤.	١٣٤٨.٥.	١٧٦٧.٠٠	٢١٦٦.٩.	١٨٢.٩٣	٢٤٣.٩.
١٥٢.٤.	١٠.١٦	١٧٠١.٩.	٢١٩٤.٨.	٢٧٠٦.٣.	١٨٢.٩٣	٢٤٣.٩.

المصدر : Henderson and Perry (1976)

حساب مساحة مقطع تحميل السير :

1- السير المسطح : Flat Belt



شكل (٧-٢) مقطع تحميل السير المسطح

يمكن تبسيط الحسابات الخاصة بمساحة مقطع التحميل باعتبار المادة المراد نقلها (في حالة الحبوب والمساحيق فقط) على اساس تقريب المقطع الى شكل مثلث هندسى متساوى الساقين قاعدته تقل عن عرض السير الحقيقى بمقدار ضعف خلوص حافتى السير . وزاويته تساوى زاوية التحميل او الراحة وارتفاعه بارتفاع منتصف تكوين المادة شكل (٧-٢). وتكون ظل زاوية الراحة مساويا لمعامل احتكاك المادة مع مادة السير . وتقدر المساحة الحقيقية لمقطع التحميل بحوالى ٩٠ فى المائة من المساحة المحسوبة هندسياً .

$$A = \frac{1}{2} \times h \times X$$

$$A = \frac{1}{2} \times \frac{1}{2} \times \tan a \times X^2$$

$$= \frac{X^2}{4} \tan a$$

$$= \frac{X^2}{4} f$$

حيث :

$$X = Y - 2C$$

- Y = عرض السير الحقيقى
- C = مقدار الخلوص (الجزء من السير المتروك بدون تحميل لضمان عدم سقوط المادة)
- h = ارتفاع تكوين المادة المنقولة
- X = طول قاعدة تكوين المادة

$$f = \tan a$$

f = معامل الاحتكاك بين المادة والسير

a = زاوية التحميل او الراحة

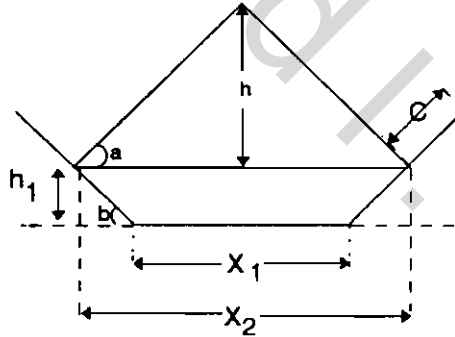
والجدول الاتى جدول (٧-٢) يعطى معامل الاحتكاك لبعض الحاصليل (رطوبة ٢٠٪ ، مواد غريبه ٥٪):

جدول (٧-٢) معامل الاحتكاك لبعض الحاصليل

نوع الحبوب	الوزن النوعي كجم/م ^٣	f				
		حبوب على حبوب	حبوب على سطح خشن	حبوب على سطح ناعم	حبوب على حديد	حبوب على اسمنت
قمح	٨٠١.٩٥	٠.٤٦٦	٠.٤١٢	٠.٣٦١	٠.٤١٤	٠.٤٤٤
ذرة	٧٠٥.٧٢	٠.٥٢٠	٠.٣٤٤	٠.٣٠٨	٠.٣٧٤	٠.٤٢٣
فول	٨٠١.٩٥	٠.٤٧٠	٠.٢٩٠	٠.٩٧٠	٠.٢٦٠	٠.٣٠٠

المصدر : Henderson and Perry (1976)

ب- السير ذو المجرى : Troughed Belt



شكل (٧-٤) مقطع تحمي السير ذو المجرى

ويمكن حساب مقطع السير ذو المجرى على اساس انه شبه منحرف يعلوه مثلث تكوين المادة (شكل ٧-٤):

مساحة مقطع التحميل = 0.9 . مساحة المثلث + مساحة شبه المنحرف

$$\frac{1}{2} (X + X_1) h_1 + 0.9 \frac{X^2}{4} f = A$$

$$\therefore h_1 = \frac{X - X_1}{2} \tan b$$

$$\therefore A = 0.9 \frac{X^2}{4} f + \frac{X^2 - X_1^2}{4} \tan b$$

حيث ان :

- Y = العرض الحقيقى للسير المجرى
- X = المسقط الافقى لعرض السير
- X₁ = عرض البكرة السفليه الافقيه الوسطى
- X₂ = عرض الجزء المحمل من السير على كل من مستوى الجانبين
- h = ارتفاع تكويم المادة بالنسبة لحواف السير
- h₁ = ارتفاع المادة عن قاع السير حتى حوافه
- a = زاوية التحميل او الراحة
- b = زاوية ميل البكرات الجانبيه المكونه لمجرى السير

ويلاحظ فى هذه الحالة ان : $X_1 + 2 X_2 = Y - 2C$

حساب القدرة اللازمه لتشغيل سير ناقل :

تعتمد القدرة المطلوبه لتشغيل سير ناقل على العوامل الآتيه :

- ١- مقدار الرفع .
- ٢- مقاومة احتكاك السير ومشتملاته (البكرات وغيرها) .
- ٣- مقدار ميل السير .

وعلى ذلك يمكن حساب القدرة اللازمه لتشغيل سير ناقل (شكل ٧-٥) كحاصل جمع الخطوات الثلاث الآتيه :

١- القدرة اللازمه لتشغيل سير خال من الحمل

$$HP_1 = \frac{f_1 m_1 LV}{Const.} \quad (7-1)$$

٢- القدرة اللازمه لتشغيل السير المحمل فى مستوى أفقى

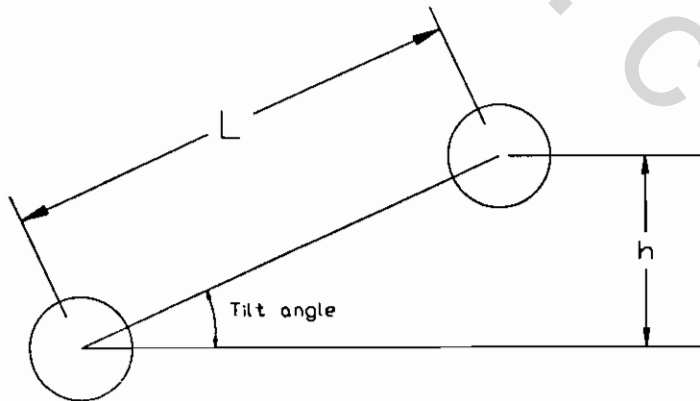
$$HP_2 = \frac{f_2 m_2 L}{Const.} \quad (7-2)$$

٣- القدره اللازمه لتشغيل سير لنقل الحمل رأسيا

$$HP_3 = \frac{m_2 h}{Const.} \quad (7-3)$$

حيث ان :

- f_1 = معامل الاحتكاك بين الاجزاء المتحركة والثابتة فى السير ومشتملاته .
- m_1 = وزن السير لكل وحدة طوليه (رطل/قدم أو كجم/متر) .
- L = طول السير (المسافه الافقيه بين مركزى الطارتين) .
- m_2 = المعدل الوزنى لنقل الماده (رطل/ساعه او كجم/ساعه) .
- V = سرعة السير
- f_2 = معامل الاحتكاك بين الحبوب والسير
- h = مقدار الرفع (ارتفاع مستوى التفريغ عن مستوى التحميل)



شكل (٧-٥) سير ناقل مائل

الجنزير الناقل CHAIN CONVEYOR

هو من وسائل النقل المنتشرة الاستعمال اذا كان المطلوب النقل المتقطع .

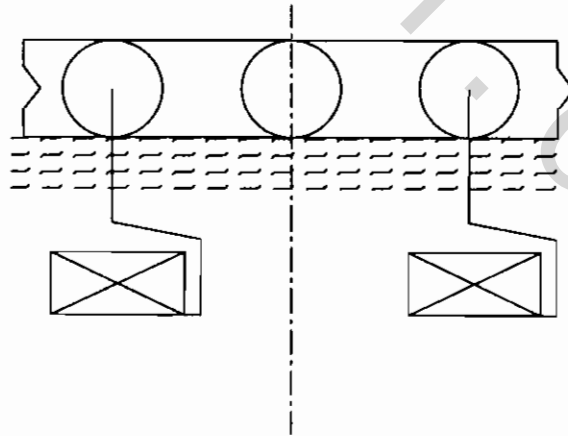
خصائص الجنزير الناقل :

- ١- كفاءته الميكانيكية ليست عالية .
- ٢- سعره الانشائى معتدل .
- ٣- يصدر اصواتا مرتفعة عند تشغيله .
- ٤- حركته بطيئة .

انواعه :

- ١- الترولى او الجنزير الهوائى Trolly, Overhead or Monorail
- ٢- الجنزير الجارف Scraper Conveyor
- ٣- الجنزير الطبلية Apron Conveyor

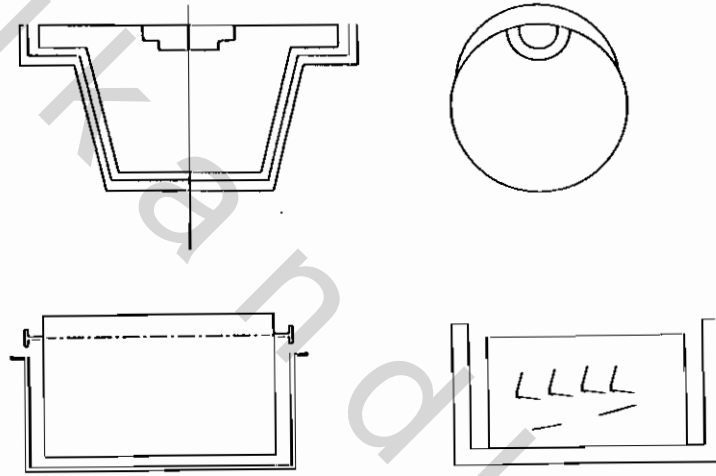
أولا : الجنزير الترولى



شكل (٦-٧) قطاع فى جنزيرين ترولى

ويتكون من كمرة حديد على شكل (I) مثبتة فى اعلى المبنى ويتحرك على حافتها السفلى بعجل او بكرات متصلة ببعض بواسطة جنزير ويعلق بهذه البكرات خطافات لحمل الاثقال والمواد المراد نقلها كما هو مبين فى شكل (٧-٦) ويستعمل الجنزير الترولى عادة فى نقل اللحوم فى السلخانات والموز وصناديق الفاكهه فى وحدات الحفظ والتجفيف والتسويه . ويتميز الجنزير الترولى بأنه مرن جدا حيث انه يمكن تغيير اتجاهه حتى ١٨٠° ويمكن استعماله على زاوية ميل عالية بخلاف السير الناقل .

ثانيا : الجنزير الجارف

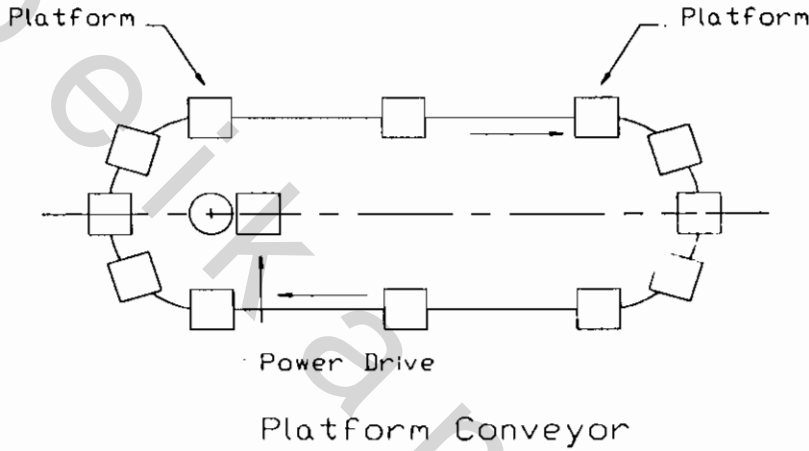


شكل (٧-٧) مقاطع مختلفه للجنزير الجارف

ويستخدم فى نقل الحبوب والمواد الغير خشنة القوام مثل البنجر والبطاطس ويمكن استعماله على زاوية ميل عالية غير انه يتطلب قدرة تشغيل عالية جدا علاوة على ان تكاليف صيانتة عاليه . ويتكون الجنزير الجارف (شكل ٧-٧) من حواجز عرضية مصنوعة من الحديد او الخشب متصلة ببعضها بواسطة جنزير وتتحرك داخل مجرى لنقل المواد بطريق الجرف وتختلف هذه الحواجز العرضية فى الشكل والتصميم لتلائم خواص المادة المراد نقلها فتستخدم الحواجز المنخفضة فى نقل المواد الكبيرة الحجم مثل قوالب الذرة والبنجر والبطاطس والحواجز المرتفعة للحبوب الصغيرة وما شابهها . ويصمم الحاجز بحيث يكون ارتفاعه ٤٠٪ من طوله وتتباعده الحواجز عن بعضها بمسافة تساوى طول الحاجز .

وسرعة الجنزير تتراوح بين ٧٥ - ١٢٥ قدم/دقيقة وتستخدم السرعه البطيئة فى حالة نقل مواد كبيره الحجم مثل قوالب الذرة والبصل والبطاطس وما شابهها والسرعات المرتفعه لنقل المواد الدقيقه كالحبوب والغلال .

ثالثا: الجنزير الطبلية



شكل (٧-٨) مسقط أفقى لجنزير طبلية

إذا استبدلت حواجز الجنزير الجارف العموديه بمسطحات من الصلب والخشب فان الجنزير يسمى بجنزير طبلية (شكل ٧-٨) ويستعمل فى نقل المواد المعبئة فى اجولة او فى صناديق او مواد ذات احجام كبيره .

الحسابات الاولى لتشغيل جنزير ناقل :

١- سعة الجنزير الترولى

= سرعة الجنزير الناقل × عدد الخطافات فى وحدة الطول × سعة الخطاف الواحد

٢- سعة الجنزير الجارف

= عرض الجنزير × ارتفاعه × سرعة الجنزير × كثافة المادة المنقولة

والسعه الحقيقيه تزيد عن هذه السعه النظرية بمقدار ١٥٪ ، وذلك لتكوين المادة المنقولة عادة بمستوى اعلى من ارتفاع الحاجز .

واذا كان الجنزير الجارف يعمل على مستوى مائل فان سعته تقل حسب درجات الميل كما يأتى :

درجات الميل	نسبة السعه الحقيقيه الى السعه النظرية
٥٢.	٠.٧٧
٥٣.	٠.٥٥
٥٤.	٠.٣٣

٣- سعة الجنزير الطبليه :

تحتسب سعة الجنزير الطبليه على اساس ان كل طبليه تحمل نفس الكمية التى تحملها كل من الطبالي الاخرى وتكون السعه بوحدات وزن/زمن :

سرعة الجنزير × عدد الطبالي فى وحدة الطول × سعة الطبليه الواحدة بالوزن

٤- القدرة النظرية اللازمه لتشغيل جنزير ناقل :

وتساوى مجموع القدرات اللازمه لتشغيل الجنزير الناقل خال من المواد والقدرة اللازمه لتشغيل الجنزير بما عليه من مواد فى الاتجاهين الافقى والرأسى ويمكن حسابها من القانون الآتى :-

$$\text{Horse Power} = \frac{2V L m_1 f_1 + m (f_2 L + h)}{\text{Const.}} \quad (7-1)$$

حيث أن :

$$\begin{aligned}
 V &= \text{سرعة الجنزير} \\
 L &= \text{المسقط الافقي لطول الجنزير المحمل} \\
 m_1 &= \text{وزن الجنزير لكل وحدة طول} \\
 f_1 &= \text{معامل الاحتكاك للجنزير والحواجز} \\
 m &= \text{سعة الجنزير} \\
 f_2 &= \text{معامل الاحتكاك للمواد المنقولة مع معدن الجنزير} \\
 h &= \text{مقدار الرفع الرأسى}
 \end{aligned}$$

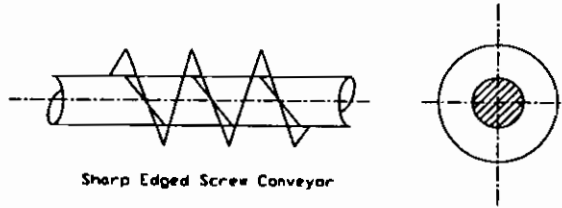
وتستخرج قيمة معاملات الاحتكاك f_1 ، f_2 من الجدول رقم (٧-٣) :

جدول (٧-٣) معاملات الاحتكاك بالانزلاق

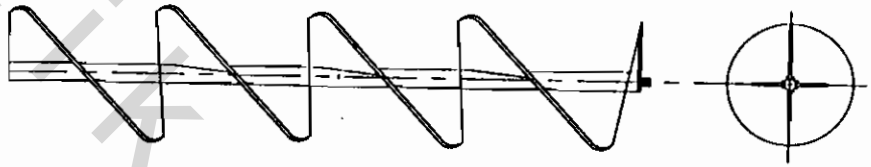
المادة	معامل الاحتكاك f_1 ، f_2
معدن على خشب زان	٠.٥ - ٠.٦
زهر على حديد مطاوع	٠.٢٣
حديد مطاوع على حديد مطاوع	٠.٥٧
حبوب على خشب	٠.٣ - ٠.٤٥
حبوب على حديد	٠.٣٥ - ٠.٤٠
فحم على معدن	٠.٣٥ - ٠.٤٠
رمل جاف على معدن	٠.٦٠

المصدر : Henderson and Perry (1976)

البريمة الناقلة : Screw Conveyor



Sharp Edged Screw Conveyor



شكل (٧-٩) مقاطع مختلفة للبريمة الناقلة

وهى عبارة عن حلزونه (لولب) تلتف حول عمود او محور الدوران بخطوة قياسية ثابتة Standard Pitch أي انها تتخذ وضع معادل على مسافات ثابتة . ويدور عمود الحركة داخل كراسى مثبتة على قاعدة التحميل . وتدور البريمة الناقلة داخل مجرى على شكل حرف لـ بغطاء او بدون غطاء حسب الغرض من التشغيل .

خصائص البريمة الناقلة :

- ١- تستخدم فى نقل الحبوب والمساحيق والمواد ذات اللزوجة العالية (اللبن الجاف والاعلاف والارز) .
- ٢- بسيطة التصميم خالية من الاطراف الحادة وتمنع تطاير الاتربة منها كما انها سهلة الفك والتركيب .
- ٣- تستخدم للنقل المتقطع او المستمر .
- ٤- لاتنقل او ترفع المواد الالمسافات محدودة .
- ٥- تكاليف صنعها معتدلة .
- ٦- القدرة اللازمه لتشغيلها مرتفعه نوعا ما .
- ٧- تستخدم لنقل المواد افقيا او علي ميل اقصاه ٢٠° .

المواد المستعمله فى صناعة البريمات :-

تستعمل خامات مختلفة فى صناعة البريمات حسب المواد المراد نقلها . فتصنع البريمه احيانا من الصاج ، او من الخشب ، او من الصلب الغير قابل للصدأ او من النحاس او الزهر حسب المواد المنقوله سواء كانت ساخنه او كاوية Corrosive وأحيانا يغطى سطح البريمه بطبقة صلده . عندما تكون المواد المنقوله ذات قوام خشن جدا .

الحسابات الاوليه لتشغيل بريمة ناقله :

١- تحديد السعة النظرية للبريمه : ويمكن حسابها من القانون الآتى :

$$\text{Screw Conveyor Capacity} = \frac{\pi}{4} (D_1^2 - D_2^2) P \cdot n \quad (7-2)$$

حيث ان :

$$D_1 = \text{قطر البريمه}$$

$$D_2 = \text{قطر عمود الادارة .}$$

$$P = \text{خطوة البريمه (تساوى عادة } D_1 \text{) .}$$

$$n = \text{عدد لفات عمود الاداره فى وحدة الزمن .}$$

والخطوه القياسيه تساوى فى معظم البريمات الافقيه قطر البريمه وفى البريمات التى تعمل على ميل تساوى عادة نصف قطر البريمه وتوجد بعض بريمات ذات خطوه قياسيه متغيره وتستعمل فى الحالات الخاصة كنقل المواد الثقيله والتى لها لزوجة عاليه ، كذلك عندما تستعمل الناقلات فى ضبط مقدار التصريف وتنظيمه .

والسعه الفعلية للبريمه الناقله تقل كثيرا عن السعه النظرية وتعتمد على المسافه بين حافة البريمه والغطاء او المجرى التى تدور بداخله ، وعلى خواص المادة المنقوله وطول البريمه ومقدار الرفع او الميل المطلوب . وتتراوح قيمة السعه الفعلية للبريمه بين ٥٠ ، ٦٠٪ من السعه النظرية.

٢- تحديد القدرة اللازمه لتشغيل البريمه :

وتعتمد على الآتى :

أ - طول البريمه .

ب- مقدار الرفع المطلوب .

- ج - نوع الكراسى التى يدور داخلها عمود البريمة .
- د - مقدار احتكاك المادة المنقوله على المادة المصنوعة منها البريمة.
- هـ- مقدار تصرف البريمة او سعتها الناقلة .
- و - القدرة اللازمة لتقويم Starting بريمة ناقلة .

ويمكن حساب القدرة اللازمة لتشغيل البريمة من القانون الآتى :-

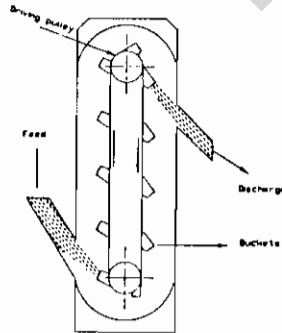
$$\text{Power} = \frac{mL \rho P_c}{\text{Const.}} \quad (7-3)$$

حيث ان :-

- m = السعة الفعلية للبريمة .
- L = طول البريمة.
- ρ = كثافة المادة المنقولة .
- P_c = معامل تصحيح القدرة ويعتمد على قيمة القدرة.

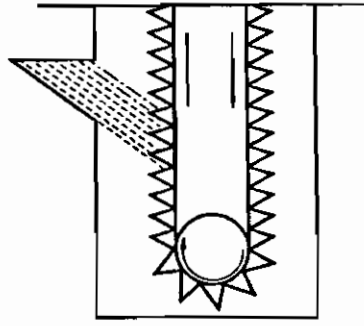
- $P_c = 2$ اذا كانت القدرة المحسوبة اقل من واحد حصان .
- $= 1.25$ اذا كانت القدرة المحسوبة بين ١ الى ٢ حصان.
- $= 1.25$ اذا كانت القدرة المحسوبة بين ٢ الى ٤ حصان .
- $= 1.1$ اذا كانت القدرة المحسوبة بين ٤ الى ٥ حصان .
- $= 1$ اذا كانت القدرة المحسوبة اكثر من ٥ حصان .

القواديس، او السواقى الرافعه : Bucket Conveyor



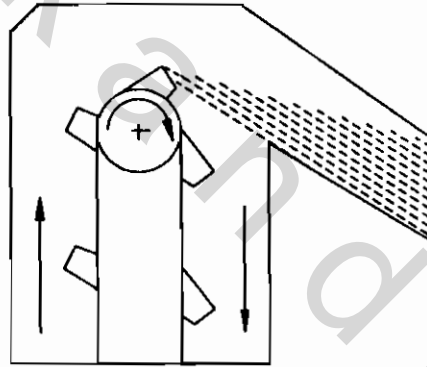
Bucket Elevator or Conveyor

شكل (٧-١) قطاع رأسى فى الناقل ذى السواقى



Feeding Section

شكل (٧-١١) تغذية الناقل

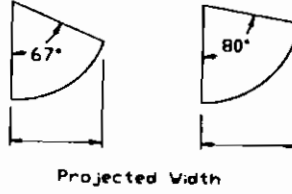


Head of Bucket Conveyor

شكل (٧-١٢) قطاع في رأس الناقل

ويمكن اعتبارها حالة خاصة من السير أو الجنزير الناقل حيث انها عبارة عن مجموعة من القواديس مثبتة على مسافات متساوية في سير ناقل او متصله ببعضها بواسطة جنزير (سلسلة) .

والسواقي الرافعة كفاءتها عالية جدا بالرغم من ان تكاليفها الانشائية مرتفعه . وترجع كفاءتها العاليه الى ان المواد المنقولة بواسطتها لاتنزلق ولا توجد حركة نسبية بين المادة المنقولة والقواديس المنقولة داخله وهذا هو الفرق الرئيسى بين السواقي الرافعة والجنزير الجارف الشبه عمودى (اشكال ٧-١٠، ٧-١١، ٧-١٢).



شكل (٧-١٢) اشكال مختلفة للقواديس

والقواديس تختلف فى اشكالها حسب المادة المراد نقلها وهى عامة تكون على الشكل المبين بالرسم شكل (٧-١٢).

وجود الزاوية والقاع المستدير يسهل عملية الملاء والتفريغ والمسافة بين كل قادوس وآخر تتراوح بين ضعف وثلاثة مرات عرض القادوس المسقط Projected Width ويمكن تحديد سعة السواقي الرافعة من المعادلة الآتية :-

سعة الساقية = عدد القواديس فى وحدة الطول × سعة القادوس × سرعة القادوس

وتحسب القدرة اللازمة لتشغيل الساقية كالاتى :

$$\text{Horse Power} = \frac{m \cdot h \cdot P_c}{\text{Standard horse power}} \quad (7-4)$$

حيث ان :

m = سعة الساقية .

h = مقدار الرفع .

P_c = معامل تصحيح القدرة يساوي ١.١ الى ١.١٥ وذلك لان القدرة الفعلية

تزيد بمعدل يتراوح بين ١٠ و ١٥٪ من القدرة النظرية نتيجة للاحتكاك

مع طارات الساقية والقدرة اللازمة لبدء حركة الساقية .

Pneumatic Conveyors : الناقلات بالهواء

وتستعمل عادة لنقل المواد الحبيبة فى انفاق او مجارى مقفلة بواسطة السرعة العالية للهواء سواء كان النقل بالشفط او الضغط او الاثنين معا .

خواص النقل بالهواء :

مميزاته :

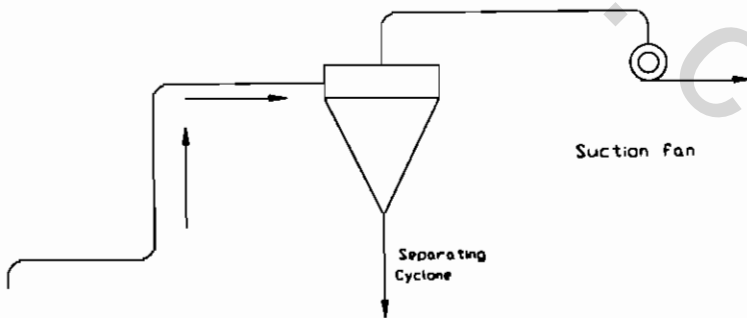
- ١- سعر انشائى منخفض.
- ٢- بساطة التصميم والتركيب حيث ان الجزء الرئيسى المتحرك هو المروحة فقط.
- ٣- يمكن تغيير مسار المواد وتفرعها وتشعبها بمرونة عالية .
- ٤- تستخدم فى نقل المواد المختلفه مثل (الغبار ، الالياف ، الرمل ، الحبوب ، المساحيق ، الخرق ، القطن ، وخلافه).
- ٥- الجهاز ينظف نفسه بنفسه .

عيوبه :

- ١- يلزمه قدرة عاليه للتشغيل .
- ٢- احتمال حدوث تلف لبعض المواد المنقوله .

الطرق المختلفه للنقل بالهواء : تتلخص هذه الطرق فى ثلاثة انواع :

اولا : طريقة الشفط او السحب : Suction

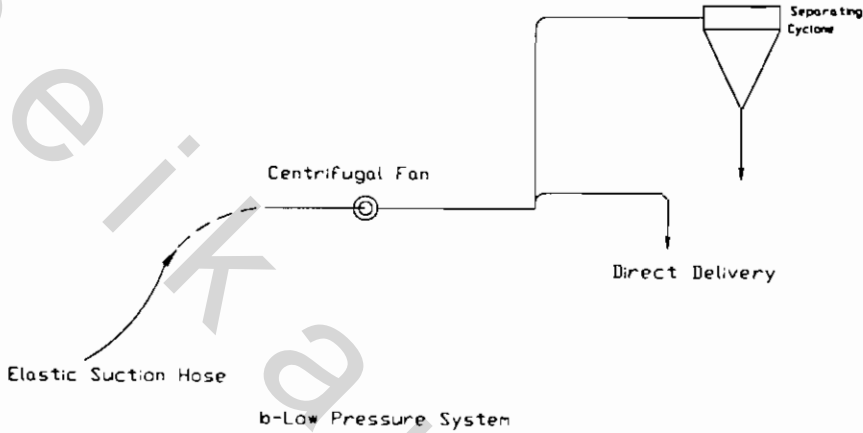


a-Suction System

شكل (٧-١١٤) نماذج لطريقة النقل برفع الهواء تبعا للضغط المستخدم

وتعمل على ضغط منخفض اقل من الضغط الجوى وتعتبر احسن طريقة لنقل المواد الى اماكن مختلفة كالتفريغ من اللوريات ومقطورات السكة الحديد ونقل الحبوب من السفن وكذلك تستخدم لنقل المواد ذات القوام الخاص الذى لا يمر بسهولة من المحابس او المراوح مثل القطن .

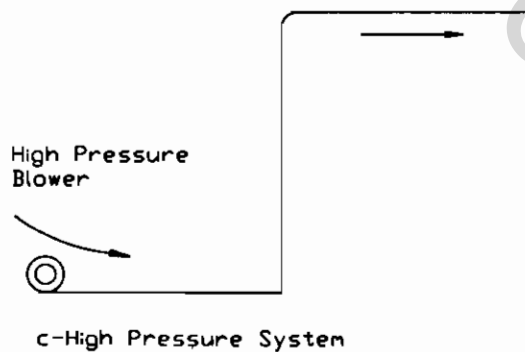
ثانيا : طريقة الضغط المنخفض : Low Pressure System



شكل (٧-١٤ب) نماذج لطريقة النقل برفع الهواء تبعا للضغط المستخدم

وفيها تستخدم مروحة طاردة مركزيه تستعمل هواء ذو سرعة عاليه وكثافة منخفضه (ضغط الهواء يصل الى ١٤ بوصة ماء رفع).

ثالثا : طريقة الهواء ذو الضغط العالى : High Pressure System



شكل (٧-١٤ج) نماذج لطريقة النقل برفع الهواء تبعا للضغط المستخدم

وفيها تستخدم هواء ذو سرعة منخفضة وبكثافة مرتفعة وعادة تستعمل لهذا الغرض المراوح او ضواغط الهواء Blowers ، ذو الازاحة الايجابية مثل Lobe Blower وتدخل المادة الى المروحة مباشرة او عن طريق خراطيم مرنة وطريقة الضغط العالى اكفاً بكثير عن طريقة الشفط حيث ان كثافة الهواء مرتفعه وسرعته اقل وتستخدم هذه الطريقة عندما تكون اماكن التفريغ او التصريف Discharge متغيرة كتحميل العربات والمقطورات والخزانات .

معدل نقل الهواء :

تختلف سرعة الهواء المستعمل فى النقل باختلاف حجم حبيبات المادة المراد نقلها وتعتبر سرعة ٥٠ قدم فى الثانية مناسبة للنقل ويجب اضافتها للسرعة اللازمة لجعل حبيبات المادة عالقة بالهواء عندما يكون النقل عمودى . وتتطلب سرعة اكبر فى النقل الافقى حتى يمكن عمل دوامه من الهواء قادرة على حمل حبيبات المادة المراد نقلها .

ويمكن حساب سرعة مرور الهواء من القانون الاتى :-

$$V = 60 C \sqrt{\rho} \quad (7-5)$$

حيث ان :

V = سرعة مرور الهواء بالقدم/دقيقة

ρ = كثافة المادة رطل/قدم مكعب

C = معامل يعتمد على المادة والطريقة المستخدمة يستخرج من الجدول (٧-٤):

جدول (٧-٤) قيمة المعامل C

المادة	مجارى مستقيمة وأفقية		مجارى منحنية وعمودية	
	مواسير	خراطيم	مواسير	خراطيم
مساحيق	١٠	١٦	١٢ر٥	٢٠
حبوب	١٢	٢٠	١٥	٢٤
حبوب بها كسور وغير منظمة القوام	١٥	٢٤	١٨ر٧٥	٣٠

المصدر : (Henderson and Perry 1976)

وتعتمد كمية المواد المراد نقلها لكل وحدة حجم من الهواء على شفق الهواء وانتظام التلقيم والحجم النوعى للمادة وطريقة نقلها ، ففى حالة النقل الافقى تكون كمية الهواء لوحدة من الزمن اقل منها فى حالة النقل العمودى وذلك لان معامل الانزلاق بين المادة والهواء يكون اقل . وطريقة النقل ذو الضغط المرتفع ترتفع فيها كمية المادة المنقولة لكل قدم مكعب من الهواء وذلك لارتفاع كثافة الهواء وتعتبر ٢-٢ متر مكعب من الهواء لكل كيلو جرام واحد من المادة مناسبة لطريقة النقل بالضغط المرتفع .