المملكة العربية السعودية
المؤسسة العامة للتدريب التقني والمهني
الإدارة العامة لتصميم وتطوير المناهج

تخصص تقنية التصنيع الغذائي

إنتقال الحرارة والموائع

116 صنع

طبعة ١٤٢٩ هـ

مقدمة

الحمد لله وحده، والصلاة والسلام على من لا نبي بعده، محمد وعلى آله وصحبه، وبعد:

تسعى المؤسسة العامة للتدريب التقني والمهني لتأهيل الكوادر الوطنية المدربة القادرة على شغل الوظائف التقنية والفنية والمهنية المتوفرة في سوق العمل، ويأتي هذا الاهتمام نتيجة للتوجهات السديدة من لدن قادة هذا الوطن التي تصب في مجملها نحو إيجاد وطن متكامل يعتمد ذاتياً على موارده وعلى قوة شبابه المسلح بالعلم والإيمان من أجل الاستمرار قدماً في دفع عجلة التقدم التنموي؛ لتصل بعون الله تعالى لمصاف الدول المتقدمة صناعياً.

وقد خطت الإدارة العامة لتصميم وتطوير المناهج خطوة إيجابية تتفق مع التجارب الدولية المتقدمة في بناء البرامج التدريبية، وفق أساليب علمية حديثة تحاكي متطلبات سوق العمل بكافة تخصصاته لتلبي متطلباته، وقد تمثلت هذه الخطوة في مشروع إعداد المعايير المهنية الوطنية الذي يمثل الركيزة الأساسية في بناء البرامج التدريبية، إذ تعتمد المعايير في بنائها على تشكيل لجان تخصصية تمثل سوق العمل والمؤسسة العامة للتدريب التقني والمهني بحيث تتوافق الرؤية العلمية مع الواقع العملي الذي تفرضه متطلبات سوق العمل، لتخرج هذه اللجان في النهاية بنظرة متكاملة لبرنامج تدريبي أكثر التصاقاً بسوق العمل، وأكثر واقعية في تحقيق متطلباته الأساسية.

وتتناول هذه الحقيبة التدريبية " انتقال الحرارة والموائع " لمتدربي قسم" تقنية التصنيع الغذائي " للكليات التقنية موضوعات حيوية تتناول كيفية اكتساب المهارات اللازمة لهذا التخصص.

والإدارة العامة لتصميم وتطوير المناهج وهي تضع بين يديك هذه الحقيبة التدريبية تأمل من الله عز وجل أن تسهم بشكل مباشر في تأصيل المهارات الضرورية اللازمة، بأسلوب مبسط يخلو من التعقيد، وبالاستعانة بالتطبيقات والأشكال التي تدعم عملية اكتساب هذه المهارات.

والله نسأل أن يوفق القائمين على إعدادها والمستفيدين منها لما يحبه ويرضاه، إنه سميع مجيب الدعاء.

الإدارة العامة لتصميم وتطوير المناهج

تمهيد

تدخل الحرارة في الكثير من التطبيقات العملية في حياتنا اليومية. وتلعب الموائع الدور الرئيس في الكثير من هذه التطبيقات ولا سيما في منشاة التصنيع الغذائي. فعمليات التسخين والتبريد والتجميد والتجفيف والبسترة خير مثال على هذه العمليات الحرارية. وكل هذه العمليات تتعامل أساساً مع موائع سواء كان الحديث عن العصائر بأنواعها المختلفة أو الحليب أو غيرها من الموائع. وهذا المقرر وضع لإفادة المتدرب والتمهيد له لبعض المقررات الأخرى والتي ترتبط ارتباطا وثيقا في حقيقة مدى فهم المتدرب لهذا المقرر. ولذلك كان لا بد من وجوده في الفصول الدراسية الأولى للمتدرب.

وتمشياً مع المستوى البسيط للطالب والحاجة القليلة له للتعمق في مواضيع انتقال الحرارة والموائع فقد تمت عملية وضع هذه الحقيبة بصورة مبسطة ،سلسة ،شاملة ومغنية بحيث تمكن المتدرب من المعرفة بأساسيات كل موضوع والعلاقة الوثيقة بين هذا الموضوع وبين التطبيق العملي له في منشأة التصنيع الغذائي. وزودت هذه الحقيبة ببعض الأمثلة الحسابية وبعض الرسومات التوضيحية والتي تقرب المتدرب إلى الواقع التقني.

وتتضمن هذه الحقيبة ستة وحدات قسمت إلى جزأين ،جزء يتعلق بانتقال الحرارة وآخر يتعلق بميكانيكا الموائع بحيث يتكون كل جزء من ثلاث وحدات. ففي الوحدة الأولى تم التطرق إلى العلاقة بين انتقال الحرارة والديناميكا الحرارية وقوانين الديناميكا الحرارية. كما تمت دراسة بعض الخواص الحرارية للمواد الغذائية ودراسة حالات لانتقال الحرارة بالصورة غير المستقرة. أما في الوحدة الثانية فتم التعرف على الطرق الثلاثة المختلفة لانتقال الحرارة(الحمل، التوصيل، الإشعاع) والتفريق بين هذه الطرق وكيفية ومتى يحدث كل نوع منها.كما تم في هذه الوحدة دراسة الأساليب المختلطة لحدوث التبادل الحراري مع ربط جميع هذه الأساليب بالتطبيقات الخاصة والمتعلقة بعمليات التصنيع الغذائي المتعددة.

أما الوحدة الثالثة فقد تناولت أهم تطبيق من التطبيقات العملية المتعلقة بانتقال الحرارة وهو المبادل الحراري, حيث تم التعرف على الأنواع المختلفة له وكيفية التمييز بينها وعلى التحليل العلمي والعمليات الحسابية.

أما الوحدة الرابعة فقد اشتملت على بعض الخواص الفيزيائية المتعلقة بالموائع وتأثيرها على حركة ومظهر المائع كالكثافة واللزوجة والوزن النوعي والحجم النوعي والتوتر السطحي وغيرها من الخواص. وتم في هذه الوحدة دراسة الضغط الهيدروستاتيكي(المائع في حالة السكون) وبعض الأجهزة المستخدمة في عمليات القياس.

الوحدة الخامسة شملت الأنواع المختلفة للانسياب ودراسة قوانين الموائع في حالة الحركة كمعادلتي الاستمرارية وبرنولي. ومن خلال هذه الدراسة تم التطرق إلى أنواع مختلفة من طرق قياس معدلات التدفق, وإلى بعض المسائل العملية على الفواقد الاحتكاكية والتي يتعرض إليها المائع أثناء عملية انتقاله من نقطة إلى أخرى سواء كانت هذه الفواقد بسبب الانحناءات والتعرجات الشكلية أو كانت نتيجة للخواص الفيزيائية للمائع وتفاعلها مع الوسط الذي توجد به.

الوحدة السادسة من هذه الحقيبة تضمنت آلية نقل المائع عن طريق المضخات فتم من خلال هذه الوحدة التعرف على الأنواع المتعددة من هذه المضخات وطرق عملها وبعض المميزات الخاصة بكل نوع والعيوب والمشاكل التي قد تواجهنا أثناء العملية التشغيلية لتلك الأنواع. وتم أيضاً التطرق إلى كيفية اختيار مضخة معينة لتناسب تطبيقاً ما وكيفية توصيل هذه المضخات مع بعضها للحصول على أداء أفضل.

وقد تم تزويد المتدرب بعدد من المسائل الحسابية المتنوعة لتمكينه من فهم وإدراك المواضيع النظرية ولتسهيل ربط المتدرب بالمفاهيم الواجب معرفتها أثناء تعامله مع العمليات التصنيعية المختلفة. وكلنا أمل ورجاء من الله أن يوفق المتدرب في الحصول على الفائدة المرجوة وأن يتعامل مع هذه الحقيبة بزود حرص وإتقان ليعم النفع وتتحقق الغاية.

انتقال الحرارة والموائع

نظم التسخين والتبريد

الوحدة الأولى: نظم التسخين والتبريد

الجدارة: التعرف على أهمية وحاجة عملية التسخين والتبريد في التصنيع الغذائي وعلاقته بالخواص الحرارية للمواد الغذائية.

الأهداف: معرفة بعض الخواص الحرارية للأغذية كالموصلية الحرارية والحرارة النوعية. وعلاقتها بعمليات التسخين والتبريد المختلفة ودراسة التأثيرات الزمنية على هذه العمليات.

مستوى الأداء المطلوب: أن يصل المتدرب إلى إتقان الجدارة بنسبة 95٪.

الوقت المتوقع للتدريب على الجدارة: 3ساعات.

الوسائل المساعدة: لا يحتاج المتدرب إلى آية وسيلة مساعدة

متطلبات الجدارة: أن يقوم المتدرب بفهم المعنى الحقيقي للموصلية الحرارية والحرارة النوعية للمادة ويتعرف وبصورة مبسطة على قوانين الديناميكا الحرارية وعلاقتها بالحرارة. ومن ثم يتعرف المتدرب على آلية حدوث انتقال الحرارة غير المستقر من خلال بعض المعادلات الرياضية البسيطة.

المقدمة:

يعد تسخين الأغذية وتبريدها الشق الأكبر في مصانع التصنيع الغذائي.حيث إن أي منشاة تصنيع تحتوي على الكثير من الأجهزة التي تتعامل بالحرارة كالمبخرات وأجهزة التجميد والتبريد والتعقيم والتجفيف. وبما أن التسخين والتبريد للمنتجات الغذائية مهماً جداً لوقاية الأطعمة من الفساد عن طريق الإنزيمات أو الإصابة بالميكروبات.كما أن خواص المنتج الغذائي وجودته تعتمد على المعاملة الحرارية التي يكون قد تعرض لها أثناء العملية التصنيعية.لهذا كله كان لا بد من دراسة انتقال الحرارة لمعرفة أسس كيفية تشغيل أجهزة التصنيع الغذائي المختلفة.

الخواص الحرارية للأغذية:

يعتبر تحديد الخواص الحرارية للمواد الغذائية مهما جداً في تحديد معدلات انتقال الحرارة من وإلى المادة الغذائية. ومن الخواص الحرارية التي يجب أن نتعرض لها الحرارة النوعية Specific Heat وهي كمية الحرارة المكتسبة أو المفقودة لوحدة الوزن للمنتج للوصول إلى تغير الحرارة المرغوب فيه بدون تغير المنتج. ويرمز للحرارة النوعية ب C_p وتعطى بالمعادلة الحسابية التالية:

$$c_p = \frac{Q}{M\Delta T}$$

حيث إنQ: هي كمية الحرارة المكتسبة أو المفقودة(KJ).

M: الكتلة(Kg).

T:التغير في درجة الحرارة(C^0).

Cp:الحرارة النوعية (KJ/kg.k).

وتتأثر الحرارة النوعية للمنتج بمكوناته من محتوى رطوبي وحرارة وضغط, فتزداد الحرارة النوعية مع زيادة المحتوى الرطوبي, وتكون الحرارة النوعية للغاز عند ضغط ثابت C_p أكبر منه عند حجم ثابت C_v. وفي تطبيقات هندسة التصنيع الغذائي يكون الضغط ثابتاً. وتستخدم الحرارة النوعية الظاهرية للعمليات التي يتم فيها تغيير حالة المنتج مثل التجميد, والجدول التالي يبين قيم الحرارة النوعية لبعض المنتجات الغذائية:

اسم المنتج	الحرارة النوعية له(J/kg.k)	اسم المنتج	الحرارة النوعية له(KJ/kg.k)
ساردين	3014	شرائح البقر	3520
جزر طازج	3935	الزبدة	2135
تفاح	3726	حليب منزوع الدسم	4019
البطاطس	3517	صفار البيض	2810
الخيار	4013	السمك الطازج	3600

جدول(1- 1) الحرارة النوعية لبعض المنتجات الغذائية.

الموصلية الحرارية Thermal conductivity:

وهي عبارة عن معدل الحرارة المارة بالتوصيل من خلال وحدة سمك لجسم ما إذا كان الفرق في درجة الحرارة بين طرفي السمك هو درجة واحدة.ويرمز للموصلية الحرارية للمادة بالرمز K وتعطى بوحدة(W/m.k). وقيم الموصلية الحرارية تختلف من مادة إلى أخرى إلا أن قيمها للمواد والمنتجات الغذائية ذات الرطوبة المرتفعة مقاربة لقيم الموصلية الحرارية للماء. ويمكن استخدام معادلة سويت لإيجاد قيمة الموصلية الحرارية للفواكة والخضراوات التي تزيد رطوبتها عن 60% وهذه المعادلة هي:

$$K = 0.148 + 0.00493\ w$$

حيث إن wهو المحتوى الرطوبي للمنتج.

وهناك معادلة أخرى لقياس الحرارة النوعية للحوم عند درجة حرارة $60C^0$ ومحتوى رطوبي بين 60-80 % وهي:

$$K = 0.08 + 0.0052w$$

مثال(1- 1)

تنبأ بمعامل انتقال الحرارة بالتوصيل لقطعة من التفاح تحتوي على 65% رطوبة؟

$$K = 0.148 + 0.00493*65 = 0.46845\ W/m.k$$

العلاقة بين انتقال الحرارة والديناميكا الحرارية The Relation Of Heat Transfer To Thermodynamics:

تنتقل الطاقة الحرارية عند وجود أي فرق في درجة الحرارة ضمن النظام. وهذه الطاقة لا يمكن ملاحظتها أو قياسها لكن التأثيرات التي يسببها ذلك الشيء تكون خاضعة للقياس والملاحظة. وهذا العلم يسمى بعلم انتقال الحرارة.

قوانين الديناميكا الحرارية:

القانون الصفري: وينص على أنه إذا كانت درجة حرارة الجسمA تساوي درجة حرارة الجسم B وكانت درجة حرارة الجسم B تساوي درجة حرارة الجسم C فإنه لا بد أن تكون درجة حرارة الجسم A مساوية لدرجة حرارة الجسم C.

القانون الأول:

ويختلف تطبيقه باختلاف الآلية حيث إنه ينص على مايلي:

1. عندما يخضع نظام **لدورة ديناميكية حرارية** فإن مجموع الطاقة الحرارية المضافة إلى النظام من الجو المحيط تساوي مجموع الشغل المبذول بالنظام على الجو المحيط به. ويعبر عنه بالصيغة الرياضية التالية:

$$\sum dQ = \sum dW$$
$$\sum Q = \sum W$$

2. **أما بالنسبة للعملية الميكانيكية فإنه ينص على ما يلي:**الفرق بين مجموع الطاقة الحرارية المضافة إلى النظام من المحيط والشغل المبذول على النظام من المحيط يساوي التغير في الطاقة الداخلية للنظام. ويعبر عنه رياضياً بالصورة التالية:

$$\Delta U = \Delta Q - \Delta W$$

ويلخص القانون الأول في الديناميكا الحرارية بأن الطاقة لا تفنى ولا تستحدث ولكن تحول من شكل إلى آخر.

ويجب أن نشير أنه في حالة إضافة الحرارة إلى النظام كما في الغلاية تكون الإشارة موجبة بينما في حالة سحب الحرارة من النظام تكون الإشارة سالبة كما في حالة المكثف. وأما بالنسبة إلى الشغل

فإذا كان الشغل مبذولاً على النظام يكون سالباً كما في شغل المضخة وإذا كان الشغل مأخوذا من النظام فإنه يكون موجباً كما في حالة التوربينة.

مثال(1- 2)

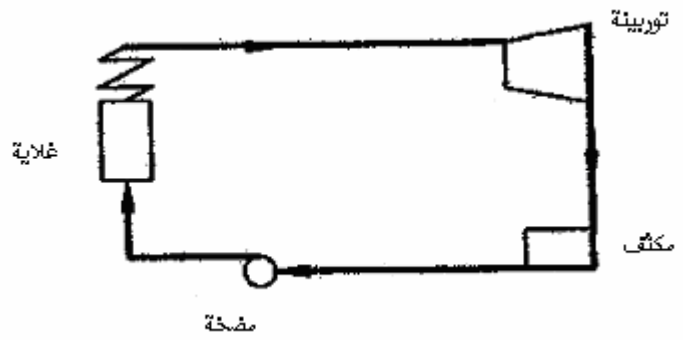
ينتج توربين بخاري 1000kw. وكمية الحرارة المضافة للبخار في الغلاية2800kj/kg. وكمية الحرارة المطرودة إلى مياه التبريد هي2100kj/kg. والشغل اللازم لمضخة إعادة المياه المتكثفة إلى الغلاية 5kw. احسب معدل انسياب البخار في تلك الدورة. انظر الشكل(1- 1)

$$\sum Q = \sum W$$

$$M^0(2800 - 2100) = (1000 - 5)$$

$$M^0 (700) = 995$$

$$M0 = 995/700 = 1.4214 \quad kg/s$$



شكل(1- 1) دورة ميكانيكية في محطة توليد طاقة بدائية.

مثال(1- 3)

في إحدى العمليات التصنيعية لمعجون الطماطم. وجد أن كمية الحرارة المطرودة لماء التبريد هي 45kj/kg والشغل المبذول على المعجون يساوي90kj/kg . احسب التغير في الطاقة الداخلية للمعجون .

$$\Delta U = \sum Q - \sum W$$

$$\Delta U = (-45)-(-90) = 45kj/kg$$

أما فيما يتعلق **بالقانون الثاني** في الديناميكا الحرارية فيتعلق بإمكانية حدوث أو عدم حدوث عملية ما وذلك استنادا على اعتبارات تجريبية تستند في أساسها على عدم إمكانية نقل الحرارة نهائياً من منطقة ذات درجة حرارة منخفضة إلى منطقة ذات درجات حرارية أعلى.

إن جميع العمليات في انتقال الحرارة يجب أن تخضع للقانون الأول والثاني في الديناميكا الحرارية. وبالتالي فإن علم انتقال الحرارة هو العلم الذي يتنبأ بانتقال الطاقة والذي يحدث بين جسمين ماديين كنتيجة للفرق الحراري بينهما. بينما علم الديناميكا الحرارية فإنه يبحث في انتقال الحرارة من خلال الأنظمة من خلال التغييرات ولا يعطي أي اعتبار لتركيب المادة فنصف النظام بخصائصه الإجمالية وبالتالي فإنه يعلمنا بأن هذه الطاقة المنتقلة هي عبارة عن حرارة . إن علم انتقال الحرارة لا يهتم بتفسير كيفية انتقال الحرارة بالضرورة فقط ولكنه يتنبأ بالمعدل الذي يحدث عنده التبادل الحراري تحت ظروف محددة. وبالمحصلة فإن الفرق بين علم الديناميكا الحرارية وعلم انتقال الحرارة هو معدل الانتقال الحراري. كذلك فإن الديناميكا الحرارية تتعامل مع النظام في حالة اتزان وتستخدم لحساب كمية الطاقة(الحرارة) اللازمة لتغيير النظام من حالة متزنة إلى حالة متزنة أخرى ولكنها لا تبين سرعة ووقت حدوث هذا التغير المطلوب عندما يكون النظام في حالة عدم اتزان. وكمثال على ما قلناه لو أننا أخذنا عملية تبريد قضيب من الحديد في ماء ساخن فإننا نتبين إن علم الديناميكا الحرارية تتنبأ بالحالة النهائية للقضيب داخل الماء ولكنها لا تخبرنا كم من الوقت ستستغرق هذه العملية أو كم ستصبح درجة حرارة القضيب بعد فترة زمنية محددة قبل الوصول إلى حالة الاتزان.

ويمكن تعريف انتقال الحرارة على أنه انتقال الطاقة من منطقة إلى أخرى نتيجة لوجود فرق في درجة الحرارة بينهما. وأينما يكون هناك فرق حراري بين جسمين فإنه يحدث انتقال للطاقة من الجسم الساخن إلى الجسم البارد وهذه الطاقة المنتقلة تسمى حرارة وانتقال الحرارة بمعدل مقبول هو أحد أكبر مشاكل عمليات التصنيع مثل التسخين والتبريد والتبخير والتقطير وغيرها.

انتقال الحرارة غير المستقرTransient Heat Transfer:

الحالات السابقة جميعها كانت تتعامل مع عمليات انتقال حرارة مستقرة وهذا يعني أن درجة الحرارة عند أي نقطة لا تتغير مع الزمن.وهناك حالات هامة لا تسود عندها ظروف الحالة المستقرة حيث تتعرض فجائياً حدود المجموعات لتغير في درجة حرارتها مع الزمن ولذلك ننتقل إلى مفهوم انتقال الحرارة العابر(غير المستقر)فمثلاً اختلاف الظروف الجوية ليلاً ونهاراً وكذلك الحاجة إلى إيقاف العمليات التصنيعية عند فترات زمنية محددة ولأغراض تصنيعية صحية هي أمثلة حقيقية على انتقال الحرارة غير المستقر.وتعتبر عمليات التبريد والتجميد للأغذية الصلبة كاللحوم والأسماك وتبريد الفواكة والخضراوات عبارة عن عمليات انتقال حراري غير مستقر.كما أن العمليات الحرارية للغذاء في العبوات خلال عمليات التعقيم والبسترة مثال آخر على انتقال الحرارة غير المستقر

عند وضع جسم ذي درجة حرارة ابتدائية منتظمة بصورة فورية بداخل وسط ذي درجة حرارة مرتفعة, ولإيجاد تغير درجة حرارة الجسم مع الزمن يكون هناك مقاومتان حراريتان هما مقاومة حمل حراري بين الوسط المحيط والجسم ومقاومة داخلية في الجسم. وقيم هاتين المقاومتين متغيرة باستمرار نظراً لتغير الفرق في درجة الحرارة بين الجسم والمحيط ودرجة حرارة الجسم. ولإيجاد تأثير المقاومات تم استنتاج رقم سمي برقم بيوتBiot Number ويمثل النسبة بين المقاومة الداخلية لانتقال الحرارة (التخزين) والمقاومة الخارجية (السطحية) حيث إنه يساوي:

$$Bi = \frac{hL}{K}$$

حيث أنh هو معامل انتقال الحرارة بالحمل وk معامل التوصيل الحراري(الموصلية الحرارية) وL طول السطح.

1. عندما يكون مقدار رقم بيوتBi أقل من 0.1 فإن المقاومة الخارجية هي التي تتحكم بانتقال الحرارة ويكون لها الدور الرئيس (أي إن المقاومة الداخلية تكون مهملة فتكون قيمةh أكبر من قيمةK) وعندها نفترض أن درجة حرارة الجسم الداخلية مساوية لدرجة حرارة الوسط. ويمكن كتابة المعادلة الحرارية بين الجسم والتي تمثل التخزين الحراري وبين الجسم والوسط والتي تمثل الحمل الحراري فإنها تصبح كالتالي:

$$mCpdT = hA(T_0 - T)dt$$

وبترتيب المعادلة السابقة وبإجراء التكامل نصل إلى المعادلة التالية والتي تسمى معادلة نيوتن للتبريد أو التسخين:

$$\ln\frac{T_0 - T}{T_0 - T_1} = -\frac{hA}{mCp}t$$

$$\frac{T_0 - T}{T_0 - T_1} = e^{-\frac{hA}{mCp}t}$$

حيث أن:

T هي درجة حرارة الجسم الداخلية.

T_1 هي درجة حرارة الجسم الابتدائية.

T_0 درجة حرارة الوسط المحيط الثابتة.

A: المساحة السطحية للجسم.

H: معامل انتقال الحرارة بالحمل بين الوسط والمحيط.

T: الزمن.

وفي الحالة العامة للأجسام الصلبة أو الموائع بدون خلط فلا ينطبق فرض انتظام درجة الحرارة الداخلية ولهذا يجب أن يعطى الحل العام درجة الحرارة بدلالة الزمن والموضع.

مثال(1- 4):

احسب درجة الحرارة لعصير طماطم كثافته$980kg/m^3$ بعد أن سخن لمدة.5min في غلاية نصف كروية مغلفة نصف قطرها50cm ومعامل انتقال الحرارة بالحمل يساوي$5000w/m^2K$ ودرجة الحرارة الداخلية في الغلاية $90C^0$ ودرجة حرارة الطماطم البدائية$20C^0$علماً بأن الحرارة النوعية لعصير الطماطم$3950J/kgK$؟

الزمن بعد.5min يساوي300sec. ونلاحظ أن المنتج سيخلط جيداً

نحسب مساحة السطح وتساوي مساحة نصف الكرة وهي تساوي:

$$A = \frac{1}{2}\left[4\pi r^2\right] = 2\pi r^2 = 2\pi(0.5)^2 = 1.57m^2$$

$$\forall = \frac{1}{2}X\frac{4}{3}\left[\pi r^3\right] = \frac{4\pi(0.5)^3}{2} = 0.262m^3$$

$$m = \rho\forall = 980X0.262 = 0.257kg$$

$$\frac{T_0 - T}{T_0 - T_1} = e^{-\frac{hA}{mCp}t}$$

$$\frac{90 - T}{90 - 20} = e^{-\frac{5000X1.57}{0.257X3950}X300}$$

ونجد قيمة Tوالتي ستساوي$83.3C^0$.

2. عندما يكونBi أكبر من0.1 وأقل من40 فإن المقاومة الداخلية والمقاومة السطحية مؤثرتان وتكون قيمةK أكبر منh ويتم حساب رقم جديد في هذه الحالة يسمى برقم فورييرFo ويمثل النسبة بين معدل التوصيل الحراري عبر بعد معين وبين معدل تخزين الحرارة بالحجم المكعب. ونلجأ في هذه الحالة إلى خرائط للزمن ودرجات الحرارة.

$$F_o = \frac{Kt}{C_P\rho r^2} = \frac{\alpha t}{x^2}$$

$$\alpha = \frac{k}{\rho C_P}$$

حيث إنه يستخدم r كعامل إذا كان الجسم على شكل كروي أو أسطواني, أما إذا كان الجسم على شكل مضلع فإنه يستخدمx/2 بديلاً عن نصف القطر و α هي معامل الانتشار الحراري وبإيجاد رقمي بيوت و فورييرنستطيع إيجاد $\frac{T - T_0}{T_1 - T_0}$.

مثال(1- 5)

سطح سمكه60cm ودرجة حرارته الابتدائية$20C^0$ معرض من جانبيه إلى غازات ساخنة مندفعة عند درجة حرارة$577C^0$ فإذا علمت أن معامل انتقال الحرارة بالحمل بين الغازات والسطح يساوي$13.5w/m^2K$ ومعامل انتقال الحرارة بالتوصيل للسطح$4w/mK$ وكثافة مادة السطح$2590kg/m^3$ والحرارة النوعية للسطح$0.3Kj/kgK$احسب درجة الحرارة في منتصف الجدار بعد مرور.8.75hr.

نحسب رقم فوريير:

$$F_o = \frac{Kt}{C_P \rho r^2}$$

$$F_o = \frac{4X8.75}{0.3X2590X\left(\frac{0.6}{2}\right)^2} = 0.5$$

نحسب رقمBi:

$$Bi = \frac{hL}{K}$$

$$Bi = \frac{13.5X0.3}{4} = 1.01$$

ومن الشكل نجد أن $\frac{T - T_0}{T_1 - T_0}$ تساوي0.8. عند منتصف السطح.

$$\frac{T - 577}{20 - 577} = 0.8 \Rightarrow T - 577 = 0.8(20 - 577) = -445.6$$

$$T = 577 - 445.6 = 131.4C^0$$

مثال(1- 6)

حبة برتقال قطرها10cm ودرجة الحرارة الابتدائية لها$18C^0$ وضعت لمدة 5.25hr في محيط درجة حرارة - $4C^0$ علماً بأن معامل انتقال الحرارة بالحمل على سطح الثمار$3w/m^2K$ ومعامل انتقال الحرارة بالتوصيل $0.15w/mK$ ومعامل الانتشار الحراري لداخل الثمار$4.75X10^{-4}m^2/hr$؟

$$Bi = \frac{hR}{K}$$

$$Bi = \frac{3 * 0.05}{0.15} = 1$$

$$F_o = \frac{Kt}{C_P \rho r^2} = \frac{4.75X10^{-4} * 5.25}{0.05^2} = 0.9975$$

$$F_o = \frac{Kt}{C_P \rho r^2} = \frac{\alpha t}{x^2}$$

ومن الخرائط للأشكال الكروية نجد أن:

$$\frac{T-T_0}{T_1-T_0}=0.1$$

$$\frac{T-(-4)}{18-(-4)}=0.1\Rightarrow T+4=0.1X22$$

$$T=2.2-4=-1.8C^0$$

3- عندما يكون رقمBi أكبر من40 تكون المقاومة السطحية صغيرة جداً(مهملة) أي إن معامل انتقال الحرارة بالتوصيل للمادة مرتفع.ومن الأمثلة على ذلك تسخين أو تبريد مواد جيدة التوصيل الحراري. ولذلك نلجأ إلى خرائط معينة لإيجاد درجة الحرارة بعد فترة زمنية محددة.

انتقال الحرارة والموائع

انتقال الحرارة في حالة الاتزان

الوحدة الثانية : انتقال الحرارة في حالة الاتزان

الجدارة: التعرف والتفريق بين أساليب انتقال الحرارة الثلاث.

الأهداف: معرفة كيفية حدوث كل آلية من آليات الانتقال الحراري والتفريق بين هذه الآليات. وتحديد معدل الانتقال الحراري وتوزيع درجات الحرارة في الأجسام المادية.

مستوى الأداء المطلوب: أن يصل المتدرب إلى إتقان الجدارة بنسبة 95٪.

الوقت المتوقع للتدريب على الجدارة: 8 ساعات.

الوسائل المساعدة: لا يحتاج المتدرب إلى آية وسائل مساعدة .

متطلبات الجدارة: أن يقوم المتدرب بتطبيق قانون فوريير للتوصيل الحراري على جدار بسيط وآخر مركب ومعرفة كيفية التفريق بين نوعي الحمل الحراري الحر والقسري. وأن يتعرف على بعض الخواص الإشعاعية والعلاقات الرياضية التي تحسب معدلات الابتعاث الحراري من هذه الأجسام. كما يتطلب من المتدرب فهم بعض التطبيقات العملية على أساليب الانتقال الحراري المختلط وكيفية التعامل مع هذه التطبيقات بناء لا على مفهوم المقاومة الحرارية.

مقدمة :

إن انتقال الحرارة يعني أنه لا تتغير خواص المادة التي يحدث فيها انتقال الحرارة مع الزمن. بينما إن حدث تغيير في خواص المادة مع الزمن فإننا نتعامل في هذه الحالة مع حالة انتقال حرارة غير مستقر.فمثلا عند حساب معدل الفقد الحراري من جسم معين تحت ظروف حرارية ثابتة يكون النظام مستقراً بالرغم من تغير درجة حرارة ذلك الجسم من نقطة إلى أخرى إلا أن درجة الحرارة في تلك النقطة تبقى ثابتة مع الزمن. أما إذا كنا نتعامل مع عملية تسخين منتج غذائي فيكون النظام غير مستقر نظراً لتغير حالة النظام مع الزمن.

وللمعرفة التامة لتحليل انتقال الحرارة فمن الضروري التعامل مع أساليب انتقال الحرارة الثلاث وآلية انتقال الحرارة Mechanisms of Heat Transfer.

طرق انتقال الحرارة:

1. **انتقال الحرارة بالتوصيل** Conduction Heat Transfer:.ويتواجد هذا النوع من انتقال الحرارة خلال التبادل الحراري بين المواد الصلبة.
2. **انتقال الحرارة بالحمل**Convection heat transfer: ويتواجد هذا النوع في حالة التعامل مع المواد السائلة أو الغازية عند وجودها في حالة حركة مع وجود فروقات حرارية بينها أو بين مادة سائلة أو غازية مع سطح صلب.
3. **انتقال الحرارة بالإشعاع** Radiation Heat Transfer:وهو يختلف عن النوعين السابقين في أنه لا يحتاج إلى وسط مادي لحدوثه فهو يحدث في الفراغ ويكون نقل الحرارة فيه على شكل أمواج كهرومغناطيسية.

والأسلوبان الأولان يعتبران من إجراءات انتقال الحرارة حيث إنهما يعتمدان على التواجد البسيط لفرق درجات الحرارة. ولا يرتبط الأسلوب الأخير بتعريف انتقال الحرارة حيث إنه يعتمد على انتقال الكتلة لإتمامها ومع ذلك فإنه ينجز انتقالاً للطاقة من منطقة ذات مستوى طاقة مرتفع إلى منطقة ذات مستوى منخفض وبالتالي يتم اعتمادها على أنها وسيلة منفصلة.

1. انتقال الحرارة بالتوصيلConduction Heat Transfer:

وهو انتقال الحرارة داخل جسم ما أو من جسم لآخر عن طريق تبادل الطاقة الحركية بين الجزيئات دون إزاحة فعلية للجزيئات حيث إن الحرارة تنتقل عن طريق الجزيئات بحيث تنتقل الحرارة في

المواد الصلبة نتيجة لانتقال طاقة التذبذب من جزيء إلى آخر, وتنتقل في حالة المعادن نتيجة لانتقال الجزيئات الحرة وهذا هو سبب توصيلها الحراري العالي.

ويعتمد مفهوم التوصيل على الخواص الأساسية للمواد الصلبة وعلى الشكل الهندسي لجسم المادة. كما يعتمد التعبير المستخدم لوصف التوصيل الحراري على نوعية المحاور المستخدمة في وصف النظام سواء كانت محاور كارتيزيةCartesian أو محاور أسطوانيةCylindrical أو محاور كرويةSpherical.

ويعدُّ التوصيل إحدى طرق انتقال الحرارة التي تنقل الطاقة فيها على مستوى الجزيئات. تهتز الجزيئات التي تكتسب طاقة حرارية من أماكنها الخاصة. ويزداد مدى التذبذب مع مستوى الطاقة الحرارية المرتفعة. ينتقل هذا التذبذب من جزيء إلى آخر بدون انتقال حركة حقيقية بين الجزيئات. كما أن هناك نظرية أخرى لميكانيكا انتقال الحرارة بالتوصيل, وهي أن التوصيل يحدث على مستوى الجزيئات نتيجة اندفاع الإلكترونات. وتكون هذه الإلكترونات الحرة مستقرة في المعدن و تحمل كلاً من الطاقة الحرارية والكهربائية. ونتيجة لهذا السبب, نجد أن المواد جيدة التوصيل للكهرباء تكون أيضا موصلة جيدة للطاقة الحرارية مثل الفضة والنحاس و... إلخ. ومن المهم ملاحظة أنه لا يوجد انتقال حقيقي للمواد في انتقال الحرارة بالتوصيل. ومن المعروف أن انتقال الحرارة بالتوصيل هو أحد أنواع انتقال الحرارة بالتسخين أو بالتبريد في الأجسام الصلبة المعتمة.

وإذا زاد فرق درجات الحرارة بين طرفي جسم فإن الحرارة سوف تنتقل من الجانب ذي درجة الحرارة الأعلى إلى الجانب ذي درجة الحرارة الأقل. ويتناسب معدل تدفق الحرارة بالتوصيل مع معدل اختلاف درجة الحرارة خلال الجسم ومع مساحة الجسم.

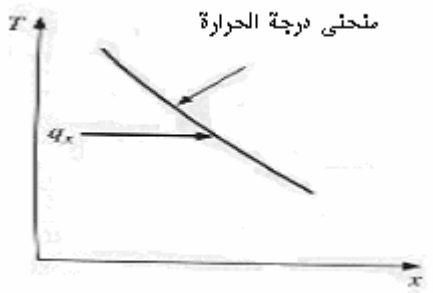
قانون فوريير للتوصيل الحراريFourier's Law Of Heat Transfer:

لقد وجد عملياً أن معدل انتقال الحرارة بالتوصيل يتناسب تناسباً طردياً مع الانحدار في درجة الحرارة بين جانبي جسم معين ومع مساحة ذلك الجسم وعكسياً مع سمك ذلك الجسم. ولقد تمكن الفيزيائي فوريير من استنتاج معادلة فيزيائية تحكم عملية انتقال الحرارة بالتوصيل والتي تنص على ما يلي:

$$q_k = -KA\frac{dT}{dx}$$

حيث أن T تمثل درجة الحرارة للجسمTemperature, و X تمثل سماكة الجسمThickness, و A تمثل مساحة الجسمArea, وثابت التناسب K يسمى بمعامل التوصيل الحراري للجسم أو الموصلية الحراريةThermal Conductivity.والموصلية الحرارية هي خاصية فيزيائية للجسم وتشير إلى مقدار أو كمية الحرارة التي يمكن أن تمر خلال وحدة الزمن عبر وحدة مساحة عندما يكون الفرق في درجات

الحرارة درجة واحدة. والمواد الموصلة جيداً للكهرباء موصلة جيدة للحرارة وكذلك الحال بالنسبة إلى العوازل(المواد العازلة جيداً للكهرباء عازلة جيداً للحرارة باستثناء الماس الذي هو عازل كهربائي وموصل كبير جداً للحرارة)وكلما زادت قيمة الموصلية الحرارية زادت قابليتها لإيصال الحرارة وكلما قلت قل تبعاً لذلك التوصيل الحراري. والإشارة السالبة في المعادلة هي للإشارة إلى أن اتجاه انسياب الحرارة يتم من درجة الحرارة الأعلى إلى درجة الحرارة الأدنى وهذا يتوافق مع القانون الثاني للديناميكا الحرارية فتستخدم الإشارة السالبة للحصول على قيمة موجبة لتدفق الحرارة. انظر الشكل(2- 1).



شكل(2- 1)توزيع درجة الحرارة على طول جدار سماكتهx.

والجدول (2- 1) يبين بعض القيم التقريبية للموصلية الحرارية لبعض المواد والمنتجات الغذائية التي يكثر استخدامها.

المادة	k (W/m K)	المادة	k (W/m K)
النحاس (موصل جيد)	400	الخشب	0.17
الألمنيوم	204	الزبدة	0.197
الأسبست (عازل)	0.2	الهواء	0.025
الزجاج	0.75	عصير التفاح	0.559
الماء	0.6	حليب منزوع الدسم	0.635
الصلب الذي لا يصدأ	24	الملح	0.247

الصوف الزجاجي	0.032	طحين القمح	0.689
الفريون12	0.073	صفار البيض	0.338

جدول(2- 1) الموصلية الحرارية لبعض المواد والمنتجات الغذائية.

ويمكن اشتقاق العلاقة التي تصف توزيع درجة الحرارة نتيجة للتوصيل عن طريق أخذ عنصر حجمي لنظام محاور كارتيزية وبمعادلة مجموع الحرارة المتدفقة إلى داخل العنصر خلال جزء معلوم من الزمن والحرارة المتولدة داخل العنصر خلال نفس الزمن إلى الحرارة المتدفقة خارج العنصر خلال نفس الجزء من الزمن مضافاً إليها التغير في الطاقة الداخلية في العنصر خلال الفترة الزمنية نفسها وبالتالي يمكن اشتقاق المعادلة التفاضلية الجزئية لانتقال الحرارة بالتوصيل ثلاثي الأبعاد في مادة صلبة ومتجانسة مع وجود تولد حراري داخلي. ويمكن تطبيق المعادلة السابقة على جدار مستو وذي سماكة محددة في حالة الاستقرار للوصول إلى المعادلة التالية:

$$q_K = \frac{KA}{L}(T_1 - T_2)$$

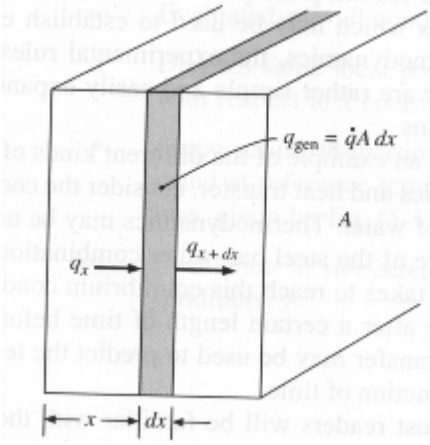
q_k = معدل انتقال الحرارة بالتوصيل باتجاه x (W).

k = معامل الانتقال الحراري بالتوصيل(W/m.k) أو(W/m °C) .

A = المساحة التي تنقل الحرارة من خلالها (m^2).

L = سمك الجسم الذي تنتقل الحرارة من خلاله(m) .

T = درجة الحرارة(C^0) .



شكل(2- 2)شريحة طولية تبين اتجاه تدفق الحرارة.

مثال(2- 1)

جدار مخزن تبريد طوله3.5m وعرضه1m ودرجة حرارة أحد أوجهه$25C^0$والوجه الآخر$3C^0$ فإذا كانت سماكته 7cm وعلمت أن الموصلية الحرارية للجدار هي0.9w/mk احسب كمية الحرارة المفقودة عبر الجدار

الحل:

نحسب مساحة الجدار $A=3.5*1=3.5m^2$

$$q_K = \frac{KA}{L}(T_1 - T_2)$$

$$q_K = \frac{0.9 * 3.5}{0.07}(25 - 3) = 990w$$

مثال(2- 2)

لوح زجاجي طوله 2m وعرضه65cm وسماكته 2mm يستخدم كغطاء في عرض بعض المنتجات الغذائية فإذا كانت الموصلية الحرارية للزجاج تساوي 0.78w/mk ودرجة حرارته من الداخل تساوي $2C^0$ ومن الخارج تساوي$18C^0$ احسب معدل الحرارة المفقودة من الزجاج .

الحل

نحسب المساحة كما في المثال السابق ولكن يجب التنبه إلى الوحدات حيث يلزمن التحويل

$$A = 2 * 0.65 = 1.3m^2$$

$$q_K = \frac{KA}{L}(T_1 - T_2)$$

$$q_K = \frac{0.78 * 1.3}{0.002}(18 - 2) = 811.2w$$

مثال(2- 3)

في المثال السابق احسب درجة الحرارة في منتصف اللوح الزجاجي .

الحل: من المثال السابق تم حساب معدل انتقال الحرارة في الزجاج وكانت تساوي 8112w وبتطبيق قانون فوريير على منتصف اللوح الزجاجي نجد :

$$q_K = \frac{KA}{L}(T_1 - T_2)$$

$$811.2 = \frac{0.78 * 1.3}{0.01}(18 - T_2)$$
$$18 - T_2 = \frac{811.2 * 0.01}{0.78 * 1.3}$$
$$18 - T_2 = 8$$
$$T_2 = 18 - 8 = 10C^0$$

التشابه بين آلية انتقال الحرارة وآلية سريان التيار الكهربائي: Analogy Between Heat Transfer And Electricity

في الكهرباء عندما يتوفر فرق في الجهد الكهربائي بين طرفي مقاومة كهربائية فإن ذلك يؤدي إلى سريان تيار كهربائي بين طرفي تلك المقاومة. وبمقارنة ذلك بما يحدث في حالة انتقال الحرارة بالتوصيل فإنه عندما يتوفر فرق في درجتي الحرارة على طرفي جدار ذي سمك محدد فإن ذلك يتسبب في انتقال حرارة بين طرفي الجدار.

$$R \approx R_t \qquad I \approx q \qquad \Delta V \approx \Delta T$$

وحسب قانون أوم في الكهرباء فإن شدة التيار الكهربائي يتناسب تناسباً طرديا مع الفرق في الجهد وعكسيا مع المقاومة الكهربائية ويتمثل في المعادلة التالية:

$$I = \frac{\Delta V}{R}$$

وبالتالي فإننا يمكن أن نعيد ترتيب معادلة فوريير للتوصيل الحراري على الشكل التالي:

$$R_t = \frac{\Delta T}{q_k}$$
$$q_k = \frac{\Delta T}{L/KA} = \frac{\Delta T}{R_t}$$

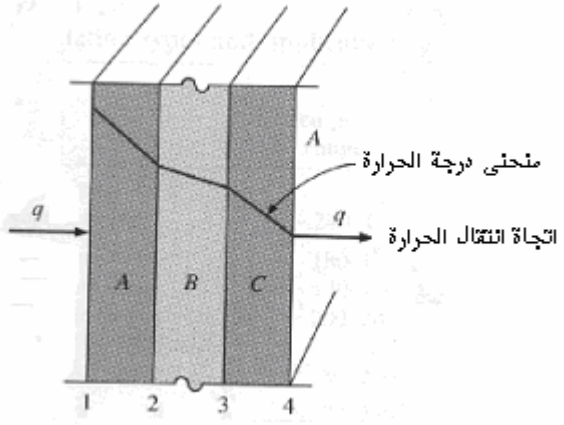
وهذا يعني أن : $R_t = \frac{L}{KA}$

وتسمى R_t بالمقاومة الحرارية Thermal Resistance وتعطى بوحدة (K/W) ونلاحظ التأثير للمقاومة الحرارية على المعادلة العامة لانتقال الحرارة حيث إن زيادة المقاومة الحرارية تؤدي إلى خفض الحرارة المنتقلة. وزيادة المقاومة الحرارية ستنشأ فقط نتيجة لزيادة سمك الجدار للمادة أو نتيجة انخفاض في معامل التوصيل الحراري لها. وبالتالي فإن المواد ذات الموصلية الحرارية المنخفضة مفيدة كعوازل لحفظها الحرارة. وعادة ما يتم التعبير عن قيمة العزل للمواد كقيمة للمقاومة.ومن خلال مفهوم المقاومة الحرارية يمكن التنبؤ بمعدلات انتقال الحرارة في أسطح مركبة متكونة من أكثر من مادة على اعتبار أن درجة الحرارة بين طرفي تلك الأسطح معروفة وأن سماكة كل طبقة محددة.

انتقال الحرارة بالتوصيل عبر الجدران المركبة Conduction Heat Transfer Through Composite Wall

في حالة توفر جدار مكون من أكثر من مادة كما في الشكل (2- 3)حيث يتكون الجدار من ثلاث طبقات فإن معدل انتقال الحرارة بالتوصيل عبر الجدار يعطى بدلالة مجموع المقاومات الحرارية والفرق في درجة الحرارة بين طرفي الجدار.وتعطى المقاومة الحرارية لكل طبقة من الطبقات بالمعادلات التالية:

$$R_C = \frac{L_C}{K_C A_C} \qquad R_B = \frac{L_B}{K_B A_B} \qquad R_A = \frac{L_A}{K_A A_A}$$



شكل(2- 3)جدار مركب مكون من ثلاث طبقات.

ويكون معدل الفقد الحراري عبر كل طبقة من الطبقات على حدة معطى بالمعادلات التالية:

$$q_{KA} = \frac{K_A A_A}{L_A}(T_1 - T_2)$$
$$q_{KB} = \frac{K_B A_B}{L_B}(T_2 - T_3)$$
$$q_{KC} = \frac{K_C A_C}{L_C}(T_3 - T_4)$$

وحيث أن معدل الفقد الحراري ثابت عبر جميع الطبقات لأن النظام مستقر فإن جميع هذه المعادلات تعطي نفس القيمة من الفقد الحراري.

$$q_{KA} = q_{KB} = q_{KC}$$

أما عبر الجدار فيكون معدل الفقد الحراري مساوياً ل:

$$q_k = \frac{\Delta T}{\sum R_t} = \frac{\Delta T}{R_A + R_B + R_C} = \frac{T_1 - T_4}{\frac{L_A}{K_A A_A} + \frac{L_B}{K_B A_B} + \frac{L_C}{K_C A_C}}$$

وفي الكثير من الحالات لا تكون المساحة جزء مهم من عملية التصميم أو قد لا تعطى في الأصل وبالتالي يمكن حساب معدل الفقد الحراري عبر الجدار لكل وحدة مساحة. وعلى فرض أن المساحة متساوية في جميع الطبقات فإن المعادلة السابقة تصبح كما يلي:

$$\frac{q_k}{A} = \frac{\Delta T}{\sum R_t} = \frac{\Delta T}{R_A + R_B + R_C} = \frac{T_1 - T_4}{\frac{L_A}{K_A} + \frac{L_B}{K_B} + \frac{L_C}{K_C}}$$

مثال(2- 4)

فرن تجفيف مصنوع من صلب مطاوع سمكه 5cm ومعزول بمغنسيا سمكها25mm احسب معدل انتقال الحرارة عبر الجدران لكل وحدة مساحة, إذا كانت درجة حرارة الفرن$60C^0$ و درجة حرارة الغرفة $20C^0$ علماً بأن معامل التوصيل الحراري للصلب المطاوع 45 W/mK ومعامل التوصيل الحراري للمغنسيا (0.06 W/mK) ومن ثم احسب درجة الحرارة بين الطبقتين .

الحل

نلاحظ أن الجدار مكون من طبقتين وبالتالي يكون قانون فوريير كما يلي:

$$\frac{q_k}{A} = \frac{\Delta T}{\sum R_t} = \frac{\Delta T}{R_A + R_B} = \frac{T_1 - T_3}{\frac{L_A}{K_A} + \frac{L_B}{K_B}}$$

$$\frac{q_k}{A} == \frac{60 - 20}{\frac{0.05}{45} + \frac{0.025}{0.06}} = \frac{40}{0.0011 + 0.417} = 95.75\ w/m^2$$

ولحساب درجة الحرارة بين الطبقتين نستخدم قانون فوريير عبر الجدار البسيط

$$\frac{q_K}{A} = \frac{K}{L}(T_1 - T_2)$$

$$95.75 = \frac{45}{0.05}(60 - T_2)$$

$$0.11 = \frac{95.75 * 0.05}{45} = (60 - T_2)$$

$$0.11 = \frac{95.75 * 0.05}{45} = (60 - T_2)$$

$$T_2 = 60 - 0.11 = 59.89$$

مثال(2- 5)

لوح زجاجي طوله 40cm وعرضه 12cm مكون من طبقتين سماكة كل منها 3mm ويفصل بينهما بطبقة من السلك المقوى سماكتها 2.5mm فإذا كانت درجة حرارة الزجاج من الداخل $20C^0$ ومن الخارج $1C^0$- وكانت الموصلية الحرارية للزجاج 0.8w/mk وللسلك 50w/mk احسب معدل انتقال الحرارة من اللوح الزجاجي(معدل الفقد الحراري عبر الزجاج) .

الحل

نحسب مساحة الزجاج وهي تساوي $A=0.4x0.12=0.48m^2$ ونلاحظ أن الجدار مكون من ثلاث طبقات وبالتالي يكون معدل الفقد الحراري عبر الزجاج كالتالي:

$$q_k = \frac{\Delta T}{\sum R_t} = \frac{\Delta T}{R_A + R_B + R_C} = \frac{T_1 - T_4}{\frac{L_A}{K_A A_A} + \frac{L_B}{K_B A_B} + \frac{L_C}{K_C A_C}}$$

$$q_k = \frac{20 - -1}{\frac{0.003}{0.8 * 0.48} + \frac{0.0025}{50 * 0.48} + \frac{0.003}{0.8 * 0.48}} = \frac{21}{0.01573} = 1335 .1w$$

انتقال الحرارة بالتوصيل عبر الأنابيب والمواسير Heat Transfer Through Hollow Pipes:

في كثير من الأحيان يكون هناك فرق في درجة حرارة الأنابيب بين داخل الأنبوب وخارجه. وهذا الفرق في درجة الحرارة يؤدي إلى حدوث نقل للطاقة الحرارية من المنطقة ذات الحرارة العالية إلى المنخفضة. وبما أن جسم الأنبوب مصنوع من مادة صلبة كالزجاج أو المعدن أو حتى من الطوب فإن آلية ذلك الفقد الحراري تكون بالتوصيل الحراري. ويكون الفقد الحراري في الأنابيب باتجاه عمودي على مساحة سطح الأنبوبة.فإذا كانت درجة الحرارة للأنبوب في الداخل والخارج ثابتة(نظام مستقر) فإننا نستطيع بتطبيق معادلة فوريير وبإجراء تكامل باتجاه نصف قطر الأنبوبة فإننا سنصل إلى المعادلة التالية والتي تمثل معدل الفقد الحراري من الأنبوبة:

$$q_k = \frac{2\pi KL}{\ln \frac{r_0}{r_i}} (T_i - T_0)$$

حيث أن: T_i درجة حرارة سطح الأنبوب من الداخل.

T_0 درجة حرارة سطح الأنبوب من الخارج.

K الموصلية الحرارية لمادة الأنبوب.

L طول الأنبوب.

r_o نصف قطر الأنبوب من الخارج.

r_i نصف قطر الأنبوب من الداخل.

ومن المعادلة السابقة وبمقارنتها بالمعادلات السابقة مع إعادة ترتيبها نستنتج أن المقاومة الحرارية في حالة انتقال الحرارة بالتوصيل عبر الأنابيب والمواسير تعطى بالمعادلة التالية:

$$q_k = \frac{\Delta T}{R_t} = \frac{\Delta T}{\left(\ln \frac{r_0}{r_i} \Big/ 2\pi KL \right)}$$

$$R_t = \frac{\Delta T}{q_k} = \frac{\ln \frac{r_0}{r_i}}{2\pi KL}$$

مثال(2- 6)

أنبوب من الألمنيوم قطره الخارجي 10cm وقطرة الداخلي7cm وطوله 20m وموصليته الحرارية200w/mk.إذا كانت درجة حرارة سطح الأنبوب من الداخل $43C^0$ ومن الخارج $29C^0$. احسب معدل الفقد الحراري(انتقال الحرارة بالتوصيل)عبر الأنبوب .

الحل

أولاً نجد نصف الداخلي $r_i=D_i/2=7/2=3.5cm$ وكذلك الخارجي$r_0=D_0/2=10/2=5cm$.

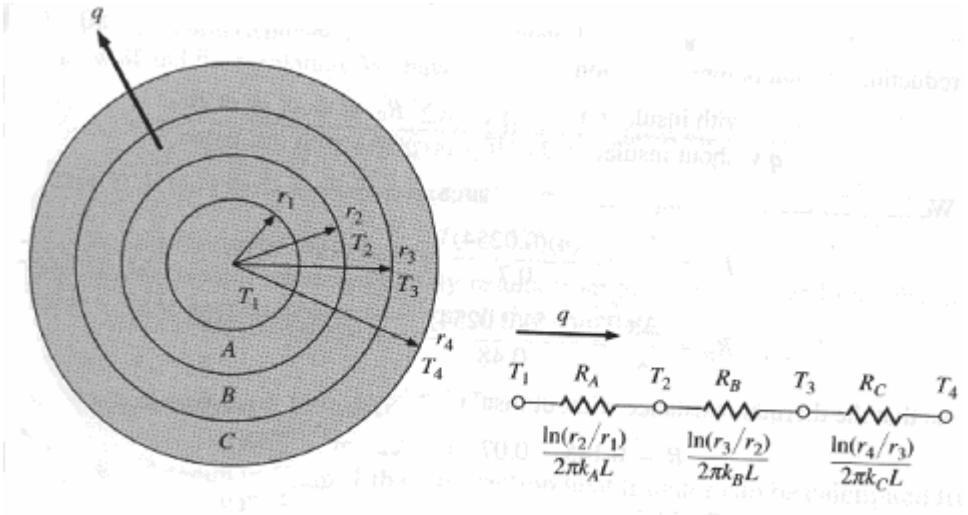
$$q_k = \frac{2\pi KL}{\ln \frac{r_0}{r_i}} (T_i - T_0)$$

$$q_k = \frac{2\pi X 200 X 20}{\ln \frac{5}{3.5}} (43 - 29)$$

$$q_k = \frac{2\pi X 200 X 2}{\ln \frac{5}{3.5}} (43 - 29) = 98599.58w$$

انتقال الحرارة بالتوصيل عبر الأنابيب والمواسير المركبة Conduction Heat Transfer Through Composite Cylinders:

في بعض الأحيان يكون الأنبوب أو الماسورة مصنوعة من أكثر من مادة أو قد يتم استخدام مادة عازلة مثلا حول الماسورة وبالتالي يكون الأنبوب في هذه الحالة أنبوباً مركباً. وبمعلومية المقاومة الحرارية للتوصيل الحراري عبر الأنبوب يمكن تطوير المعادلة السابقة لتصبح للأنابيب المركبة كمايلي:



شكل(2- 4)جدار أسطواني مركب مكون من ثلاث طبقات.

$$q_k = \frac{\Delta T}{\sum R_t} = \frac{\Delta T}{R_1 + R_2 + R_3} = \frac{T_1 - T_4}{\frac{\ln \frac{r_2}{r_1}}{2\pi K_1 L_1} + \frac{\ln \frac{r_3}{r_2}}{2\pi K_2 L_2} + \frac{\ln \frac{r_4}{r_3}}{2\pi K_3 L_3}}$$

وحيث أن طول الأنبوب متساو فإن المعادلة السابقة تصبح كمايلي:

$$q_k = \frac{\Delta T}{\sum R_t} = \frac{\Delta T}{R_1 + R_2 + R_3} = \frac{\Delta T}{\frac{\ln \frac{r_2}{r_1}}{2\pi K_1 L} + \frac{\ln \frac{r_3}{r_2}}{2\pi K_2 L} + \frac{\ln \frac{r_4}{r_3}}{2\pi K_3 L}}$$

ويمكن أيضا حساب معدل انتقال الحرارة عبر الأنبوب المركب لكل وحدة طول كما يلي:

$$q_k/L = \frac{\Delta T}{\sum R_t} = \frac{\Delta T}{R_1 + R_2 + R_3} = \frac{\Delta T}{\frac{\ln \frac{r_2}{r_1}}{2\pi K_1} + \frac{\ln \frac{r_3}{r_2}}{2\pi K_2} + \frac{\ln \frac{r_4}{r_3}}{2\pi K_3}}$$

مثال(2- 7)

أنبوب من إستانلس إستيل Stainless Steel قطره الداخلي10cm وسماكته2.5cm وموصليته الحرارية65w/mk مغطى بطبقة من العازل سماكتها5cm وموصليتها الحرارية0.1w/mk. فإذا كانت درجة حرارة سطح الأنبوب من الداخل $39C^0$ ومن الخارج $30C^0$. احسب معدل الفقد الحراري عبر الأنبوب لكل وحدة طول .

الحل

نحسب أنصاف الأقطار حيث أن: $r_1 = D_1/2 = 10/2 = 5cm$. أما r_2 فإنه يساوي r_1 مظافاً إليه سماكة الأنبوب فيكون $r_2 = 5+2.5=7.5cm$. وكذلك $r_3=7.5+5 =12.5cm$.

$$q_k/L = \frac{\Delta T}{\sum R_t} = \frac{\Delta T}{R_1 + R_2} = \frac{\Delta T}{\frac{\ln \frac{r_2}{r_1}}{2\pi K_1} + \frac{\ln \frac{r_3}{r_2}}{2\pi K_2}}$$

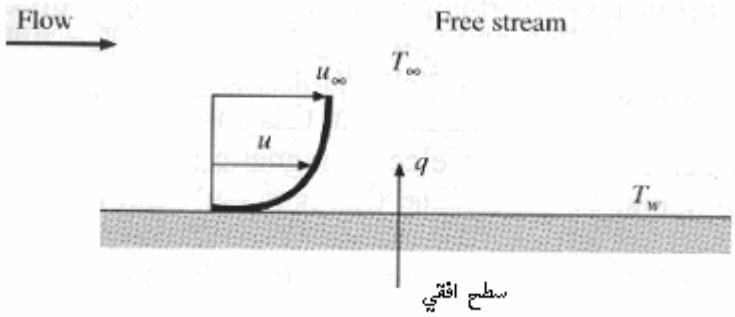
$$q_k/L = \frac{\Delta T}{R_1 + R_2} = \frac{39 - 30}{\frac{\ln \frac{7.5}{5}}{2\pi X 65} + \frac{\ln \frac{12.5}{7.5}}{2\pi X 0.1}}$$

$$q_k/L = \frac{9}{9.93X10^{-4} + 0.81342} = 11.05 \frac{w}{m}$$

2. انتقال الحرارة بالحمل Convection Heat Transfer:

الحمل هو انتقال الحرارة من جزء من المائع إلى جزء آخر منه أو من سطح جسم صلب إلى مائع يلاصق هذا السطح بواسطة حركة جزيئات المائع. وفي هذا الأسلوب من انتقال الحرارة يتم انتقال الطاقة بصورة تجمع بين توصيل الحرارة وتخزين الطاقة وفعل الخلط. ومن الأمثلة على انتقال الحرارة بالحمل انتقال الحرارة لمنتج في مبادل حراري أنبوبي. حيث تنتقل الحرارة من جدران المبادل إلى المائع عن طريق التوصيل وتخزين الطاقة وفعل الخلط للمنتج المائع.وكذلك من الأمثلة عند تبريد منتج ما بواسطة مروحة أو مجرى مائي.

وعادة ما يحدث هذا النوع من انتقال الحرارة في الموائع ولذلك فإن معدل انتقال الحرارة من سطح ما إلى المائع يعتمد على خواص السريان للمائع بالإضافة إلى الخواص الحرارية له.فكلما كانت حركة المائع سريعة فإن معدل حدوث التبادل الحراري بالحمل يكون أعلى وسرعة حدوث التبادل اقل.وتتم عملية انتقال الحرارة بحيث أنه عندما يكون تماس بين مائع وجسم صلب مع توفر فرق في درجة الحرارة بينهما فإن جزيئات المائع القريبة جداً من السطح تأخذ جزءاً من حرارة السطح بالتوصيل وبزيادة درجة حرارة المائع فإن كثافته تقل فيحل مكان ذلك الجزء جزء آخر من المائع بصورة تلقائية محدثاً حركة لجزيئات المائع وهكذا تستمر العملية إلى أن يتم التبادل الحراري نهائيا . ويبين الشكل(2- 5) انحدار الحرارة الذي سينشأ عند تعريض سطح جدار ساخن لمائع حيث تتغير درجة الحرارة من درجة حرارة الجدار(T_s) إلى درجة حرارة التيار (T_∞) وتعرف هذه العملية بالطبقة الحرارية الحدية. وهناك نوعان من انتقال الحرارة عن طريق الحمل وهما :



شكل(2- 5)انتقال الحرارة بالحمل من سطح أفقي إلى مائع.

1. انتقال الحرارة بالحمل الحر Free Convection Heat Transfer :

وفي هذا النوع من أنواع الانتقال الحراري فإن القوة المسيرة لحركة المائع هي قوة تيارات الحمل أو ما تسمى بقوة الطفو وتعتمد هذه القوة على الفرق في كثافة أجزاء المائع. فمثلاً لو وضعنا قطعة معدنية ساخنة في غرفة وتركناها تبرد فإن أجزاء الهواء الملامسة لسطح القطعة تسخن فتقل كثافتها مما يؤدي إلى تحركها إلى أعلى ليحل محلها جزيئات أبرد وتستمر العملية بهذه الآلية دون وجود أي مصدر لقوة خارجة تؤثر على حركة المائع.

2. انتقال الحرارة بالحمل القسري .Forced Convection Heat Transfer:

وفي هذا النوع تكون هناك قوة خارجية مؤثرة لزيادة سرعة المائع كمروحة أو مجرى مائي.وانتقال الحرارة بالحمل القسري أكثر كفاءة ويتم بزمن أقل كما أنه يمكننا من خلاله التحكم بالسرعة للمائع وبالتالي الحصول على المعدلات المرغوبة من التبادل الحراري.

والمعادلة الأساسية التي تصف انتقال الحرارة بواسطة الحمل هي قانون نيوتن للتبريد والتي تعطى كمايلي:

$$q_c = h_c A(T_s - T_{f,\infty})$$

حيث أن :

q_c : معدل انتقال الحرارة بالحمل.w

A : المساحة التي يتم انتقال الحرارة بالحمل من خلالها.m^2

h_c : متوسط معامل انتقال الحرارة بالحمل بين المائع والسطح. ويعطى بوحدة W/m^2k.

T_s : درجة حرارة السطح.C^0

T_f : درجة حرارة المائع بعيدا عن السطح.C^0

و يعتمد معامل انتقال الحرارة بالحمل على خصائص سريان المائع والخواص الحرارية له. ويمكن تحديد قيمته بالطرق العددية ولكن بصورة تقريبية والجدول التالي يبين بعض القيم له.

نوع الحمل للمائع	hc (w/m^2k)
حمل حر للهواء	25-5
حمل حر للماء	100-20
حمل قسري للهواء	200-10
حمل قسري للماء	10000-50
ماء يغلي	100000-300
بخار ماء متكثف	100000-5000

جدول(2- 2)معامل انتقال الحرارة بالحمل لبعض حالات الموائع.

ويمكن إعادة كتابة معادلة نيوتن للتبريد بصورة أخرى كمايلي:

$$q_c = \frac{\Delta T}{1/h_c A}$$

ومن ذلك يتبين لنا أن المقاومة الحرارية في حالة انتقال الحرارة بالحمل تعطى بالمعادلة التالية:

$$R_c = \frac{1}{h_c A}$$

مثال(2- 8)

سطح أفقي طوله2m وعرضه1m ودرجة حرارة سطحه$29C^0$ يتحرك عليه ماء درجة حرارته$79C^0$.إذا علمت أن متوسط معامل انتقال الحرارة بالحمل بين الماء واللوح $120w/m^2k$. احسب معدل الفقد الحراري بالحمل من الماء .

الحل:

نحسب المساحة أولاً $A=2*1=2m^2$.

$$q_c = h_c A\left(T_s - T_{f,\infty}\right)$$

$$q_c = 120 * 2 * (29 - 79) = -12000w$$

والإشارة سالبة وذلك لأن الفقد الحراري تم من الماء إلى اللوح.

مثال(2- 9)

أنبوب من الألمنيوم قطره الداخلي10cmوطوله2.5m ودرجة حرارة سطحه$30C^0$ يستخدم لنقل حليب درجة حرارته$62C^0$ إذا علمت أن معدل الحرارة المفقودة من الحليب إلى الأنبوب4500w احسب متوسط معامل انتقال الحرارة بالحمل بين الحليب والأنبوب .

الحل: نحسب المساحة السطحية للأنبوب من الداخل كما يلي:

$$A = 2\pi rL = 2\pi * 0.05 * 2.5 = 0.785m^2$$

$$4500 = h_c * 0.785 * (62 - 30) \Rightarrow h_c = \frac{4500}{0.785 * 32} = 179.2\frac{w}{m^2k}$$

انتقال الحرارة المختلط Combined Heat Transfer:

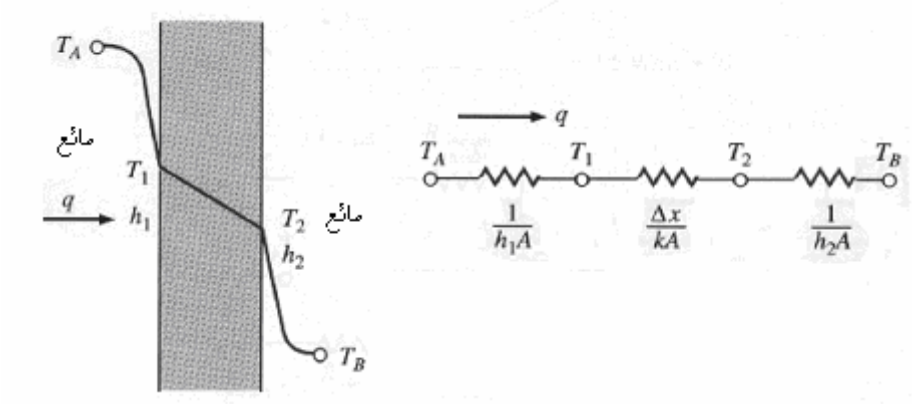
في الكثير من التطبيقات العملية فإن الحرارة تنتقل بأكثر من آلية من الآليات لانتقال الحرارة في آن واحد ومن ذلك مثلاً وجود سطح له سماكة محددة ويحيط به من الداخل والخارج مائع كالهواء أو غيره فتنتقل الحرارة من المائع الساخن إلى السطح بالحمل ومن ثم تنتقل الحرارة إلى الطرف الآخر للسطح عن

طريق التوصيل ويلاحظ أنه عندما يكون النظام مستقرا فإن معدل انتقال الحرارة بالحمل يساوي نفس المقدار من التوصيل.

انتقال الحرارة المختلط عبر الجدار:

إن معدل انتقال الحرارة عبر الجدار المكون من أكثر من طبقة والمحتوي على أكثر من آلية من آليات النقل الحراري يعطى بالمعادلة التالية:

$$q = \frac{T_1 - T_4}{\frac{1}{h_1 A} + \frac{L_1}{K_1 A_1} + \frac{1}{h_2 A}}$$



شكل(2- 6)جدار يحيط به مائعان من كلا الجهتين.

مثال(2- 10)

براد يتكون جداره من طبقة من البلاستيك سماكتها (0.5cm) وموصليتها الحرارية(12w/mk) وطبقة أخرى من العازل سماكتها(2.3cm) وموصليتها الحرارية(0.24w/mk) يحيط به هواء من الخارج درجة حرارته ($49.5C^o$) وبداخله سائل درجة حرارته ($-10.3C^o$) إذا علمت أن معامل انتقال الحرارة بالحمل بين السائل والسطح الداخلي للبراد يساوي($100.2w/m^2k$) وبين الهواء والسطح الخارجي للبراد يساوي ($73.5w/m^2k$) احسب الفقد الحراري عبر جدار البراد بالنسبة إلى وحدة المساحة .

الحل:

نلاحظ أن: هناك مقاومتين حراريتين للتوصيل مقدار كل منهما

$$R_t = \frac{L}{KA}$$

ومقاومتين بالحمل وهما:

$$R_c = \frac{1}{h_c A}$$

وبالتالي تصبح معادلة انتقال الحرارة المختلط كما يلي:

$$q = \frac{T_1 - T_5}{\frac{1}{h_1 A} + \frac{L_1}{K_1 A_1} + \frac{L_2}{K_2 A_2} + \frac{1}{h_2 A}}$$

$$\frac{q}{A} = \frac{T_1 - T_5}{\frac{1}{h_1} + \frac{L_1}{K_1} + \frac{L_2}{K_2} + \frac{1}{h_2}}$$

$$\frac{q}{A} = \frac{49.5 - -10.3}{\frac{1}{100.2} + \frac{0.005}{12} + \frac{0.023}{0.24} + \frac{1}{73.5}}$$

انتقال الحرارة المختلط عبر الأنابيب:

في كثير من التطبيقات العملية يتم نقل المواد من مكان لآخر عبر أنابيب ونظرا لاختلاف درجات الحرارة بين سطح الأنبوب والمادة المنقولة فإنه يتم تسريب أو انتقال للحرارة من أو إلى الأنبوب وبالتالي تتغير درجة حرارة المنظومة ويعطى معدل الفقد الحراري في هذه الحالة بالمعادلة التالية:

$$q = \frac{T_1 - T_2}{\frac{1}{2\pi h_1 r_1 L} + \frac{\ln\frac{r_2}{r_1}}{2\pi K_1 L} + \frac{\ln\frac{r_3}{r_2}}{2\pi K_2 L} + \frac{1}{2\pi h_2 r_2 L}}$$

مثال(2- 11)

أنبوب من البلاستيك يستخدم لنقل العصير قطره الداخلي يساوي(10cm) وسماكته تساوي (2cm) مغطى بطبقة من العازل سماكتها(8cm) إذا علمت أن درجة حرارة العصير داخل الأنبوب تساوي ($89C^0$) ودرجة حرارة السطح الخارجي للعازل تساوي($12C^o$). احسب معدل الفقد الحراري من الأنبوب إذا علمت أن الموصلية الحرارية للبلاستيك (14.5w/mk) وللعازل (0.067w/mk) ومتوسط معامل انتقال الحرارة بالحمل بين الأنبوب والعصير تساوي($125w/m^2K$) علما بأن طول الأنبوب يساوي 10m.

الحل:

نلاحظ أن: هناك مقاومتين حراريتين للتوصيل مقدار كل منهما:

$$R_k = \frac{\ln \frac{r_0}{r_i}}{2\pi KL}$$

ومقاومة حرارية بالحمل وهي بين العصير والسطح الداخلي للأنبوب:

$$R_c = \frac{1}{h_c A} = \frac{1}{2\pi r h_c L}$$

$$q = \frac{T_1 - T_2}{\frac{1}{2\pi h_1 r_1 L} + \frac{\ln \frac{r_2}{r_1}}{2\pi K_1 L} + \frac{\ln \frac{r_3}{r_2}}{2\pi K_2 L}}$$

$$q = \frac{89 - 12}{\frac{1}{2\pi x 125 x 0.05 x 10} + \frac{\ln \frac{7}{5}}{2\pi x 14.5 x 10} + \frac{\ln \frac{15}{7}}{2\pi x 0.067 x 10}}$$

والجدول التالي يبين ملخصاً لقيم المقاومات الحرارية سواء كانت بالحمل أو التوصيل:

آلية انتقال الحرارة	معدل الانتقال الحراري	المقاومة الحرارية
التوصيل الحراري عبر الجدار البسيط	$q = \frac{KA(T_1 - T_2)}{L}$	$R_t = \frac{L}{KA}$
التوصيل الحراري عبر أسطوانة أو أنبوب	$q = \frac{2\pi KL}{\ln r_0 / r_i}(T_i - T_0)$	$R_t = \frac{\ln r_0 / r_i}{2\pi KL}$
الحمل الحراري حول سطح مستو	$q = h_c A(T_s - T_{f,\infty})$	$R_t = \frac{1}{h_c A}$
الحمل الحراري حول أنبوب أو أسطوانة	$q = h_c A(T_s - T_{f,\infty})$	$R_t = \frac{1}{2\pi h_c r L}$
المعادلة الأساسية في حالة وجود أكثر من مقاومة حرارية		$q = \frac{\Delta T}{\sum R_t}$

جدول(2- 3) أنواع المقاومات الحرارية حسب آلية انتقال الحرارة.

معامل انتقال الحرارة الكلي Overall Heat Transfer Coefficient:

في حالة انتقال الحرارة بين مائعين غازيين أو سائلين مفصولين بجدار مستو قمنا وبواسطة مفهوم المقاومة الحرارية بحساب معدل انسياب الحرارة عبر الجدار المركب.حيث تم التعبير عن معدل انتقال الحرارة بدلالة درجة حرارة الوضع الإجمالية وخصائص انتقال الحرارة للمقاطع الفردية في مسار انسياب الحرارة بالمعادلة التالية:

$$q = \frac{T_1 - T_4}{\frac{1}{h_1 A} + \frac{L_1}{K_1 A_1} + \frac{1}{h_2 A}}$$

وبالتالي نتبين أهمية كل مقاومة حرارية بصورة فردية في عملية النقل الحراري. إلا أنها وفي بعض الحالات تكون هناك قيمة قليلة يمكن إهمالها من هذه المقاومات الحرارية كما أنه يمكن تبسيط كتابة المعادلة الكلية بإدخال قيمة تقريبية تسمى معامل انتقال الحرارة الكليU. وبوجود هذا المعامل الحراري فإن معدل الفقد الحراري يعطى بالمعادلة التالية:

$$q = UA\Delta T_{total}$$

$$UA = \frac{1}{R_1 + R_2 + R_3} = \frac{1}{\frac{1}{h_1 A} + \frac{L_1}{K_1 A_1} + \frac{1}{h_2 A}}$$

$$\frac{1}{UA} = R_1 + R_2 + R_3 = \frac{1}{h_1 A} + \frac{L_1}{K_1 A_1} + \frac{1}{h_2 A}$$

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{h_1} + \frac{L_1}{K_1} + \frac{1}{h_2}$$

وبالتالي يمكن حساب معامل انتقال الحرارة الكلي على أساس أية مساحة يتم اختيارها. وهذا له أهمية كبرى وخاصة في حالة انتقال الحرارة خلال جدران الأنابيب في المبادلات الحرارية.

3. **انتقال الحرارة بالإشعاع**Radiation Heat Transfer:

يتطلب حدوث انتقال الحرارة بالتوصيل والحمل وجود وسط مادي يعمل كوسيلة انتقال.ففي التوصيل الحراري يتم انتقال الحرارة عن طريق الذبذبات وحركة الإلكترونات الحرة وفي الحمل فإن

حركة المائع بالإضافة إلى حركة الجزيئات تساهم في نقل الحرارة إلا أن الإشعاع الحراري هو ذلك الانبعاث الكهرومغناطيسي الذي ينبعث من الجسم دون الحاجة إلى وسيط لحدوث ذلك الانتقال.

ومن المعلوم أن جميع الأجسام تشع طاقة حرارية تسمى بطاقة الطيف كنتيجة لدرجة حرارة الجسم. وتتساوى جميع الأجسام التي تزيد درجة حرارتها عن الصفر المطلق في خاصية القدرة على الإشعاع.وهناك أنواع كثيرة من الإشعاعات الكهرومغناطيسية كأشعة إكس والأشعة السينية والأشعة تحت الحمراء والأشعة فوق البنفسجية . والإشعاع الحراري واحد منها وما يميز الإشعاعات بغض النظر عن مصدرها هو أنها تسير بخطوط مستقيمة وبسرعة مساوية لسرعة الضوء C=300000Km/sec وهذه السرعة تساوي حاصل ضرب الطول الموجي بالتردد:

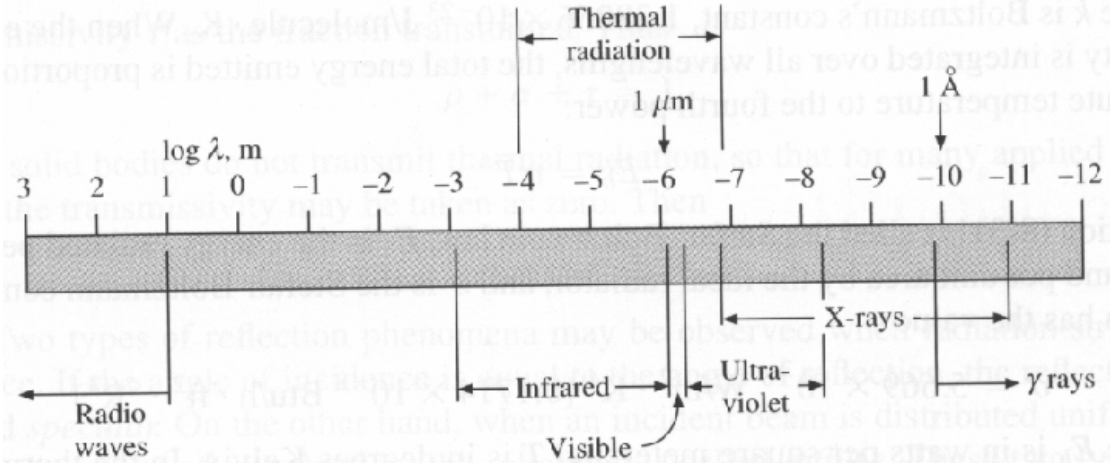
$$c = \lambda \nu$$

حيث أن c = سرعة الضوء.

λ= الطول الموجي. ووحدتها m أو A^0 انجستروم.

ν = التردد. ويقاس بالهيرتز.

والإشعاع الحراري لا يحتاج إلى وسيط مادي لنقله وحدوثه بل يحدث في الفراغ. كما أنه يمكن أن يمر من خلال أجسام درجة حرارتها أقل من الأجسام المتبادلة لدرجة الحرارة. ويبين الشكل(2- 7) الطيف الكهرومغناطيسي. والجزء المتعلق بالإشعاع الحراري يقع بين المدى الموجي 0.1-100μm بينما الجزء المرئي من الضوء فيقع بين 0.35-0.75μm.



شكل(2- 7)الطيف الضوئي

ويكون الإشعاع الحراري على شكل فوتونات تتحرك بسرعة الضوء وكل فوتون يعطي طاقة معينة حسب معادلة بلانك:

$$E = h\nu$$

حيث أن h = ثابت بلانك وتساوي قيمته 6.625×10^{-34} J.s.

وتصنف ظواهر الإشعاع عادة بالطول الموجي. ويعتمد الطول الموجي على كيفية إنتاج الإشعاع. ويعرف الإشعاع الحراري على أنه الطاقة المبتعثة من وسط بتأثير درجة حرارته. ويعتمد التوزيع الطيفي على درجة الحرارة وخصائص السطح للجسم المشع. ومن المعلوم أن الشمس والتي تقدر درجة حرارة سطحها بـ $5800K^0$ تشع معظم طاقتها على مدى موجي يساوي $3\mu m$. في حين أن الأرض والتي درجة حرارتها حوالي $290K^0$تشع حرارتها عند أمواج أطول من تلك التي تشعها الشمس. وهذا الفرق في الطول الموجي أوجد ما يسمى بظاهرة البيت الزجاجي.والتي تتمثل بأن الإشعاع الحراري الساقط على البيت الزجاجي يكون ذا طول موجي قليل له القدرة على النفاذ من خلال البيت الزجاجي لارتفاع طاقته. وعندما يصطدم بالموجودات داخل البيت الزجاجي فإنه يفقد جزء من طاقته وبالتالي فإنه ينتقل إلى طول موجي أعلى وبالتالي لا تكون له القدرة على النفاذ من خلال الزجاج.

إشعاع الجسم الأسود Black Body Radiation:

إن الجسم الأسود أو ما يسمى بالمشع المثالي هو الجسم الذي يبعث أو يمتص عند أي درجة حرارة أكبر مقدار من الإشعاع عند أي طول موجي مقارنة مع بقية الأجسام والجسم الأسود نادراً ما نجده إلا أن فكرته توفر لنا مرجعاً تتم على أساسه مقارنة البث الإشعاعي للأجسام. ويعتبر السناج أو الكاربوراندم والبلاتين الأسود أمثلة حقيقية على الجسم الأسود..ويمكن تقريب الجسم الأسود على أنه تجويف كروي درجة حرارة سطحه الداخلية ثابتة. حيث يدخل الشعاع إلى داخل التجويف فيمتص جزء منه ومن ثم ينعكس الجزء الآخر على الأسطح الداخلية لأكثر من مرة فاقداً جزءاً من طاقته في كل مرة حتى يصبح هذا الشعاع ضعيفاً جداً ويمكن إهمال باقي طاقته.

خواص الإشعاع Radiation Properties:

إن معظم الأسطح التي تواجهنا في الحياة العملية ليست بالأجسام السوداء ولذلك يجب تمييز الإشعاع لهذه الأسطح ببعض الخواص الإشعاعية مثل النفاذيةTransmissivity τ والامتصاصية Absorptivity α والابتعاثية Reflectivity ρ.وكلها تعتمد على الطول الموجي ودرجة الحرارة والاتجاه. وبمعرفة الخواص الطيفية(تلك التي تعتمد على الطول الموجي) والخواص الاتجاهية ينتج

عندنا ما يسمى بالخواص الكلية. هذه الخواص الكلية تصف إلى حد كبير الإشعاع الحراري بشكل دقيق.

فعند سقوط إشعاع حراري على سطح معين فإن جزء من طاقة هذا الإشعاع يتم امتصاصها وجزء آخر يتم انعكاسه والجزء الأخير ينفذ من خلال السطح.

$$\alpha + \tau + \rho = 1$$

وعندما يكون السطح معتماً فإنه لا يسمح بنفاذ أي شيء من الإشعاع الحراري وبالتالي يكون:

$$\alpha + \rho = 1$$

أما إذا كان السطح عاكسا مثالياً فإن ρ تساوي 1 وتكون النفاذية والامتصاصية تساوي0.0 ومعظم الغازات تكون لها τ تساوي 1.وللجسم الأسود فإن αتساوي1.

وأهم الخواص الإشعاعية على الإطلاق هي خاصية الانبعاثية ε والتي تعرف على أنها الإشعاع الكلي المبتعث من الجسم الحقيقي مقسوماً على الإشعاع الكلي الذي ينبعث من الجسم الأسود عند نفس درجة الحرارة. وتتراوح قيمة الانبعاثية بين الصفر والواحد وتساوي 1 للجسم الأسود المثالي. وكمية الطاقة الحرارية التي تغادر السطح على شكل إشعاع حراري تعتمد على درجة حرارة الجسم المطلقة وعلى طبيعة ذلك السطح. بينما لا يعتمد معدل ابتعاث الحرارة إشعاعياً على ظروف المحيط. ويحتاج الانتقال الصافي للحرارة الإشعاعية فرقاً في درجة حرارة السطح لأي جسمين يحدث بينهما تبادل حراري. وتعطى قدرة الجسم المثالي (الأسود) على الإشعاع الحراري حسب معادلة ستيفان وبولتزمان التالية:

$$E_b = q_r = \sigma A T^4$$

حيث أن:

q_r :معدل الفقد أو الامتصاص الحراري بالإشعاع وتعطى بوحدة الواطw.

σ ثابت ستيفان وبولتزمان ويساوي$5.67X10^{-8}w/m^2k^4$

A مساحة السطح المشع m^2.

T^4القوة الرابعة لدرجة الحرارة المطلقة للجسم.

وتبين المعادلة أن أي جسم أسود يبعث كمية من الحرارة بمعدل يتناسب مع القوة الرابعة لدرجة حرارة ذلك الجسم المطلقة. أما إذا كان الجسم المشع ليس أسود فإنه يبعث كمية من الطاقة الحرارية أقل من تلك التي يبعثها الجسم الأسود وتعطى بالمعادلة التالية:

$$E_r = q_r = \varepsilon \sigma A T^4$$

حيث أن ε هي الانبعاثية.

وكما ذكرنا فإن النسبة بين ما يبعثه الجسم الحقيقي(الرمادي) والجسم المثالي(الأسود) تمثل الانبعاثية لذلك الجسم ويمكن كتابتها بالصورة التالية:

$$\varepsilon = \frac{E_r}{E_b}$$

حيث أن:

E_r كمية الطاقة التي يبثها أو يمتصها الجسم الحقيقي.

E_b كمية الطاقة التي يبثها أو يمتصها الجسم الأسود.

والجدول التالي يبين بعض قيم الانبعاثية عند أطوال موجية ودرجات حرارة محددة.

المادة	طول الموجة9.2m ودرجة الحرارة$38C^0$
ثلج	0.97
كربون	0.82
دهان أبيض	0.95
حديد زهر	0.63
نحاس ملمع	0.04
زجاج	0.9

جدول(2- 4)الانبعاثية لبعض المواد.

وهناك عدة حالات للبعث الحراري ومنها:

- إذا كان الجسم المشع أسود والمحيط الذي يحيط به كذلك فإن كمية الطاقة المشعة تعطى بالمعادلة التالية:

$$q_r = \sigma A_1 \left(T_1^4 - T_2^4\right)$$

حيث أن T_1 درجة حرارة الجسم وT_2 درجة حرارة المحيط. وبما أن الأجسام الحقيقية لا تخضع لمواصفات المشع المثالي فإنها مع ذلك تبعث إشعاعات بمعدل أوطأ من الأجسام السوداء. وإذا كانت تبعث عند درجة حرارة مساوية لدرجة حرارة الجسم الأسود جزءاً ثابتاً من ابتعاث الجسم الأسود عند كل طول موجي فإنها تسمى بالأجسام الرمادية.

- إذا كان الجسم المشع حقيقياً(رمادي) والمحيط أسود فإنه سيمتص جميع الطاقة الإشعاعية الواقعة عليه وتكون كمية الطاقة الحرارية المشعة تعطى بالمعادلة التالية:

$$q_r = \varepsilon\sigma A_1\left(T_1^4 - T_2^4\right)$$

- إذا كان كلا الجسمين ليسا بأسودين(رمادي) وكانت هناك علاقة شكلية بين الجسمين فإن الطاقة الحرارية المتبادلة بالإشعاع بينهما تعطى بالمعادلة التالية:

$$q_r = F_{1-2}\sigma A_1\left(T_1^4 - T_2^4\right)$$

حيث أن

F_{1-2} هو معامل الشكل Shape Factor بين الجسمين. ويعرف على أنه الجزء من الطاقة الذي يغادر السطح1 والمتجهة إلى السطح2. ويعتمد معامل الشكل على الاتجاه النسبي والحجم النسبي للسطحين المتبادلين. وينطبق على معامل الشكل العلاقة التبادلية والتي تعطى كما يلي:

$$A_n F_{n-m} = A_m F_{m-n}$$

وهناك بعض الأشكال الهندسية المعروفة والتي لها معامل شكل محدد فإذا كان لدينا سطح مستو محاط بثلاثة أجسام فإن السطح المستوي يرى الأجسام الثلاثة الأخرى ولا يرى نفسه ومن ثم يكون:

$$F_{1-2} + F_{1-3} + F_{1-4} = 1$$

وخلاصة القول فإن حاصل مجموع معامل الشكل من السطح المستوي أو المحدب المشع إلى جميع الأجسام حوله تساوي1 حسب المعادلة التالية:

$$\sum_{n=1}^{N} F_{1-n} = 1$$

أما إذا كان السطح مقعر فان $F_{1-1} \neq 0.0$.

وعندما يكون هناك جسمان كرويان يحيطان ببعضهما فإن الجسم الداخلي لا يرى نفسه $F_{1-1} = 0.0$ وبالتالي يكون:

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

ولذلك تصبح:

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

ومع تطبيق العلاقة التبادلية:

$$A_1 F_{1-2} = A_2 F_{2-1}$$

نجد أن:

$$F_{2-1} = \frac{A_1 F_{1-2}}{A_2} = \frac{A_1}{A_2}$$

وكما أسلفنا سابقاً فإنه وفي الكثير من الحالات التي يوجد فيها أكثر من آلية لحدوث التبادل الحراري لا بد من تطوير مفهوم المقاومة الحرارية في حالة انتقال الحرارة بالإشعاع تماماً كما في حالتي التوصيل والحمل. ولذلك يمكن إعادة كتابة المعادلة السابقة كمايلي:

$$q_r = \frac{\Delta T}{R}$$

$$q_r = \varepsilon\sigma A\left(T_1^2 - T_2^4\right) = \varepsilon\sigma A\left(T_1 - T_2\right)\left(T_1 + T_2\right)\left(T_1^2 + T_2^2\right)$$

$$q_r = \frac{T_1 - T_2}{\frac{1}{\varepsilon\sigma A\left(T_1 + T_2\right)\left(T_1^2 + T_2^2\right)}}$$

وبالتالي فإن قيمة المقاومة الحرارية بالإشعاع تساوي:

$$R = \frac{1}{\varepsilon\sigma A\left(T_1 + T_2\right)\left(T_1^2 + T_2^2\right)}$$

وبتعريف المواصلة الحرارية h_r للإشعاع(معامل انتقال الحرارة الإشعاعي):

$$h_r = \frac{1}{R_r A_1}$$

$$h_r = \varepsilon\sigma\left(T_1 + T_2\right)\left(T_1^2 + T_2^2\right)$$

مثال(2- 12)

تقاطع مزدوجة حرارية كروي الشكل درجة حرارته500K يقع في أنبوب كبير أسود اللون درجة حرارته300k.يحمل هواء فإذا كانت الانبعاثية للمزدوجة الحرارية 0.3 احسب المواصلة الحرارية(معامل انتقال الحرارة الإشعاعي)؟

الحل:

$$h_r = \varepsilon\sigma\left(T_1 + T_2\right)\left(T_1^2 + T_2^2\right)$$

$$h_r = 0.3 * 5.67X10^{-8}\left(500 + 300\right)\left(300^2 + 500^2\right) = 4.63\frac{w}{m^2K}$$

مثال(2- 13)

احسب معدل الفقد الحرارية من قطعة لحم أبعادها30cmX30cm ودرجة حرارة سطحها350K إذا كانت الانبعاثية منها تساوي0.5

الحل:

نحسب المساحة أولاً

$$A = 0.3 * 0.3 = 0.09m^2$$

$$q_r = \varepsilon\sigma AT^4$$

$$q_r = 0.5 * 5.67X10^{-8} * 0.09 * 350^4 = 191.43w$$

مثال(2- 14)

قطعة من العجين درجة حرارتها$40C^0$ ومساحتها$50cm^2$ موضوعة في فرن درجة حرارته$180C^0$ فإذا فرضنا أن قطعة العجين لها انبعاثية مقدارها0.3 احسب معدل الحرارة التي تكسبها قطعة العجين بالإشعاع .

الحل:

نحول درجتي الحرارة إلى الكلفن

$$T_2 = 40 + 273 = 313K$$

$$T_1 = 180 + 273 = 453K$$

$$q_r = \varepsilon\sigma A_1\left(T_1^4 - T_2^4\right)$$

$$q_r = 0.3 * 5.67X10^{-8} * 50X10^{-4}\left(453^4 - 313^4\right) = 0.41w$$

انتقال الحرارة والموائع

المبادلات الحرارية

الوحدة الثالثة : المبادلات الحرارية

الجدارة: التعرف على الأنواع المختلفة من المبادلات الحرارية وأهميتها واستخداماتها المتعددة.

الأهداف: دراسة وتحليل المبادل الحراري سواء من النوع المتوازي أو المتعاكس أو المتعامد.والإلمام بالاستخدامات والتطبيقات التي يدخل فيها في مجال التصنيع الغذائي.

مستوى الأداء المطلوب:أن يصل المتدرب إلى إتقان الجدارة بنسبة 95٪.

الوقت المتوقع للتدريب على الجدارة: 3 ساعات.

الوسائل المساعدة: يحتاج المتدرب إلى بعض الصور والرسومات التوضيحية لأنواع متعددة من المبادلات الحرارية.

متطلبات الجدارة: أن يقوم المتدرب بالتعرف على أهمية ومبدأ عمل المبادل الحراري والغاية من وجوده في منشأة التصنيع الغذائي. كما عليه دراسة وتحليل المبادل الحراري وتوزيع درجات الحرارة أثناء الدخول والخروج للمائع وأن يعرف مميزات ومشاكل كل نوع من هذه الأنواع.

المقدمة :

المبادل الحراري هو أداة لنقل الطاقة الحرارية من مائع درجة حرارته مرتفعة إلى مائع درجة حرارته منخفضة وذلك أثناء حركة المائعين خلاله. ومن الأمثلة على المبادلات الحرارية المدفأة المنزلية, ورودیتر السيارة, وسخان المياه المنزلي. وللمبادلات الحرارية استخدامات واسعة في محطات توليد الطاقة الكهربائية والصناعات الكيميائية وفي الكثير من منشآت التصنيع الغذائي حيث يتم تسخين الأطعمة وتبريدها.

العوامل التي يعتمد عليها شكل ونوع المبادل الحراري لاستخدام معين :

1. درجة الحرارة.
2. أطوار الموائع المستخدمة.
3. كمية الطاقة الحرارية المطلوب نقلها.
4. الفاقد في الضغط المسموح به لكل مائع من المائعين.

ويمكن تصنيف المبادلات الحرارية بعدة طرق أشهرها على أساس اتجاهات انسياب المائع الساخن والبارد بالنسبة لبعضهما, حيث هناك نوعان إذا كان المائعان يتحركان باتجاه متواز هما :

1. **المبادل الحراري من النوع المتوازيParallel Flow Heat Exchanger.**
2. **المبدل الحراري من النوع المعكوسCounter Flow Heat Exchanger.**

وهناك نوع آخر من المبادلات الحرارية يسمى **المبادل الحراري من النوع المتعامد Cross Flow Heat Exchanger**

وعادة ما تكون المبادلات المتوازية والمعكوسة على هيئة أنبوبين متمركزين ينساب كل مائع من المائعين في أحدهما.بحيث لا يختلطا مع بعضهما. وقد يحتوي المبادل على أكثر من مسار لأي من المائعين كما أنه قد يختلط المائع الواحد مع بعضه في المسارات وقد لا يختلط..ويعتبر المبادل الحراري المتوازي من أسوأ المبادلات الحرارية تصميماً لأنه بحاجة إلى مساحة كبيرة جداً للحصول على فرق محدد في درجة الحرارة ومعدل ثابت من التبادل الحراري, إلا أنه يمتاز بالثبات على اختلاف معدلات التدفق المارة به.

وعلى العكس من المبادل الحراري المتوازي فإن المبادل الحراري المعكوس يعتبر من أكفأ المبادلات الحرارية, إلا أن تجميع المائعين بعد خروجهما يؤدي إلى أن يكون حجم هذا المبادل ضخماً. أما إذا كان المائعان متعامدين فإن المبادل يكون من النوع المتعامد الانسيابي. وهو يعتبر كحالة وسطية بين المبادلين السابقين.ويكثر استخدامه عندما يكون أحد المائعين غازياً.

وتعتبر مساحة السطح الفاصل بين المائعين والتي تنتقل عبرها الحرارة من أهم العوامل التي تحكم صافي الحرارة المنتقلة من المائع الساخن إلى المائع البارد. وزيادة المساحة لا يأتي إلا إما عن طريق زيادة طول المبادل الحراري أو عن طريق تقليل قطر الأنابيب في المسارات مع زيادة عدد هذه المسارات والذي بدورة يؤدي إلى فقد كبير في الضغط.وللقبول بالبديل الأول نعمل على إطالة مسار المبادل الحراري على أن يكون هناك أكثر من اتجاه واحد لكل مائع وللحصول على مبادل حراري مكتنز يمكن للموائع أن تلتف بداخله مرة أو مرتين أو أكثر مما يؤدي إلى كثرة المسارات وتداخلها وتغيير حركة اتجاه الموائع فيها وبالتالي مبادلات حرارية لا بالمتوازية ولا بالمتعاكسة. ويضاف على أحد الأنابيب وغالبا على الأسطوانة زعانف داخلية لإجبار المائع على الحركة في اتجاه معين وزعانف خارجية للمساهمة في زيادة المساحة وبالتالي تحسين معدلات انتقال الحرارة. وعادة ما تستخدم العلاقات التجريبية للتنبؤ بأداء المبادل الحراري خاصة وأن الأنابيب لها معامل تمدد حراري كما أنه قد يحدث تراكم لترسبات داخل هذه الأنابيب.

ومن العوامل التي تؤثر على أداء المبادل الحراري:

1. معدل التدفق الكتلي خلاله.
2. الحرارة النوعية للمائعين.
3. درجات الحرارة للمائعين أثناء الدخول والخروج.
4. مساحة السطح التي يتم من خلالها التبادل الحراري.
5. الموصلية الحرارية للمادة التي صنع منها الأنبوب.
6. درجة تكون الرواسب أو القشور داخل الأنابيب.
7. معاملات انتقال الحرارة بالحمل من الأسطح الداخلية والخارجية للأنابيب.

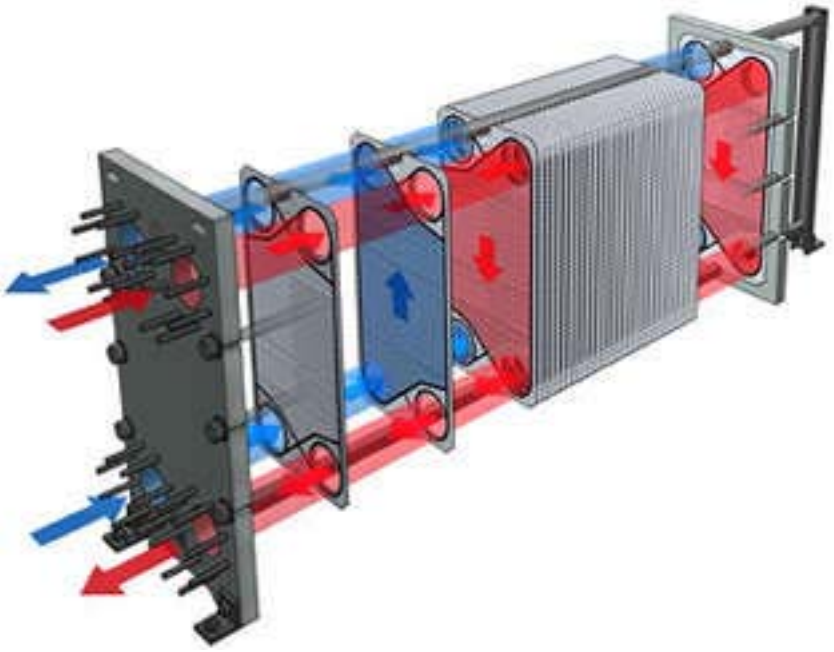
وبمعرفة درجات حرارة الدخول وتوصيف الحرارة النوعية للمائع وكمية الحرارة المطلوب نقلها وتحديدها تتحدد درجات حرارة خروج الموائع من مبادئ الديناميكا الحرارية ومع ذلك فإن حسابات انتقال الحرارة تكون ضرورية لتحديد مساحة السطح المطلوبة وتحديد مدى استطاعة المبادل الحراري على أداء المهمة المطلوبة. وتخضع عملية اختيار المبادل الحراري للقيم المثلى للمعاملات المختلفة كالفقد في الضغط وقدرة الضخ ومساحة سطح المبادل الحراري والتكلفة الابتدائية وتكلفة التشغيل والتنظيف.

ولتحليل المبادل الحراري للحصول على كمية الحرارة المتبادلة بين المائعين الساخن والبارد بدلالة المعامل الكلي لانتقال الحرارة للمبادل الحراري ومساحة السطح ودرجات حرارة الدخول والخروج للمائعين.

المبادل الحراري اللوحي Plate Heat Exchanger**:**

وهذا المبادل الحراري له استخدامات واسعة في مصانع الألبان ومصانع المشروبات الغذائية. ويتكون هذا النوع من ألواح متوازية ومتقاربة مصنوعة من معدن لا يصدأ ومشدودة على إطار حديدي . وتستخدم الأوجه التي تصنع من جلد طبيعي أو صناعي للحام حواف اللوح لمنع اختلاط السوائل. وتساعد هذه الأوجه في توجيه وسيط التبريد والتسخين وحركة المنتج إلى مداخلها. ويمكن أن يكون اتجاه تدفق تيار المنتج المعاكس لاتجاه وسيط التبريد أو التسخين متواز أو متعاكس.

تكون الألواح المستخدمة في هذا النوع من المبادلات من المعدن الذي لا يصدأ. وهناك أجزاء حساسة تلصق على الألواح لتزيد الدوامات في تيار المنتج للحصول على تبادل حراري أفضل. وتصلح المبادلات الحرارية ذات اللوح للسوائل الغذائية منخفضة اللزوجة(اقل من 5pa.s).وهذا النوع من المبادلات يستخدم لمعدلات تدفق تتراوح بين 5000kg/hr-20000kg/hr..ويجب العناية عند استخدام هذا النوع من المبادلات لتقليل عملية ترسيب المواد الغذائية مثل بروتينات الحليب على سطح الألواح. حيث إن ذلك يقلل معدل انتقال الحرارة من وسيط التسخين إلى المنتج ويؤدي إلى زيادة الفقد في الضغط.



شكل(3- 1)مبادل حراري لوحي.

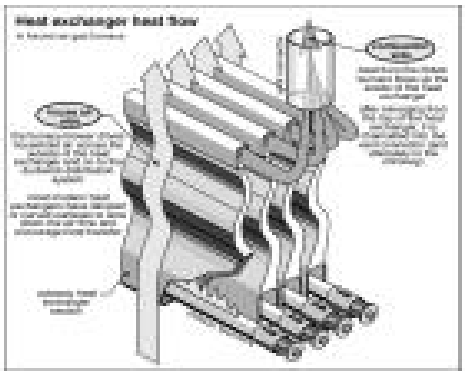
من مميزات هذا النوع :

1- سهولة الصيانة وسهولة الفك لفحص سطح المنتج.
2- يحتوي على تصميم صحي للاستخدام في التصنيع الغذائي.

3- يمكن زيادة سعته بسهولة وذلك بإضافة ألواح إضافية على الإطار.

4- يسخن أو يبرد في حدود $1C^0$ من درجة حرارة الوسيط وهو أقل تكلفة عن المبادلات الأخرى غير المتلامسة.

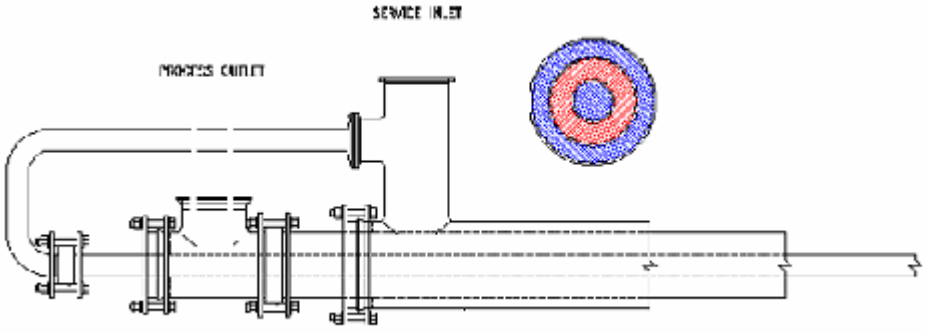
5- يتيح هذا النوع فرصة حفظ الطاقة بوساطة إعادة توليدها.



شكل(3- 2)مبادل حراري لوحي أنبوبي.

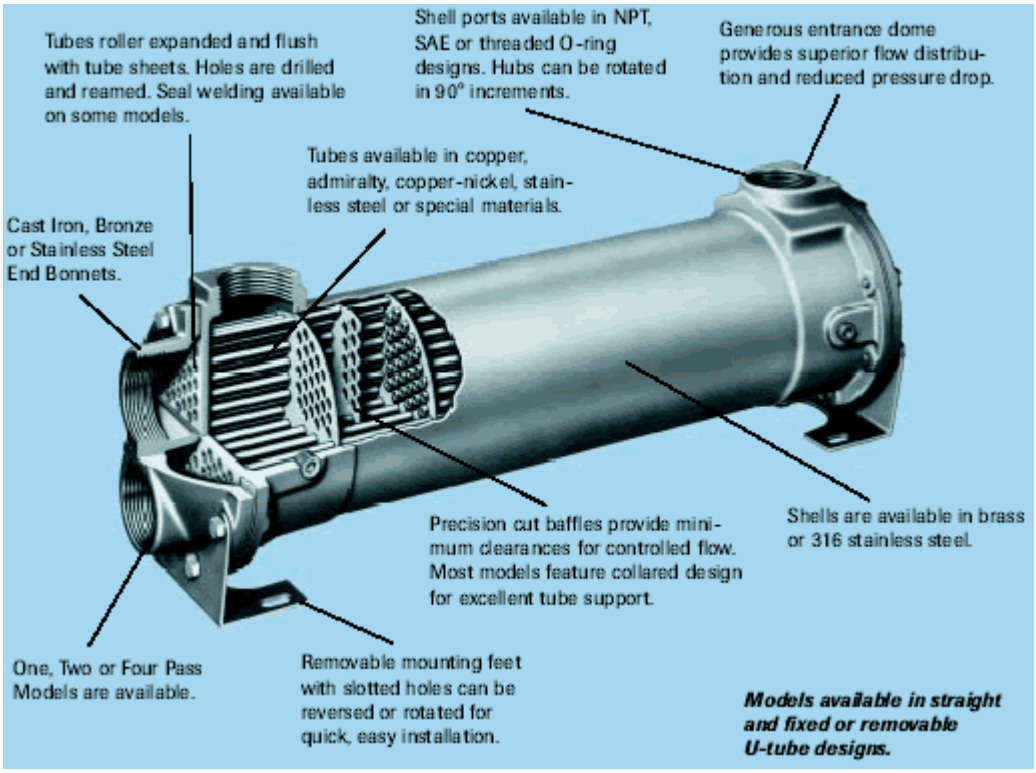
المبادلات الحرارية الأنبوبية Tubular Heat Exchangers:

إن أبسط أنواع المبادلات الحرارية عديمة التلامس هو المبادل الحراري ذو الأسطوانة المزدوجة. ويتكون هذا المبادل الحراري من أنبوبتين متمركزتين واحدة داخل الأخرى. ويكون تيار المائعين في الفراغ البيني وفي الفراغ الداخلي على الترتيب. ويكون التدفق إما في الاتجاه نفسه أو في اتجاه معاكس.

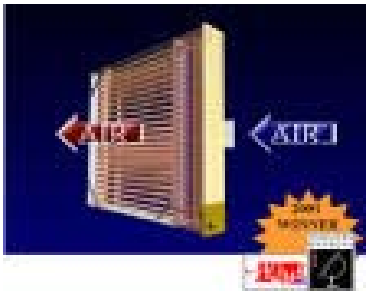


شكل(3- 3) مبادل حراري أنبوبي ثنائي المسار

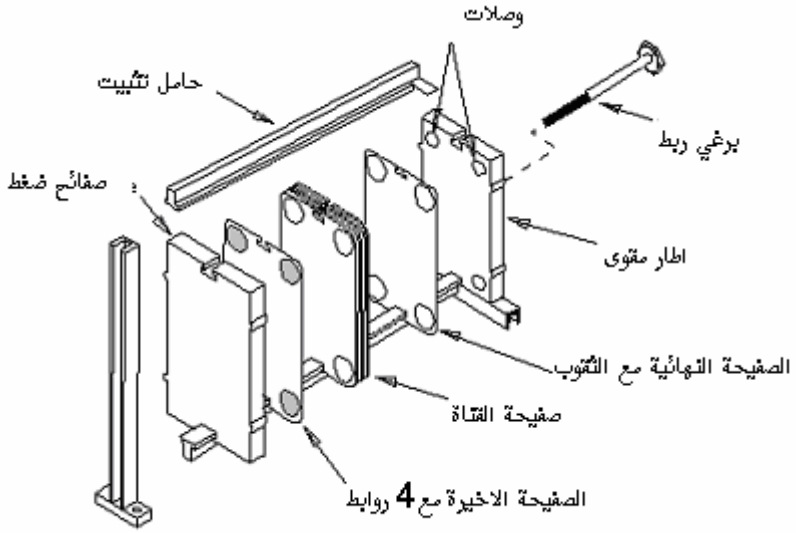
شكل(3- 4) مبادل حراري أنبوبي مزدوج ثلاثي المسار.



شكل(3- 5)مبادل حراري أنبوبي.



شكل(3- 6)مبادل حراري هوائي.



شكل(3- 7) أجزاء المبادل الحراري.

وقد يتم استخدام مبادل حراري ثلاثي الأسطوانات حيث يمر المائع المنتج في الفراغ البيني الداخلي بينما يمر وسيط التسخين أو التبريد في الفراغ الداخلي والبيني الخارجي. وتحتوي الأنبوبة الداخلية على نتوءات وزوائد لإيجاد إضطرابات وزيادة المساحة السطحية والذي بدورة يؤدي إلى زيادة معدل التبادل الحراري. كما أنه قد يتم استخدام مبادل حراري من نوع الشريحة والأنبوب Shell And Tube Heat Exchanger حيث إن أحد المائعين يمر من خلال الأنبوب والمائع الآخر يمر خلال الشريحة. وفي الحالة التي يتم بها تسخين وتبريد الغازات فإنه يتم استخدام المبادل الحراري ذي التدفق التقاطعي بحيث إن أحد المائعين يسري خلال الأنبوب بينما الغاز يجبر على السريان من خلال الممرات الموجودة بين الأنابيب وهناك نوع آخر من المبادلات الحرارية يستخدم في البيوت وهو من النوع التقاطعي أيضاً حيث يسري الغاز من بين أنابيب مشرحة بينما المائع يسري داخل هذه الأنابيب.

المبادل الحراري ذو السطح المكشوط Scraped-Surface Heat Exchanger**:**

وفي هذا النوع من المبادلات الحرارية يتم كشط السطح الداخلي بواسطة أداة ميكانيكية لتقليل المقاومة الحرارية وبالتالي زيادة سرعة انتقال الحرارة من وإلى المنتج .ويصنع السطح الذي يلامس الغذاء من مادة لا تصدأ. ويحتوي هذا المبادل على جزء دوار مغطى بطبقة من البلاستيك حيث يدور بسرعة تتراوح بين150-500Rpm. وبالرغم من أن زيادة السرعة الدورانية تزيد من سرعة وكفاءة النقل الحراري إلا أنها تؤثر على جودة المنتج الغذائي ولذلك يجب اختيار السرعة الدورانية والفراغ البيني بين الجزء

الدوار والأسطوانة بدقة لكل منتج. ويستخدم هذا النوع من المبادلات في عمليات التسخين والبسترة والتعقيم والخفق وعمل الجلي والمستحلبات وعصائر الفواكه والشوربات.

وهناك أنواع من المبادلات الحرارية عن طريق التلامس المباشر بين المائع الساخن والبارد كالمبادل الحراري بواسطة نفخ البخارSteam-Infusion Exchanger حيث يضخ المنتج في حالة السيولة إلى أعلى المبادل الحراري لينساب داخل المبادل مما يتيح له أخذ جزء من حرارة البخار. ويستخدم هذا النوع من المبادلات عندما يكون المنتج على شكل أجزاء منفصلة كالخضراوات المحببة وقطع اللحم والأرز

وأول وأهم خطوة لتحليل المبادل الحراري من نوع الصفيحة والأنبوب هو تقييم وحساب معامل انتقال الحرارة الكلي بين المائعين له. ولقد توصلنا إلى أن معامل انتقال الحرارة الكلي بين مائع ساخن عند درجة حرارة T_h وآخر بارد عند T_c مفصولين بجدار صلب يعطى كمايلي:

$$Q = U\ A\ (T_h - T_c)$$

بحيث إن:

$$UA = \frac{1}{\frac{1}{h_1 A_1} + \frac{x_w}{k_w A_w} + \frac{1}{h_2 A_2}}$$

وحيث إنه مبادل حراري أنبوبي فإن المساحة الداخلية تكون $A_i = 2\pi r_i L$ و المساحة الخارجية $A_0 = 2\pi r_0 L$ وبالتالي يكون معامل انتقال الحرارة الكلي بالنسبة للمساحة الخارجية كمايلي:

$$U_0 = \frac{1}{\frac{A_0}{h_i A_i} + \frac{A_0 \ln \frac{r_0}{r_i}}{2\pi k L} + \frac{1}{h_0}}$$

أو بالنسبة إلى المساحة الداخلية:

$$U_i = \frac{1}{\frac{A_i}{h_0 A_0} + \frac{A_i \ln \frac{r_0}{r_i}}{2\pi k L} + \frac{1}{h_i}}$$

معامل فاولنق Fouling Factors:

في بعض الأحيان ونتيجة للاستخدامات الكثيرة للمبادلات الحرارية فإنه يحدث ترسب على سطح الأنابيب والصفائح نتيجة للرواسب الموجودة في الموائع وهذا يؤدي إلى زيادة المقاومة الحرارية للمبادل الحراري. ولذلك فإن التنبؤ بالعلاقة الدقيقة للمبادل الحراري لا تكون ألا إذا كان المبادل بصورة مثالية أما المقاومة الحرارية للرواسب فإنها تحسب عملياً وذلك عن طريق الطرح بين معامل انتقال الحرارة الكلي بعد الاستخدام وقيمته قبل الاستخدام وتكون المقاومة الحرارية كالتالي:

$$R_d = \frac{1}{U_d} - \frac{1}{U}$$

حيث أن:

U:معامل انتقال الحرارة الكلي للمبادل الحراري قبل الاستخدام.

U_d:معامل انتقال الحرارة الكلي للمبادل الحراري بعد الاستخدام.

R_d:المقاومة الحرارية للرواسب.

وبالتالي يكون معامل انتقال الحرارة الكلي للمبادل الحراري كالتالي:

$$\frac{1}{U} = + \frac{1}{h_1} + + \frac{1}{h_{d1}} + \frac{x_w}{K_w} + \frac{1}{h_{d2}} + \frac{1}{h_2}$$

ويعطى الميزان الحراري للمبادل الحراري كما يلي:

الفرق اللوغاريتمي لمتوسط درجة الحرارة The Logarithmic Mean Temperature Difference:

على فرض أن مبادلاً حرارياً بسيطاً , فإن المائع يمكن أن يسري إما بشكل متوازي أو بشكل متعاكس مع سريان المائع الآخر(الغاز). وبمعرفة أن الحرارة المنتقلة في هذا المبادل الحراري تعطى ب:

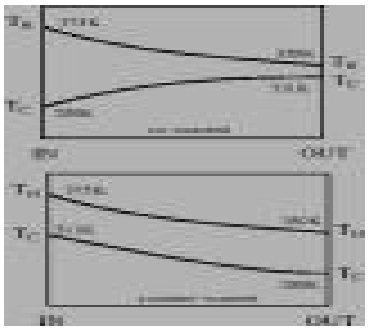
$$q = UA\Delta T_m$$

حيث أن:

U:هو معامل انتقال الحرارة الكلي للمبادل الحراري.

A:هي المساحة السطحية للمبادل الحراري.

ΔT_m:هي الفرق في متوسط الحرارة من خلال المبادل الحراري.



شكل(3- 8)توزيع درجة الحرارة في المبادل الحراري من النوع المعكوس والمتوازي.

تحليل المبادل الحراري:

للتعبير عن كمية الحرارة المنقولة من المائع الساخن إلى المائع البارد بدلالة المعامل الكلي لانتقال الحرارةU ومساحة سطح المبادل الحراريA ودرجات حرارة الدخول والخروج للموائع الساخنة والباردة. ويعطى معدل الفقد الحراري من المائع الساخن بالمعادلة التالية:

$$q_h = m_h^0 Cp_h \left(T_{hi} - T_{h0}\right)$$

ومعدل الكسب الحراري للمائع البارد بالمعادلة التالية:

$$q_c = m_c^0 Cp_c \left(T_{c0} - T_{ci}\right)$$

والكميتان متساويتان بمعنى أن الحرارة التي يفقدها المائع الساخن يكسبها المائع البارد

$$q_h = q_c$$

حيث أن:

m_c^0 معدل تدفق المائع البارد.

m_h^0 معدل تدفق المائع الساخن.

Cp_c الحرارة النوعية للمائع البارد.

Cp_h الحرارة النوعية للمائع الساخن.

T_{h0}, T_{hi} درجة حرارة المائع الساخن الداخلة والخارجة.

T_{c0}, T_{ci} درجة حرارة المائع البارد الداخلة والخارجة.

ونقوم بحساب كمية الطاقة الحرارية الكلية المتبادلة في المبادل الحراري من خلال المعادلة التالية:

$$q = UA(LMTD)$$

ولكن الفرق الحراري في المائع الساخن والبارد يتباين بين المدخل والمخرج ويجب أن نحدد القيمة المتوسطة له. ففي حالة الجريان المتوازي، إن كمية الحرارة المنتقلة عبر جزء صغير هي:

$$dq = m^o_h Cp_h \ dT_h = m^o_c Cp_c \ dT_c$$

حيث أن c, h يرمزان إلى البارد(Cold) والساخن(Hot)على التوالي بينما C_h ترمز إلى السعة الحرارية للمائع الساخن وبإجراء التحليل على المبادل الحراري نتوصل إلى مايلي:

$$\Delta Tm = \frac{(Th_2 - Tc_2) - (Th_1 - Tc_1)}{\ln\left[\frac{(Th_2 - Tc_2)}{(Th_1 - Tc_1)}\right]}$$

وهذا الفرق الحراري ΔT_m يسمى الفرق اللوغاريتمي لمتوسط درجة الحرارة.(LMTD) وهذا يعني أن الفرق اللوغاريتمي لمتوسط درجة الحرارة هو عبارة عن الفرق في درجة الحرارة عند إحدى نهايتي المبادل الحراري ناقص الفرق فيه عند النهاية الأخرى مقسوماً على اللوغاريتم الطبيعي لنسبة هذا الفرق. وهذا ينطبق على المبادل الحراري في حالتي السريان المتوازي والمتعاكس. ففي حالة المبادل الحراري من النوع المعكوس يكون الفرق اللوغاريتمي لمتوسط درجة الحرارة يساوي:

$$LMTD = \frac{(T_{hi} - T_{co}) - (T_{ho} - T_{ci})}{\ln\frac{(T_{hi} - T_{co})}{(T_{ho} - T_{ci})}}$$

وفي حالة المبادل الحراري من النوع المتوازي فإن الفرق اللوغاريتمي لمتوسط درجة الحرارة يساوي:

$$LMTD = \frac{(T_{hi} - T_{ci}) - (T_{ho} - T_{co})}{\ln\frac{(T_{hi} - T_{ci})}{(T_{ho} - T_{co})}}$$

وفي حالة استخدام مبادل حراري بأكثر من أنبوب(متعدد المسار) فإننا نستخدم معامل تصحيحF Correction Factorلمعالجة الوضع الجديد.وهذا المعامل يمكن إيجاده من الأشكال المرفقة حسب نوع المبادل الحراري ومن خلال المعادلة التالية:

$$q = UAF(LMTD)$$

بحيث يتم إيجادF من الخرائط المبينة في الأشكال اللاحقة ويكون الفرق اللوغاريتمي لمتوسط درجة الحرارة هو نفسه المستخدم في حالة النوع المعكوس. ويأخذ معامل الشكل تأثير تعدد المسارات بعين الاعتبار. وعند اختيار المبادل الحراري يجب أن يختار معامل شكل أكبر من0.75 وإذا كانت تلك القيمة أقل من هذا الرقم فإنه يجب أن نبحث عن شكل آخر. وعندما ينساب المائع البارد خلال الأنابيب فانR,P هي المتغيرات التي تستخدم في الخرائط لحساب معامل التصحيح.حيث أنP هو النسبة بين درجة الحرارة المكتسبة للمائع البارد وبين أكبر فرق لدرجات الحرارة في المبادل الحراري. أماR فهو يمثل النسبة بين الانخفاض في درجة حرارة المائع الساخن وبين درجة الحرارة المكتسبة للمائع البارد ويتم التعبير عن هذين المعاملين بالمعادلات التالية:

$$P = \frac{T_{c0} - T_{ci}}{T_{hi} - T_{ci}}$$

$$R = \frac{T_{hi} - T_{h0}}{T_{c0} - T_{ci}}$$

وعندما يكون المائع الساخن متحرك داخل الأنبوب فإنه يلزمنا التبديل بين رمزc,h في التعريفات السابقة.

فعالية المبادل الحراري Heat Exchanger Effectiveness:

الغرض من المبادل الحراري هو تسخين المائع البارد الداخل إلى أقصى درجة حرارة ممكنة أو إزالة الطاقة الحرارية من المائع الساخن بحيث نصل إلى أقل درجة حرارية ممكنة حيث عندها تتساوى درجة حرارة المائع البارد الداخلة ودرجة حرارة المائع الساخن الخارجة فيكون:

$$T_{h0} = T_{ci}$$

ويتوقف تحقيق هذا الغرض على السعة الحرارية للمائعين الساخن والبارد($m^0 C_P$) بحيث تكون المساحةA كبيرة جداً مع المحافظة على فكرة التوازن الحراري(كمية الحرارة التي يفقدها المائع الساخن تساوي كمية الحرارة التي يكسبها المائع البارد.

انتقال الحرارة والموائع

خواص الموائع

الوحدة الرابعة : خواص الموائع

الجدارة: التعرف على أهم الخواص الفيزيائية للموائع والموائع النيوتونية وغير النيوتونية.

الأهداف: أن يتعرف المتدرب على بعض الخواص الفيزيائية للموائع كالكثافة والكثافة النسبية والوزن النوعي والحجم النوعي واللزوجة وغيرها.كما يتعرف على بعض الظواهر المصاحبة للموائع كالتوتر السطحي والتكهف والانفصال.

مستوى الأداء المطلوب: أن يصل المتدرب إلى إتقان الجدارة بنسبة 95٪.

الوقت المتوقع للتدريب على الجدارة: 4 ساعات.

الوسائل المساعدة: لا يحتاج المتدرب إلى أية وسائل مساعدة

متطلبات الجدارة: أن يقوم المتدرب بالتعرف على المائع وعلى الخواص المختلفة للموائع وأهميتها في الحسابات المتعلقة بها وتبيان أهمية خاصية اللزوجة الديناميكية للمائع والتفريق بينها وبين اللزوجة الكاياناماتيكية. كما يلزم المتدرب التعرف على حسابات الضغط وتغير ضغط المائع مع الارتفاع في حالة السكون.ودراسة القوى الهيدروستاتيكية الناتجة من الموائع وتأثيرها على الأسطح الأفقية والبوابات المسطحة.

المقدمة :

يمكن تقسيم علم ميكانيكا الموائع إلى ثلاثة أنواع وهي :

1. **إستاتيكا الموائع** وتهتم بدراسة المائع في حالة السكون.
2. **كيناماتيكا الموائع** وتهتم بدراسة السرعات وخطوط الانسياب بدون أي اعتبار للقوى أو الطاقة.
3. **هيدروديناميكا الموائع** ويهتم بدراسة العلاقة بين السرعات والعجلات والقوى المؤثرة من وعلى الموائع المتحركة.

تعريف المائع:

الموائع مواد قابلة للتشكل بشكل الأوعية التي توجد بها وهي قادرة على الانسياب. والمائع أيضاً مادة لا تستطيع أن تقاوم شكلها . وإجهاد القص ضروري جدا لسريان المائع وسوف يتشوه المائع ما دام إجهاد القص موجوداً. و سرعة المائع الملامس لسطح الحائط تكون مساوية للصفر إذا كان المائع لا ينزلق على السطح.

وجزيئات الجسم الصلب متلاصقة أكثر لبعضها عنها في الموائع وقوى الجذب بين جزيئات الجسم الصلب أكبر من تلك في المائع وبالتالي يتمكن من المحافظة على شكله على عكس المائع. والمعادن يمكن أن تنساب تحت ضغوط عالية بينما هناك بعض أنواع السوائل عالية اللزوجة والتي لا تنساب بسهولة وبذلك يسهل التفريق بين الموائع والمعادن اللدنة. وتنقسم الموائع إلى سوائل وغازات والفرق بينها في التالي:

1. **السوائل. تتميز بالخصائص التالية:**

أ- غير قابلة للإنضغاط.

ب- تشغل أحجاماً محددة.

ج - قليلة التأثر بدرجة الحرارة.

وتستطيع السوائل مقاومة قوى الشد المحدودة بسبب ارتفاع قوى التجاذب بين جزيئاتها بالمقارنة مع الأبخرة والغازات .وبالتالي تبدي السوائل مقاومة ملموسة لقوى القص(Shear Stress) التي تحاول فصل طبقات السائل وهذه الخاصية تسمى اللزوجة.

2. **الغازات. تتميز بالخصائص التالية:**

أ- جزيئات الغاز متباعدة عن بعضها فهي قابلة جداً للانضغاط وبسهولة.

ب- تتمدد وتنكمش بفعل درجات الحرارة.

ج- هي أكثر من السوائل تأثراً بتغير درجات الحرارة.

وتهتم معظم مشاكل سريان الموائع في تصنيع الأغذية بالسوائل وتعتمد كثافة ولزوجة المائع على درجة الحرارة. ولن نأخذ التغييرات الحرارية في هذا المقرر بعين الاعتبار إلا نادراً.

الخواص الفيزيائية للموائع:

1. **الكثافة** Density :

وتعطى الرمز ρ وهي عبارة عن الكتلة في وحدة الحجم من المادة ووحدتها في النظام العالمي Kg/m^3.

$$\rho = \frac{m}{\forall}$$

حيث أن m هي الكتلة Mass و $\forall$ هو الحجم Volume .

2. **الكثافة النسبية** Specific Density (S.g):

وهي عبارة عن عدد يدل على النسبة بين كتلة الجسم وكتلة حجم مساو من مادة معيارية مناسبة. وتنسب الجوامد والسوائل إلى الماء عند درجة حرارة مساوية إلى $25C^0$.

الكثافة النسبية = كتلة المادة مقسومة على كتلة حجم مساو له من المادة أو هي عبارة عن كثافة المادة مقسومةً على كثافة الماء.

$$S.g = \frac{\rho_{sub.}}{\rho_w}$$

وتنسب الغازات إلى الهواء الخالي من CO_2 عند الظروف القياسية.

3. **الوزن النوعي** Specific Weight:

ويرمز للوزن النوعي بالرمز γ وهو وزن وحدة الحجم من المادة ووحدته في النظام العالمي N/m^3 ويعطى الوزن النوعي بالمعادلة التالية:

$$\gamma = \rho g$$

حيث أن g هي تسارع الجاذبية الأرضية. وتعتبر كثافة المائع مطلقة بحيث إنها تعتمد على الكتلة التي لا تعتمد على موقع الجسم بينما الوزن النوعي لا تكون قيمته مطلقة لأنه يعتمد على تسارع الجاذبية الأرضية والذي يتغير من مكان لآخر. ويتغير الوزن النوعي للمائع بشكل قليل مع تغير الضغط وعلى درجة الحرارة.

4. **الحجم النوعي** Specific Volume (υ):

وهو حجم وحدة الكتلة للمائع ووحدته m^3/Kg أو هو مقلوب الكثافة.

$$\nu = \frac{\forall}{m} = \frac{1}{\rho}$$

مثال(4- 1)

إذا كانت الكثافة النسبية لأحد الزيوت 0.75أوجد كثافته.

$$\rho = S.g * \rho_w$$

$$\rho = 0.75 * 1000 = 750 \frac{kg}{m^3}$$

مثال(4- 2)

احسب مقدار الحجم النوعي لغاز الميثان إذا علمت أن كثافته عند درجة حرارة $40C^0$ وضغط مطلق8.3bar هي$5.1Kg/m^3$.

نطبق قانون الغازات العام التالي لإيجاد كتلة الجسم.

$$PV = mRT$$

$$\frac{V}{m} = \frac{RT}{P} = \nu$$

$$\nu = \frac{RT}{P} = \frac{8.31*(40+273)}{8.3*100000} = 0.0031 \frac{m^3}{kg}$$

مثال(4- 3)

إذا علمت أن الوزن النوعي للماء$9810N/m^3$ والكثافة النسبية للزئبق13.56 احسب كل من كثافة الماء والوزن النوعي للزئبق وكذلك كثافة الزئبق .

الحل:

$$\rho_w = \frac{\gamma}{g} = \frac{9810}{9.81} = 1000 kg/m^3$$

$$\rho = S.g * \rho_w$$

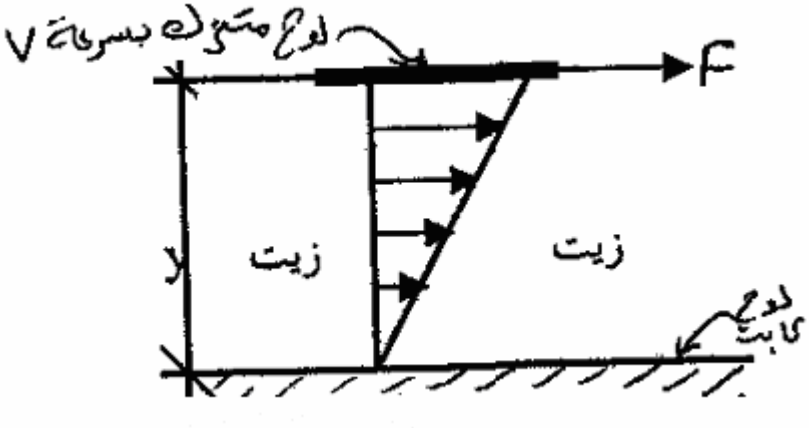
$$\rho = 13.56 * 1000 = 13560 kg / m^3$$

$$\gamma = \rho g$$

$$\gamma = 13560 * 9.81 = 133023.6 N / m^3$$

5. **اللزوجة**Viscosity:

وهي عبارة عن خاصية تحدد مقدار مقاومة المائع لقوى القص .وتنشأ هذه الخاصية أساساً من طريقة تعامل جزيئات المائع مع بعضها أو المقاومة التي تبديها السوائل لقوى القص التي تحاول فصل الطبقات للسائل. وهذه خاصية مهمة حيث ينشأ عنها ما يسمى بإجهاد القص وكلما كان إجهاد القص موجوداً في السوائل فإن الحركة تحدث وبالتالي نجد أن أهم فرق بين السوائل والمواد الصلبة أن السوائل لا تقاوم إجهاد القص مهما صغرت قيمته. كما أنه يوجد فرق آخر بين السوائل والمواد الصلبة وهو أن لزوجة الموائع لا تعتمد على القوى المسلطة بصورة رأسية كالضغط مثلاً. وتعطى اللزوجة بوحدة (Pa .s) أو تعطى (P)(Poise) أو السنتي بواز(Cp) فمثلاً لزوجة الماء تساوي(Cp=1) عند درجات الحرارة العادية.وتتأثر قيمة اللزوجة للموائع بدرجة الحرارة حيث إن لزوجة السوائل تنخفض بزيادة درجة حرارة المائع بينما تزداد قيمتها على الغازات بزيادة درجة الحرارة.



الشكل(4- 1)توزيع السرعة وتأثير اللزوجة على لوح.

F: القوى الثابتة المؤثرة على اللوح العلوي.

Y:المسافة بين اللوحين المتوازيين.

V: سرعة اللوح العلوي المتحرك.

والمائع الذي يلامس اللوح العلوي له نفس سرعة اللوح أما المائع الملامس للسطح السفلي فتكون سرعته صفراً وبالتالي فإن تغير السرعة مع المسافة يكون خطياً.

أما بالنسبة للقوة فإنها تتغير مع مساحة اللوحA والسرعةV طردياً ومع المسافة Yعكسياً

$$\tau = \frac{F}{A} = \mu \frac{dV}{dy}$$

حيث أن μ هي معامل اللزوجة المطلقة الديناميكية.ووحدته هي $N*S/\ m^2$.

وهناك معامل لزوجة آخر يسمى معامل اللزوجة الكاياناماتيكية وتسمى بذلك لعدم وجود قوة ويرمز إليها بالرمز ν ووحدتها m^2/s وتعطى كمايلي:

$$\nu = \frac{\mu}{\rho}$$

حيث أن μ هي اللزوجة المطلقة و ρهي كثافة الزيت. ويلاحظ تناقص معاملات اللزوجة للسوائل بتزايد درجات الحرارة لها.

مثال(4- 4)

سطحان مستويان كبيران تفصل بينهما مسافة قدرها 25mm ويملأ الفراغ بينهما زيت لزوجته المطلقة $0.958N.s/m^2$ وإذا فرضنا dv/dy علاقة خطية أوجد قيمة القوى اللازمة لشد لوح رقيق جداً مساحته $0.37m^2$ وبسرعة ثابتة مقدارها 0.3m/sإذا كان هذا اللوح يبعد عن أحد السطحين مسافة مقدارها 8.4mm . انظر الشكل المرفق.

الحل:

هناك قوتان يجب التغلب عليهما لسحب ذلك اللوح حيث إنه موجود بين المائع من أعلى وأسفل ولذلك:

$$\tau = \frac{F}{A} = \mu \frac{dV}{dy}$$

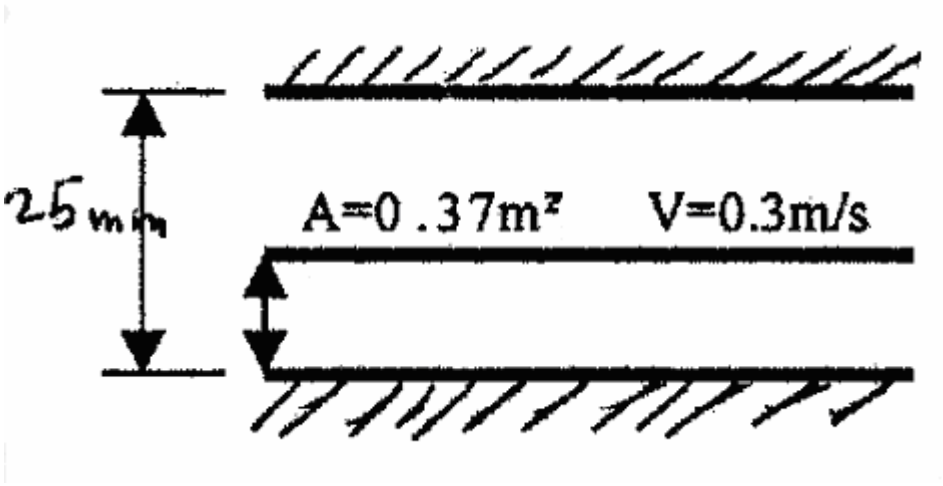
$$\tau = \frac{F_1}{A} = \mu \frac{dV}{dy_1} \Rightarrow \frac{F_1}{0.37} = 0.958 * \frac{0.3}{8.4X10^{-3}}$$

$$\frac{F_1}{0.37} = 0.958 * \frac{0.3}{8.4X10^{-3}} = 34.21 \Rightarrow F_1 = 12.66N$$

وكذلك القوة الأخرى وتساوي:

$$\tau = \frac{F_2}{A} = \mu \frac{dV}{dy_2} \Rightarrow \frac{F_2}{0.37} = 0.958 * \frac{0.3}{(25-8.4)X10^{-3}}$$

$$\frac{F_2}{0.37} = 0.958 * \frac{0.3}{(25-8.4)X10^{-3}} = 17.31 \Rightarrow F_2 = 6.4N$$



الشكل(4- 2)رسم توضيحي للمثال السابق.

مثال(4- 5)

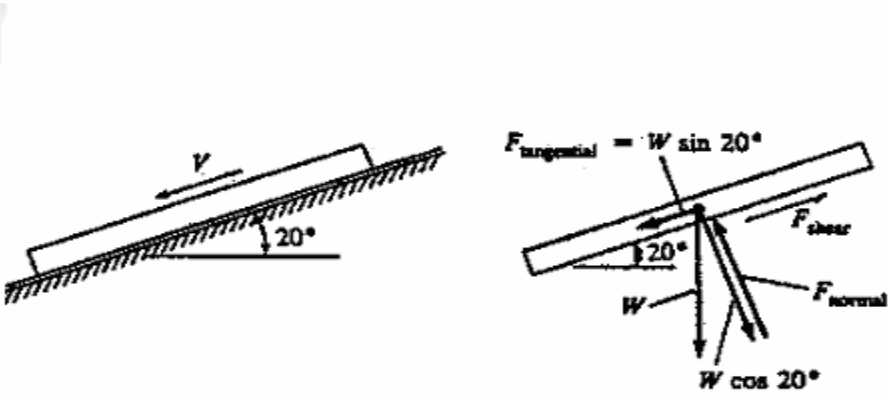
ينزلق لوح مساحته$1m^2$ ووزنه25N على منحنى مائل بزاوية مقدارها20^0 وبسرعة مقدارها2m/s.إذا كانت لزوجته تساوي $0.05N.s/m^2$ احسب المسافة الفاصلة بين اللوح وسطح الزيت .

نلاحظ أن القوة المماسية على السطح وهي مركبة الوزن تساوي قوة اللزوجة وبالتالي:

$$\frac{W \sin 20}{A} = \mu \frac{dV}{dy}$$

$$\frac{25 \sin 20}{1} = 0.05 \frac{2}{y}$$

$$y = \frac{0.05 * 2}{25 \sin 20} = 0.011m$$



الشكل(4- 3) رسم توضيحي للمثال السابق

الشد السطحي أو التوتر السطحي Surface Tension:

للسوائل تلاصق وتماسك فالتماسك يساعد المائع على مقاومة إجهاد الشد بينما يساعد التلاصق على الالتصاق بجسم آخر.والتوتر السطحي هو الشغل الواجب بذله لجلب جزيئات من داخل السائل إلى سطحه لتكوين وحدة مساحات جديدة لهذا السطح.ويساوي هذا الشغل عددياً القوة القابضة المماسية المؤثرة على سطح طوله وحدة واحدة.

$$F_{surfa} = \sigma\pi\ d$$

حيث أن π هي النسبة التقريبية 3.14 و σ هو معامل الشد السطحي ووحدته N/m. ومن موازنة القوى نجد أن:

$$P = \frac{4\sigma}{d}$$

ويعزى ارتفاع أو انخفاض السائل في الأنابيب الشعرية إلى التوتر السطحي أو ما يسمى بالخاصية الشعرية. فحسب نظرية التجاذب الجزيئي. فالجزيئات القريبة من السطح لها تجاذب أكبر من تلك المنخفضة عنه وهذا يجعل السطح وكأنه غشاء مشدود ويعتمد التوتر السطحي في الأنابيب على المقدار النسبي لتماسك الجزيئات وعلى الالتصاق على سطح الوعاء فإذا كان التماسك أقل من الالتصاق ترتفع السوائل في الأنبوب ونقول أن المائع يبلل السطح الذي يلامسه وتنخفض الموائع في الأنبوب إذا كان التماسك للسوائل أكبر من الالتصاق. وهذه الخاصية مهمة جداً إذا كانت أقطار الأنابيب أقل من 10mm.

ولقياس ارتفاع السائل في الأنبوب نستخدم العلاقة التالية:

$$h = \frac{4\sigma \sin \alpha}{\gamma d}$$

حيث أن α هي الزاوية بين المماس للسائل في الأنبوب مع الأفق وتكون مساوية للصفر في حالة الأنبوب الزجاجي و σ هو معامل الشد السطحي.

مثال(4- 6)

قطرة ماء صغيرة عند درجة حرارة $27C^0$ وقطرها 0.05mm وتلامس الهواء فإذا كان الضغط داخلها يزيد عن الضغط الجوي بمقدار 565Pa فاحسب قيمة معامل الشد السطحي .

الحل:

$$P = \frac{4\sigma}{d}$$

$$565 = \frac{4\sigma}{0.05X10^{-3}} \Rightarrow \sigma = 0.0071N/m$$

مثال(4- 7)

أوجد ارتفاع الماء الناتج عن الخاصية الشعرية في أنبوب زجاجي قطره 2.5mm عند غمره بالماء إذا كان معامل الشد السطحي له 0.0728N/m .

الحل:

نلاحظ أن الزاوية α تساوي صفراً والوزن النوعي للماء يساوي $9810N/m^3$ وبالتالي:

$$h = \frac{4\sigma \sin \alpha}{\gamma d}$$

$$h = \frac{4 * 0.0728 \quad \sin 0}{2.5 X 10^{-3} * 9810} = 0.012 \quad m$$

مثال(4- 8)

إذا كان قطر أنبوب زجاجي نظيف يحتوي على ماء 1mm والشد السطحي له يساوي0.0608N/m والوزن النوعي للماء عند درجة حرارة $90C^0$ يساوي $9.467\ KN/m^3$ أوجد ارتفاع الماء في الأنبوب .

الحل:

$$h = \frac{4\sigma \sin \alpha}{\gamma d}$$

$$h = \frac{4 * 0.0608}{9467 * 1 X 10^{-3}} = 0.026 \quad m$$

الضغط البخاري Vapor Pressure:

وهو الضغط الذي يغلي عنده السائل ويرتبط ارتباطاً وثيقاً مع درجة الحرارة حيث يزداد بزيادتها وينقص بنقصانها. وغالباً ما يحدث انخفاض في ضغط الماء نتيجة لنقصان المساحة مما يؤدي إلى الغليان عند درجات حرارة أقل من المعتاد وبالتالي وجود فقاقيع داخل الأنبوب مما يؤدي إلى حدوث ظاهرة التكهف Cavitations وهي ظاهرة خطيرة حيث إنها تؤدي إلى تآكل الأنابيب وهريانها.

الموائع النيوتونية وغير النيوتونية Newtonian and Non-Newtonian Fluid:

المائع النيوتوني هو ذلك المائع الذي يتبع قانون نيوتن للزوجة. حيث إن الموائع التي يتناسب فيها إجهاد القص تناسباً طردياً مع الانفعال فإنها تسمى موائع نيوتونية أما التي لا تبدي نفس سلوك سابقتها فإنها تسمى بالموائع غير النيوتونية كما هو الحال في السوائل البلاستيكية, فهي تتصرف على أنها مواد صلبة في بعض الأحيان وكسوائل في أحيان أخرى. وقد وجد أن السوائل النقية والمحاليل البسيطة تكون نيوتونية بينما محاليل المخاليط ذات الوزن الجزيئي العالي والمعلقات المركزة لا تتبع قانون نيوتن وبالتالي فهي غير نيوتونية بمعنى آخر فإن لزوجتها الظاهرية تعتمد على حالات السريان بالإضافة إلى خواص المائع ومن أمثلتها محاليل السكريات العديدية Polysaccharides والمستخلصات النقيةPurees وكذلك مركزات الفواكه والخضراوات وفي هذا المقرر فإن جل تركيزنا سوف يكون على الموائع النيوتونية.

الموائع القابلة للانضغاط وغير القابلة للانضغاط Compressible and Incompressible Fluids:

المائع المضغوط هو المائع التي تتغير كثافته نتيجة التغييرات المختلفة التي تطرأ عليه من ضغط وغيرها ومن أهم الأمثلة عليه الغازات بشكل عام أما الموائع غير المضغوطة فإن كثافتها لا تتأثر أبداً. وفي هذا المساق سوف تقتصر دراستنا على الموائع غير القابلة للانضغاط.

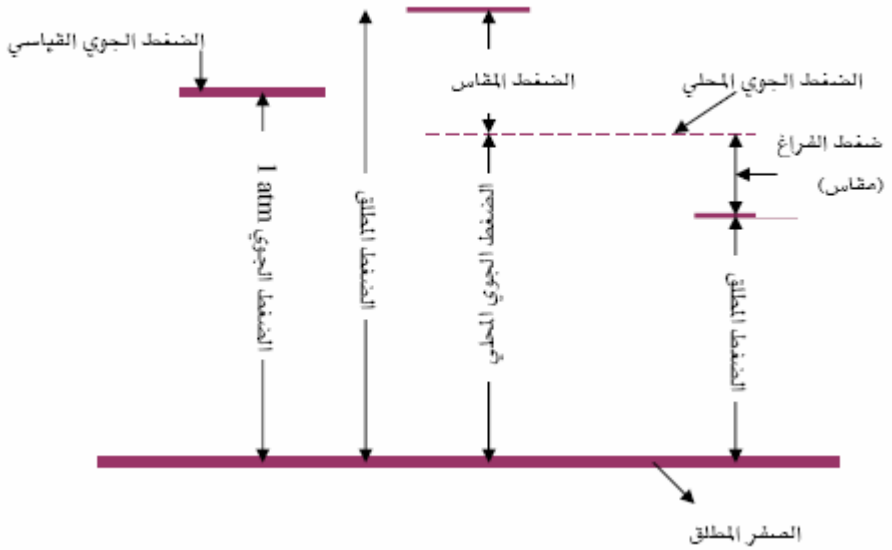
الضغط Pressure:

وهو القوة المؤثرة على وحدة المساحة ويكون عامودياً على السطح الذي يعمل عليه. و يتساوى الضغط على أية نقطة على هذا السطح.ووحدته هي N/m^2 أوPa وله وحدات أخرى مثل bar, atm , torr.

ويعطى الضغط بالعلاقة التالية:

$$P = \frac{F}{A}$$

ويعرف الضغط الجوي atmospheric pressure بأنه ضغط عمود هواء الغلاف الجوي (أو وزن عمود الهواء المؤثر) على وحدة المساحة. وهو يتغير من مكان إلى آخر حسب ارتفاع المكان وانخفاضه عن سطح البحر. والضغط الجوي القياسي هو الضغط الجوي عند مستوى سطح البحر و يعادل101kpa أو760mm Hg.أما ضغط المقاس gauge pressure فهو الضغط المبين بواسطة أجهزة قياس الضغط المختلفة بحيث تكون قراءة الضغط الجوي في مكان مقياس الضغط تساوي صفراً.و بهذا يكون الضغط المطلق absolute pressure مساويا لضغط المقاس زائدا الضغط الجوي. وإذا كان هناك تفريغ (خلخلة) vacuum فإن الضغط المطلق يعادل الضغط الجوي ناقصا التفريغ.



الشكل(4- 4)أنواع الضغط المختلفة.

P_{atm}: الضغط الجوي.

P_{abs}:الضغط المطلق مقاساً عند وجود الهواء.

P_g: وهو ضغط التفريغ أو الضغط المقاس.

$$P_g = P_{abs} - P_{atm.}$$

وإذا كان P_{atm} أكبر من P_{abs} فان:

$$P_v = P_{atm} - P_{abs.}$$

مثال(4- 9)

إذا كان ضغط التفريغ في مقياس بوردن يساوي310mmHg والضغط الجوي يساوي 100kpa أوجد الضغط المطلق بوحدة Kpa .

الحل:

نحول ضغط التفريغ من mmHg إلى kpa حيث أن:

$$760mmHg = 101.3kpa$$

وبالتالي يكون ضغط التفريغ يساوي

$$P_v = \frac{310mmHg * 101.3kpa}{760mmHg} = 41.32kpa$$

$$P_{abs.} = P - P_v = 101.3 - 41.32 = 59.98kpa$$

تغير الضغط مع الارتفاع Pressure Variation with Elevation**:**

يلاحظ أنه في الموائع الساكنة لا توجد إجهادات مماسة والقوى الوحيدة بين الأسطح المتجاورة هي قوى الضغط العمودية على الأسطح وبالتالي فإن الضغط عند أية نقطة على المائع الساكن يكون متساوياً في جميع الاتجاهات عند نفس الارتفاع. ويتغير الضغط من نقطة إلى أخرى تبعاً لتغير الارتفاع بين هاتين النقطتين إذا كان باتجاه عمودي أما في حالة الانتقال أفقياً فإن الضغط يبقى ثابتاً ولكن الملاحظ أيضاً أنه كلما ارتفعنا إلى الأعلى فإن الضغط يقل والعكس صحيح.والعلاقة التالية توضح هذه الآلية حيث إنه:

$$\gamma = -\frac{dP}{dh}$$

والإشارة هنا لأن العلاقة عكسية فبزيادة الارتفاع باتجاه الأعلى فإن الضغط يقل.

أي إنه يمكن أن نتوصل إلى العلاقة التالية وذلك عن طريق التعبير عن الضغط بعمود من المائع:

$$P = \gamma h$$

حيث أن h هو الارتفاع.

ولإيجاد الفرق في الضغط بين نقطتين تكون العلاقة:

$$P_1 - P_2 = \gamma(h_1 - h_2)$$

$$P_1 - P_2 = \rho g(h_1 - h_2)$$

مثال(4- 10)

احسب الضغط بوحدة bar عند عمق مقداره 10m في زيت كثافته النسبية 0.75 .

$$P = \gamma h = [(0.75 * 1000) * 9.81] * 10 = 73575\,pa$$

$$P = \frac{73575\,pa}{100000} * \frac{bar}{pa} = 0.73575 bar$$

القوى الهيدروستاتيكية على الأسطح Hydrostatics Forces on Surfaces:

القوة F والواقعة من سائل على مساحة مستويةA تساوي حاصل ضرب وزن السائل بوحدة الحجوم ρ.g وعمق مركز الثقل للمساحة h_{cg}. حيث إن هذا الضغط يكون متوزعاً بصورة متماثلة على السطح.

$$F = \rho g A h_{cg.}$$

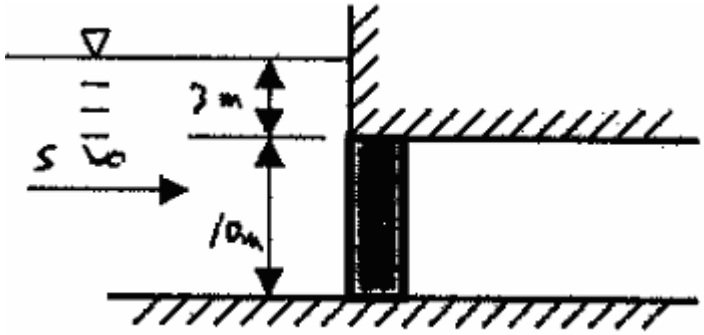
ويجب ملاحظة أن حاصل ضرب وزن وحدة الحجومρ.g بعمق مركز الثقل للمساحة $h_{c.g}$ يعطي الضغطP عند مركز الثقل للمساحة. ويمكن تحديد خط تأثير القوة بمركز الضغط الذي يمكن تعيينه تبعاً للمعادلة التالية:

$$Y_{cp} = \frac{I_{cg}}{h_{cg} A} + h_{cg}$$

حيث يسمى Y_{cp} ب عمق مركز الثقل وI_{cg} عزم قصور المساحة الذاتي حول محور ما مار بمركز الثقل.

مثال(4- 11)

احسب المحصلة F الناشئة عن تأثير الماء على المساحة المستطيلة والتي أبعادها10x1mالمبينة في الشكل التالي مع ملاحظة أنI_{cg} للمستطيل هي $bd^3/12$.



الشكل(4- 5) رسم توضيحي للمثال السابق

الحل:

نحسب عمق مركز تأثير القوة $h_{cg.}$ حيث إنه يساوي:

$$h_{cg.} = 3 + 10/2 = 8m$$

$$F = \rho g A h_{cg.}$$

$$F = 1000 * 9.81 * (10 * 1) * 8 = 784800N$$

نحسب عزم القصور الذاتي I_{cg}

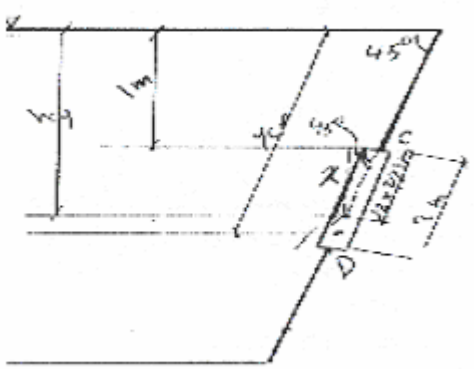
$$I_{cg} = \frac{bd^3}{12} = \frac{1 * 10^3}{12} = 83.33$$

$$Y_{cp} = \frac{I_{cg}}{h_{cg} A} + h_{cg}$$

$$Y_{cp} = \frac{83.33}{8 * (10 * 1)} + 8 = 1.042 + 8 = 9.042m$$

مثال(4- 12)

احسب محصلة القوى المؤثرة على المساحة المثلثية 1.25*2والموضحة في الشكل التالي مع مراعاة أن رأس المثلث عند النقطة C و أنI_{cg} للمثلث هي $bh^3 / 36$.



الشكل(4- 6) رسم توضيحي للمثال السابق

الحل:

$$F = \rho g A h_{cg.}$$

$$F = \rho g A h_{cg.}$$

مركز المثلث يكون على بعد2/3 من بدايته ولذلك فانX المبينة على الشكل والتي تمثل البعد العمودي للمركز من حفة البوابة المثلثية تكون:

$$x = 2 * \frac{2}{3} \sin 45 = 0.943m$$

نحسب عمق مركز تأثير القوة $h_{cg.}$ حيث إنه يساوي:

$$h_{cg.} = 1 + 0.943 = 1.943m$$

$$F = \rho g A h_{cg.}$$

$$F = 1000 * 9.81 * \left(\frac{1}{2} * 1.25 * 2 \right) * 1.943 = 23826N$$

نحسب عزم القصور الذاتي I_{cg}

$$I_{cg} = \frac{bh^3}{36} = \frac{1.25 * 2^3}{36} = 0.278$$

$$Y_{cp} = \frac{I_{cg}}{h_{cg} A} + h_{cg}$$

$$Y_{cp} = \frac{0.278}{1.943 * \frac{1}{2} * 1.25 * 2} + 1.943 = 0.11 + 1.943 = 2.053m$$

انتقال الحرارة و الموائع

المائع في حالة الحركة

الوحدة الخامسة: المائع في حالة الحركة

الجدارة: التعرف على بعض خواص الجريان للمائع وحساب السرعة والضغط والقوى ومعدلات التدفق الحجمي والكتلي للمائع.

الأهداف: أن يقوم المتدرب بالتعرف على الأنواع المختلفة للجريان والحسابات المتعلقة بكل نوع وتأثيرها على المعادلات الرياضية وتطبيق معادلتي الاستمرارية وبرنولي على حركة المائع والتنبؤ بسرعة وضغط المائع وإيجاد القوى المصاحبة لحركة المائع.

مستوى الأداء المطلوب: أن يصل المتدرب إلى إتقان الجدارة بنسبة 95٪.

الوقت المتوقع للتدريب على الجدارة: 6 ساعات.

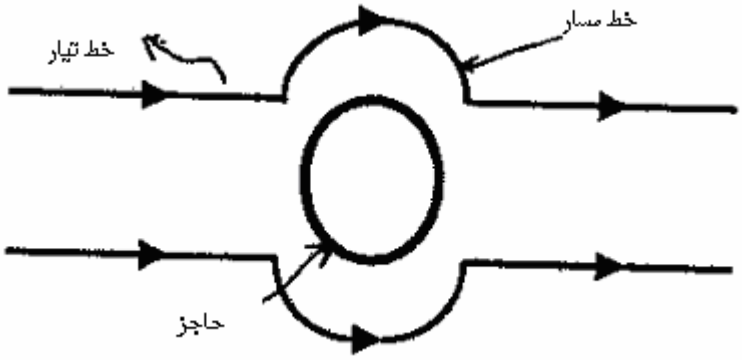
الوسائل المساعدة: لا يحتاج المتدرب إلى أية وسائل مساعدة.

متطلبات الجدارة:

1. التمييز بين الجريان الطباقي والاضطرابي وتأثير رقم رينولدز على حركة المائع.
2. اشتقاق معادلة الاستمرارية ومعادلة برنولي وفهم معنى التدفق الحجمي والكتلي .وكيفية تطبيق معادلة الاستمرارية ومعادلة برنولي على الأنظمة المتغيرة.
3. دراسة بعض التطبيقات المتعلقة بمعادلتي الاستمرارية وبرنولي وعلاقتها في إيجاد السرع ومعدلات التدفق.
4. دراسة الفواقد الاحتكاكية المصاحبة لحركة المائع والناتجة من الانحناءات والتغييرات التصميمية للأنابيب والأجهزة المختلفة.

المقدمة:

عند انسياب المائع المثالي في مجرى مستقيم فإن جميع جسيمات المائع تتحرك في خطوط متوازية وبسرعة متساوية وتكون سرعة المائع الملامس للجدار تساوي صفراً وتبدأ السرعة بالازدياد خلال مسافة قصيرة من الجدار إلى أن تصل السرعة إلى قيمتها العظمى في منتصف ذلك المجرى. والموائع غير القابلة للانضغاط تنساب كما لو أنها كتلة واحدة. ويمكن تصور حركة المائع عن طريق خطوطStreamlines تبين هذه الحركة.ويمكن الحصول على هذه الخطوط عن طريق بعض الأصباغ الخاصة التي تضاف إلى المائع فيظهر على شكل طبقات متراكبة تنساب فوق بعضها. وتكون السرعة عند تلك الخطوط مماسية عند أية لحظة وقد يتغير شكلها من فترة إلى أخرى.



الشكل(5- 1)خطوط حركة المائع أثناء مروره عن حاجز.

أنواع الجريان:

1. **الجريان المنتظمUniform flow**:وفيه تبقى السرعةVelocity ثابتة مقداراً واتجاها على جميع النقاط الموجودة على نفس الخط Streamline عند لحظة معينة.

$$\frac{dV}{ds} = 0$$

2. **الجريان غير المنتظم Non-uniform**:وفيه تتغير السرعة من مكان لآخر على خط تمثيل حركة المائع.

$$\frac{dV}{ds} \neq 0$$

3. **الجريان المستقرSteady flow**:وهو الجريان الذي لا تتغير فيه جميع ظروف وخصائص المائع مع الزمنTime.بمعنى أن معدل سريان الكتلة المارة على قطاع تكون واحدة عند كل نقطة من المدخل إلى المخرج.

$$\frac{dV}{dt}=0$$
$$\frac{dP}{dt}=0$$

4. **الجريان غير المستقر Unsteady flow**:وهو الجريان الذي تتغير فيه مواصفات المائع مع مرور الزمن كحركة الأمواج الدورية.

$$\frac{dV}{dt}\neq 0$$
$$\frac{dP}{dt}\neq 0$$

سريان مستقر ومنتظم　　سريان مستقر وغير منتظم

شكل(5- 2) أنواع الجريان.

5. **الجريان الصفائحيLaminar flow**: ويتميز هذا الجريان بأن جزيئات المائع تتحرك بشكل طبقات أو صفائح فوق بعضها بحيث لا يحدث أي اختلاط أو تداخل بين جزيئات الطبقات أثناء الحركة وكأن المائع يتحرك بانزلاق رقائق ذات سمك متناهي الصغر بالنسبة إلى الطبقات المتجاورة ومن أهم الأمثلة عليه العسل أو الشوربة أثناء انسكابها من الأوعية.

6. **الجريان الاضطرابيTurbulent Flow**:ويتميز هذا النوع من الجريان بأن السرعة للمائع تتغير بالاتجاه والمقدار بين لحظة وأخرى مع تميزه بعدم الانتظام. ويحدث هذا النوع من الجريان عندما يكون المائع سريعاً جداً ولا وجود لصفائح في هذا النوع من الجريان. وما يميز هذا النوع من الجريان أيضاً وجود فقاقيع واختلاطات في المائع.

إن سرعة المائع تتغير من الصفر عند الجدار إلى القيمة القصوى في منتصف الأنبوب والسرعة المتوسطة هي السرعة التي ستوجد لو أن المائع عند نفس المعدل الكتلي سوف يجري ككتلة واحدة

وبسرعة ثابتة. كما أن السريان عند مدخل الأنبوب لم يكن لديه الوقت للوصول إلى النمط الكامل وبالتالي فإن طول الأنبوبة مهم في دراسة المائع في هذه المنطقة.

رقم رينولدز Reynolds Number:

وهو عدد لا وحدة له يحدد شكل الجريان وهو يمثل النسبة بين قوة المانعةInertial force و قوة اللزوجةViscous force. ويعطى رقم رينولدز Re بالمعادلة التالية:

$$R_e = \frac{\rho V D}{\mu}$$

حيث أن:

μ هي معامل اللزوجة المطلقة.

ρهي الكثافة للمائع.

V هي سرعة المائع.

Dهو قطر الأنبوب.

ويكون شكل التدفق في الأنبوب على النحو التالي في حالتي الجريان الاضطرابي والطباقي.

ب أ

الشكل(5- 3)شكل المائع في الأنبوب أثناء الحركة (أ للجريان الطباقي , ب الاضطرابي).

وهناك طريقة لتحديد ما إذا كان المائع صفائحي أو اضطرابي عن طريق حساب رقم رينولدزRe حيث إنه وبناء على هذا الرقم وطبيعة السطح الذي يجري عليه المائع يمكن ذلك. ففي حالة الجريان الأنبوبي فإن رقمRe = 2200 هو الرقم الفاصل فإذا قل الرقم المحسوب عنه كان الجريان صفائحياً وإذا زاد عنه يكون الجريان اضطرابياً. أما إذا كان الجريان على سطح أفقي فإن الرقم 500000هو الرقم الفاصل فإذا قل رقم Reعنه كان الجريان صفائحياً وإلا فهو اضطرابي. وهناك بعض الأحيان مراحل انتقالية بين الحالتين الطباقية والاضطرابية فيكون مثلاً في حالة الأنبوب الرقم (2000-2300) يمثل الحالة الانتقالية.

معدل التدفق الحجمي Rate of Flow**:**

كمية المائع التي تنساب في وحدة الزمن من خلال مقطع معين تسمى بمعدل الانسياب ومعدل التدفق الحجمي هو معدل الحجم من المائع والذي يدخل من خلال مقطع محدد ويعطى الرمز Q ووحدته هي m^3/s وهناك أيضاً معدل التدفق الكتلي للمائع ويعطى الرمزM^o ووحدته هي Kg/s. وهما يعطيان بالمعادلة التالية:

$$M^0 = \rho Q$$

$$Q = VA$$

$$M^0 = \rho VA$$

مثال(5- 1)

يتدفق عصير في أنبوب قطره10cm بسرعة مقدارها1.5m/s إذا علمت أن كثافة العصير تساوي$1050kg/m^3$ احسب معدل التدفق الحجمي ومعدل التدفق الكتلي في الأنبوب؟

الحل:

نحسب مساحة الأنبوب:

$$A = \frac{\pi}{4} D^2 = \frac{\pi}{4} * 0.1^2 = 0.00785m^2$$

$$Q = VA$$

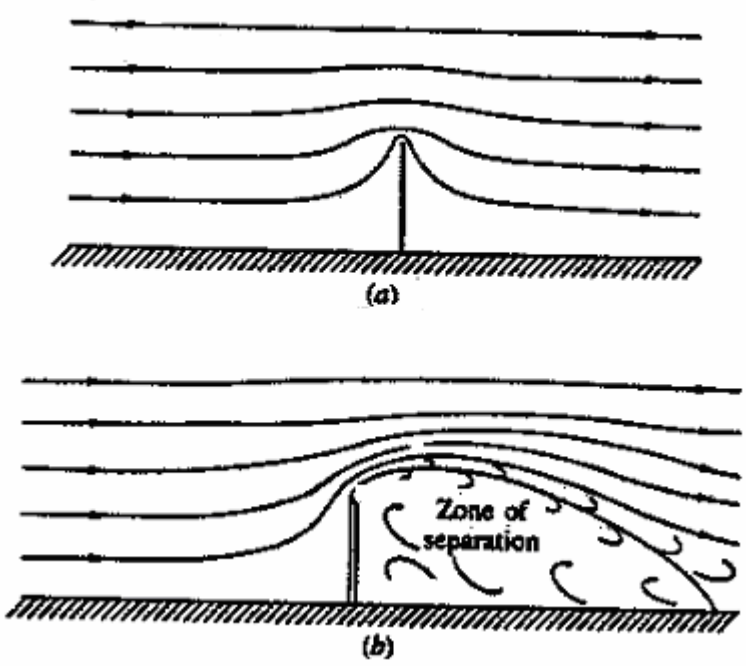
$$Q = 1.5 * 0.00785 = 0.0118m^3 / s$$

$$M^0 = \rho VA = 1050 * 1.5 * 0.00785 = 12.36kg / s$$

الانفصال Separation**:**

وهي نقطة لا يصل إليها المائع أثناء مروره حول بعض الأسطح ويتميز المائع بوجود كميات كبيرة من الفقاقيع التي تؤثر كثيراً على الأنابيب وتؤدي إلى تقليل كمية المائع المحسوبة نظرياً وكذلك تؤدي إلى تغيير شكل التدفق والضغط وغيرها. وتظهر هذه الظاهرة لعدة أسباب منها أنه قد يكون المائع متحركاً بسرعة كبيرة أو قد يكون السطح الذي يتدفق عليه خشناًRough أو شكله غير منتظم. وقد يستخدم رقم رينولدز للتنبؤ بإمكانية حدوث هذه الظاهرة في بعض الأحيان كما هو الحال في الأسطوانة

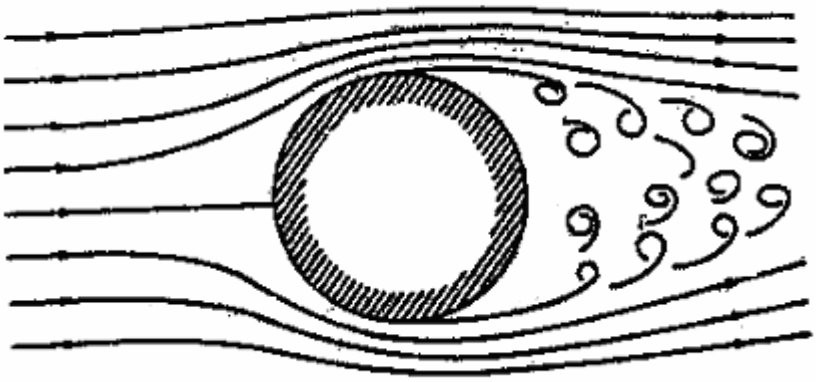
الدائرية حيث إنه إذا قل Re عن 50 فلا يمكن أن تحدث هذه الظاهرة بينما إذا زاد عنها فإن إمكانية حدوثه كبيرة جداً.



الشكل(5- 4)ظاهرة الانفصال.

التكهف Cavitation:

وهذه الظاهرة تحدث عندما يقل الضغط في الأنابيب إلى درجة أن الضغط للمائع يصل إلى أقل من الضغط البخاري لذلك المائع وبالتالي تحول المائع إلى بخار وظهور فقاقيع نتيجة لحدوث الغليان في المائع وهذه الظاهرة خطيرة على الآلات حيث تعمل على تآكلها وتقليل كفاءتها لأنها تنتج ضغوطاً ديناميكية عالية على الجدران الصلبة. وغالباً ما تحدث هذه الظاهرة في المناطق ذات السرعات العالية والمساحات الضيقة والتي ينخفض عندها الضغط كثيراً. وللتقليل من أثر هذه الظاهرة يمكن أن نرفع مستوى الضغط العام إما بوضع المعدة تحت منسوب السحب فينساب المائع إليها بتأثير الجاذبية أو بإعادة تصميمها بحيث نقلل نقاط الضغط المنخفض.



الشكل(5- 5)ظاهرة التكهف.

معادلة الاستمرارية Continuity Equation:

وهي مبنية على مبدأ حفظ الكتلة وتطبق على تدفق المائع وتنص على أن معدل تدفق الكتلة الخارجة من مكان محدد ناقص معدل تدفق الكتلة الداخلة إلى نفس المكان يساوي معدل تراكم المادة في ذلك المكان.

$$\sum M^{0}_{out} - \sum M^{0}_{in} = \frac{dM}{dt}$$

$$M^{0} = \rho A \frac{\Delta x}{\Delta t} = \rho A V \Rightarrow \left(\frac{kg}{m^3} * m^2 * \frac{m}{s} = \frac{kg}{s} \right)$$

حيث أن:

V هي السرعة للمائع.

A هي مساحة المقطع الذي يمر به المائع.

ρ هي كثافة المائع.

معادلة الاستمرارية في حالة التدفق المستقر أحادي الأبعاد في الأنابيب Continuity Equation For Steady One Dimensional Flow in Pipes:

في هذه الحالة والتي يكون بها مدخل واحد ومخرج واحد والجريان مستقر فإن معادلة الاستمرارية تصبح على الشكل التالي:

$$M_1^0 = M_2^0$$

$$\rho_1 A_1 V_1 = \rho_2 A_2 V_2$$

وفي حالة وجود مدخلين1 و 2 ومخرج 3 فإن معادلة الاستمرارية في الحالة المستقرة تصبح على الشكل التالي:

$$M_1^0 + M_2^0 = M_3^0$$

$$\rho_1 A_1 V_1 + \rho_2 A_2 V_2 = \rho_3 A_3 V_3$$

وعندما يكون المائع غير قابل للانضغاط فإن كثافته تكون ثابتة وغير متغيرة ولذلك فان:

$$\rho_1 = \rho_2 = \rho_3$$

فتصبح المعادلة على النحو التالي:

$$Q_1 = Q_2$$

مثال(5- 2)

ما هو أقل قطر ضروري ليسري 0.25Kg/s من الهواء خلال أنبوب وبسرعة مقدارها6m/s عند درجة حرارة$27C^0$ وضغط2.03bar؟

الحل:

نحسب أولاً كثافة الهواء من خلال قانون الغازات العام والذي سبق ذكره وذلك كمايلي:

$$PV = mRT$$

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{P}{RT} = \frac{2.03 * 101300}{8.314 * (27 + 273)} = 82.44 \frac{kg}{m^3}$$

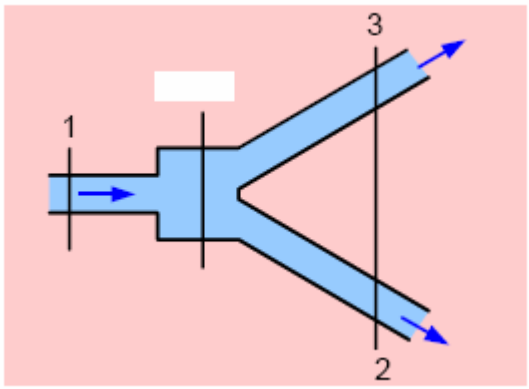
$$M^0 = \rho V A$$

$$0.25 = 82.44 * 6 * A \Rightarrow A = \frac{0.25}{82.44 * 6} = 5.054 X 10^{-4} m^2$$

$$A = \frac{\pi}{4} D^2 = 5.054X10^{-4} \Rightarrow D = \sqrt{\frac{5.054X10^{-4} * 4}{\pi}} = 0.025m$$

مثال(5- 3)

أنبوب قطره150mm ويسري به صلصة خضار بمعدل $0.08m^3/s$ ويتفرع إلى فرعين أحدهما قطره 50mm والآخر قطره 100mm فإذا كانت السرعة في الفرع الأول 12m/s فما هي السرعة في الفرع الثاني من الأنبوب انظر الشكل(5- 6)؟



شكل(5- 6)

الحل:

نحسب المساحة للأنبوب في الفرعين الأول والثاني والفرع الرئيس حيث أن:

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

$$A_1 = \frac{\pi}{4} * 0.15^2 = 0.0177m^2$$

$$A_2 = \frac{\pi}{4} * 0.05^2 = 0.00196m^2$$

$$A_3 = \frac{\pi}{4} * 0.1^2 = 0.00785m^2$$

وبتطبيق معادلة الاستمرارية نجد أن:

$$M_1^0 = M_2^0 + M_3^0$$

$$\rho_1 A_1 V_1 = \rho_2 A_2 V_2 + \rho_3 A_3 V_3$$

وبما أن المائع غير قابل للانضغاط فإن كثافته ثابتة وبالتالي:

$$A_1 V_1 = A_2 V_2 + A_3 V_3$$

$$0.08 = 0.00196 * 12 + 0.00785 * V_3 \Rightarrow V_3 = \frac{0.08 - (12 * 0.00196)}{0.00785} = 7.195 \frac{m}{s}$$

مثال(5- 4)

يتدفق هواء كثافته $1kg/m^3$ بمعدل 3kg/s في أنبوب قطره300mm وأثناء التدفق انخفض كل من الضغط ودرجة الحرارة مما أدى إلى تمدد الهواء نتيجة دخوله إلى أنبوب أضيق قطره200mm افترض أن كثافة الهواء أصبحت $0.8kg/m^3$ أوجد سرعة الهواء ومعدل التدفق الحجمي قبل وبعد التطبيق انظر الشكل(5- 7)؟

الحل:

نحسب مساحة الأنبوب قبل وبعد التطبيق:

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

$$A_1 = \frac{\pi}{4} * 0.3^2 = 0.0707 m^2$$

$$A_2 = \frac{\pi}{4} * 0.2^2 = 0.0314 m^2$$

ولإيجاد سرعة الهواء ومعدل التدفق الحجمي قبل التضيق

$$M_1^0 = \rho_1 V_1 A_1 = \rho_1 Q_1$$

$$1 = 1XV_1 * 0.0707 \Rightarrow V_1 = \frac{1}{0.0707} = 14.14 \frac{m}{s}$$

$$1 = 1 * Q_1 \Rightarrow Q_1 = 1 \frac{m^3}{s}$$

وبتطبيق معادلة الاستمرارية نجد:

$$M_1^0 = M_2^0$$

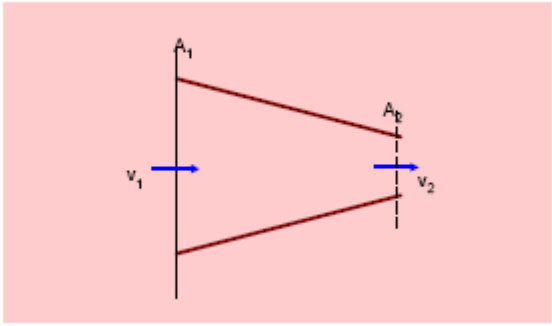
$$\rho_1 A_1 V_1 = \rho_2 A_2 V_2$$

$$1 = 0.8 * 0.0314 * V_2 \Rightarrow V_2 = \frac{1}{0.8 * 0.0314} = 39.81 \frac{m}{s}$$

ولإيجاد معدل التدفق الحجمي بعد التضيق:

$$M_1^0 = M_2^0 = \rho_2 Q_2$$

$$1 = 0.8 * Q_2 \Rightarrow Q_2 = \frac{1}{0.8} = 1.25 \frac{m^3}{s}$$



شكل(5- 7)

معادلة برنولي Bernoulli's Equation:

عندما يكون المائع ساكناً فإن الضغط يتغير نتيجة التغير في الارتفاع إلا أنه يمكن أن يحدث تغير لضغط المائع عندما يكون متحركاً نتيجة عاملين آخرين وهما التسارع ومقاومة اللزوجة. ففي الحالة التي تتسارع فيها كتلة من المائع لا بد من وجود قوة في اتجاه التسارع وهذه القوة تتأتى عن طريق الضغط وبالتالي فإن الضغط يجب أن يقل لتحدث الحركة. كذلك فإن اللزوجة للمائع تعمل عمل الاحتكاك كما في المواد الصلبة وتأثيرها دائماً عكس اتجاه الحركة للمائع. ومعادلة برنولي من المعادلات التي تحاول الجمع بين هذه المتغيرات الثلاثة. ألا أن هذه المعادلة تستخدم عندما يكون المائع مستقراً وغير قابل للانضغاط وهي تربط بين الضغط والسرعة والارتفاع بين أية نقطتين في المجال الذي يحتوي المائع مع تحقق شروط استخدام المعادلة. وهذه المعادلة هي معادلة قياسية

اشتقاق معادلة برنولي:

يمتلك المائع أنواع مختلفة من الطاقة وهي:

طاقة الوضع P.E:

$$P.E = mgz$$

طاقة الحركةK.E:

$$K.E = \frac{1}{2}mV^2$$

طاقة الجريانF.E:

$$F.E = P\frac{m}{\rho}$$

ومن قانون حفظ الطاقة فإن مقدار الطاقة الكلية للمائع هو مقدار ثابت E = Constant

$$F.E + K.E + P.E = Cons\tan t$$

$$P\frac{m}{\rho} + \frac{1}{2}mV^2 + mgz = Cons\tan t$$

وبالقسمة على m.g تصبح المعادلة على النحو التالي:

$$\frac{P}{\rho g} + \frac{V^2}{2g} + z = Cons\tan t$$

وإذا طبقت هذه المعادلة بين نقطتين فإنها تصبح على النحو التالي:

$$\frac{P_1}{\rho_1 g} + \frac{V_1^2}{2g} + z_1 = \frac{P_2}{\rho_2 g} + \frac{V_2^2}{2g} + z_2$$

وعند ملاحظة الوحدات للأجزاء نجد أن الحدات متشابهة وهي m فمثلاً لو أخذنا الوحدة ل $\frac{V_1^2}{2g}$ نجد أنها تساوي m. أن $\frac{P_1}{\rho_1 g}$ يسمى سمت الضغط وأن $\frac{V_1^2}{2g}$ يسمى سمت السرعة وأن Z_1 يسمى سمت الارتفاع وبالتالي فإن مجموع سمت الضغط والسرعة والارتفاع يساوي مقداراً ثابتاً.

شروط استخدام معادلة برنولي:

1. المائع غير قابل للانضغاط.
2. المائع غير لزج.
3. لا وجود لأجهزة ميكانيكية في منطقة تطبيق المعادلة مثل المضخة مثلاً.
4. لا وجود للفقد الحراري في المنطقة المنوي تطبيق معادلة برنولي عندها.

مثال(5- 5)

يسري الماء بين النقطتين A و B بتصريف حجمي مقداره $0.4m^3/s$ إذا علمت أن $D_A=0.3m$ و $D_B=0.6m$ و $Z_A=10m$ و $Z_B=15m$ وسمت الضغط عند النقطة Aيساوي 7m وبفرض عدم وجود فاقد للطاقة بين النقطتين A و B احسب سمت الضغط عند النقطة B .

الحل:

نحسب المساحة عند النقطتينAو B وهما:

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

$$A_A=\frac{\pi}{4}*0.3^2=0.0708m^2$$

$$A_B=\frac{\pi}{4}*0.6^2=0.2826m^2$$

نجد السرعة عند تلك النقطتين من خلال معادلة الاستمرارية حيث:

$$M_1^0=M_2^0$$

$$\rho_1 A_1 V_1=\rho_2 A_2 V_2$$

$$Q=A_1V_1=A_2V_2=0.4$$

$$0.4=0.0707*V_1\Rightarrow V_1=\frac{0.4}{0.0707}=5.66\,m/s$$

$$0.4=0.2826*V_2\Rightarrow V_2=\frac{0.4}{0.2826}=1.42\,m/s$$

نطبق معادلة برنولي بين النقطتين:

$$\frac{P_A}{\rho_A g}+\frac{V_A{}^2}{2g}+z_A=\frac{P_B}{\rho_B g}+\frac{V_B{}^2}{2g}+z_B$$

$$7+\frac{5.66^2}{2*9.81}+10=\frac{P_B}{\rho_B g}+\frac{1.42^2}{2*9.81}+15$$

$$7+1.63+10=\frac{P_B}{\rho_B g}+0.1+15$$

$$18.63=\frac{P_B}{\rho_B g}+15.1\Rightarrow\frac{P_B}{\rho_B g}=18.63-15.1=3.51m$$

مثال(5- 6)

تتضيق مساحة مقطع هوائي من $0.75m^2$ إلى $0.2m^2$. ما هو التغير في الضغط الذي يحدث عندما يتحرك $6kg/s$ من الهواء في الممر إذا علمنا أن كثافة الهواء $3.2kg/m^3$ وأهملنا الفواقد الاحتكاكية عند التضيق؟

الحل:

نحسب السرعة قبل وبعد التخصر

$$m_1^0=m_2^0\Rightarrow\rho_1A_1V_1=\rho_2A_2V_2$$

$$m_1^0=\rho_1A_1V_1=6=3.2*0.75*V_1\Rightarrow V_1=\frac{6}{3.2*0.75}=2.5\frac{m}{s}$$

$$m_2^0=\rho_2A_2V_2=6=3.2*0.2*V_2\Rightarrow V_2=\frac{6}{3.2*0.2}=9.375\frac{m}{s}$$

وبتطبيق معادلة برنولي:

$$\frac{P_1}{\rho_1 g}+\frac{V_1{}^2}{2g}+z_1=\frac{P_2}{\rho_2 g}+\frac{V_2{}^2}{2g}+z_2$$

وبإعادة الترتيب وبحذف الفرق في الارتفاع باعتبار أن الممر أفقي نصل إلى أن:

$$\frac{P_1}{\rho_1 g}-\frac{P_2}{\rho_2 g}=\frac{V_2^{\,2}}{2g}-\frac{V_1^{\,2}}{2g}$$

$$\frac{\Delta P}{\gamma}=\frac{V_2^2-V_1^2}{2g}=\frac{(9.375)^2-(2.5)^2}{2*9.81}=4.161$$

$$\Delta P=4.161*\gamma=4.161*3.2*9.81=130.625Pa$$

الجريان الثقلي عبر فتحة صغيرة في خزان مكشوف:

وفي هذه الحالة يكون كل من الضغط في طرفي الخزان مكشوف للهواء وبالتالي يكون مساوياً للضغط الجوي $P_1=P_2=P_{atm}$ كما أن السرعة في النقطة 1 والارتفاع عند النقطة 2 يكونان مساويين للصفر فتصبح معادلة برنولي كما يلي:

$$\frac{P_1}{\rho_1 g}+\frac{V_1^{\,2}}{2g}+z_1=\frac{P_2}{\rho_2 g}+\frac{V_2^{\,2}}{2g}+z_2$$

$$\frac{P_{atm}}{\rho_1 g}+0+z_1=\frac{P_{atm}}{\rho_2 g}+\frac{V_2^{\,2}}{2g}+0$$

وبتجميع المعادلة تصبح كمايلي:

$$V_2=\sqrt{2gz_1}$$

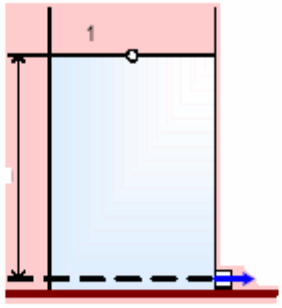
وهذه المعادلة تسمى معادلة تورشللي ولإيجاد التصريف الحجمي فإنها تصبح:

$$Q_2=A_2\sqrt{2gz_1}$$

ولكنه يحدث دائماً فواقد أثناء التدفق من الخزان نتيجة للاحتكاك وبالتالي فإن الكمية الحقيقية التي تمر منه تعطى بالعلاقة التالية:

$$Q_2=\phi A_2\sqrt{2gz_1}$$

حيث أن Φ هو معامل الجريان وتتراوح قيمة Φ بين 0.6 – 0.97.



الانسياب خلال فوهة من خزان كبير

شكل(5- 8)

مثال(5- 7)

خزان كبير فيه فتحة جانبية فإذا كان ارتفاع الماء عن مركز الفتحة هو 0.8m و كانت مساحة الفتحة $4cm^2$ وكان معدل التدفق $0.001m^3/s$ فما هو معامل الجريان للفتحة؟

$$0.001 = \phi \frac{4}{10000}\sqrt{2*9.81*0.8} \Rightarrow \phi = \frac{0.001}{0.00177} = 0.564$$

الجريان من خزان مغلق تحت الضغط:

وفي هذه الحالة يكون فقط الضغط عند المخرج مساوياً للضغط الجوي كذلك فإن الفرق في الارتفاعين قد يكون غير موجود على اعتبار أن القوة المسيرة للمائع هي القوة الناتجة من الضغط وبتبسيط معادلة برنولي نصل إلى المعادلة التالية:

$$\frac{P_1}{\rho_1 g} + \frac{V_1^2}{2g} + z_1 = \frac{P_2}{\rho_2 g} + \frac{V_2^2}{2g} + z_2$$

$$\frac{P_1}{\rho_1 g} + 0 + z_1 = \frac{P_{atm}}{\rho_2 g} + \frac{V_2^2}{2g} + z_2$$

$$z_1 = z_2$$

$$\frac{P_1}{\rho_1 g} - \frac{P_{atm}}{\rho_2 g} = \frac{V_2^2}{2g}$$

وبالتبسيط:

$$V_2 = \sqrt{\frac{2(P_1 - P_{atm})}{\rho}} = \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho}}$$

معادلة برنولي بالصورة المتكاملة(معادلة حفظ الطاقة):

وهذه هي المعادلة الشاملة حيث يؤخذ فيها بعين الاعتبار وجود المضخات والتوربينات و الفواقد التي يتعرض لها المائع أثناء حركته من مكان إلى آخر.

$$\frac{P_1}{\rho_1 g} + \frac{V_1^2}{2g} + z_1 + h_p = \frac{P_2}{\rho_2 g} + \frac{V_2^2}{2g} + z_2 + h_T + h_l$$

حيث أن h_T هي سمت التوربين و h_P هو سمت المضخة و h_L سمت الفواقد نتيجة الاحتكاك.

وتعطى قدرة المضخةPower بالعلاقة التالية:

$$P = \rho g Q h_p$$

وتعطى قدرة التوربينة بالعلاقة التالية:

$$P = \rho g Q h_T$$

مثال(5- 8)

خط أنابيب قطره 0.3m يحمل زيتاً كثافته النسبية S.g=0.811 وينساب بسرعة مقدارها 24.4m/s فإذا كان الضغطان عند النقطتين A وB هما 3.63bar و 2.9bar على التوالي حيث إن فرق المناسيب بين النقطتين A وB هو33.5m و 30.5m احسب فاقد الطاقة بين النقطتين .

الحل:

لاحظ أن قطر الأنبوب متساوي ولا يوجد تغير في كثافة الزيت ولذلك فإن السرعة عند النقطتين متساوية ويهمل أثرهما من معادلة برنولي كما أنه لا يوجد بين النقطتين مضخة أو توربين.

نحسب الوزن النوعي للزيت:

$$\gamma = \rho g = (0.811*1000)*9.81 = 7955.91 \, N/m^3$$

نعوض في معادلة برنولي:

$$\frac{P_A}{\rho_A g} + \frac{V_A^{\,2}}{2g} + z_A + h_p = \frac{P_B}{\rho_B g} + \frac{V_B^{\,2}}{2g} + z_B + h_T + h_l$$

$$\frac{3.63*101300}{7955.91} + \frac{V_A^{\,2}}{2g} + 33.5 + 0 = \frac{2.9*101300}{7955.91} + \frac{V_A^{\,2}}{2g} + 30.5 + 0 + h_l$$

$$46.22 + 0 + 33.5 + 0 = 38.65 + 0 + 30.5 + 0 + h_l$$

$$79.72 = 69.15 + h_l \Rightarrow h_l = 79.72 - 69.15 = 10.57m$$

مثال(5- 9)

يغذي خزان ماء أنبوب أفقي قطره0.15m وطوله244m ويتم تصريف الماء في الهواء بمعدل $0.036m^3/s$ أوجد الضغط عند منتصف الأنبوب بفرض أن الفاقد في الطاقة هو1.86m لكل 30m من طول الأنبوب علماً بأن الضغط الجوي يساوي1atm؟

الحل:

لا يوجد مضخة أو توربين وعند منتصف الأنبوب يكون الطول يساوي122m وبذلك يكون الفقد في الاحتكاك خلال تلك المسافة كما يلي:

$$h_l = \frac{122}{30} * 1.86 = 7.564m$$

نحسب المساحة عند المخرج وكذلك السرعة وذلك:

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

$$A = \frac{\pi}{4} * 0.15^2 = 0.0177m^2$$

$$V = \frac{Q}{A} = \frac{0.036}{0.0177} = 2.03 \, m/s$$

$$\frac{P_1}{\rho_1 g} + \frac{V_1^2}{2g} + z_1 + h_p = \frac{P_2}{\rho_2 g} + \frac{V_2^2}{2g} + z_2 + h_T + h_l$$

$$\frac{P_1}{9810} + 0 + 0 + 0 = \frac{101300}{9810} + \frac{2.03^2}{2X9.81} + 0 + 0 + 7.564$$

$$\frac{P_1}{9810} + 0 + 0 + 0 = 10.33 + 0.21 + 0 + 0 + 7.564$$

$$\frac{P_1}{9810} = 18.1 \Rightarrow P_1 = 18.1 * 9810 = 177561Pa = \frac{177561}{101300} = 1.753bar$$

الجريان غير القابل للانضغاط و معادلة دارسي Darcy Equation :

أثناء انتقال المائع في الأنابيب ونتيجة لوجود الاحتكاك بين المائع وبين جدار الأنبوب فإن ذلك يؤدي إلى حدوث فقد في طاقة الجريان للمائع ويعطى الفقد هذا بمعادلة دارسي وهي كالتالي:

$$\frac{\Delta P}{L} = \frac{f}{D}\left(\rho \frac{v^2}{2}\right)$$

حيث أن:

ΔP تمثل الفرق في الضغط بين نقطتين يتحرك بينهما المائع.

L تمثل طول الأنبوب.

f يمثل معامل الاحتكاك بين سطح الأنبوب والمائع.

D قطر الأنبوب.

ρ كثافة المائع.

V سرعة المائع في الأنبوب.

وبما أن الفرق في الضغط بين نقطتين مقاساً ب مانوميتر يساوي:

$$\Delta P = \rho g h$$

$$\gamma = \rho g$$

وبإعادة الترتيب مع قسمة المعادلة على γ نحصل على المعادلة النهائية التالية:

$$\frac{\Delta P}{\gamma} = h_l = \frac{fL}{D}\left(\frac{v^2}{2g}\right)$$

ويمكن استخدام هذه المعادلة في الحالات التي لا يعطى فيها الفواقد أثناء الجريان في الأنابيب.

تغير الضغوط في الأسطح المتوازية Flow Between Parallel Plates With a Pressure Gradient along the plates

في الشكل المبين لاحظ توزيع القوى على جانبي الأنبوب مع وجود الضغط و بتطبيق قانون نيوتن مع ملاحظة أن القوة الناتجة عن إجهاد القص تساوي حاصل ضرب المساحةA ب الإجهاد τ نصل إلى التالي:

$$\sum F_x = 0.0$$

$$PA - A(P + dP) - \tau_0(\pi D dx) = 0.0$$

وبمعرفة أن المساحة للأنابيب المستديرة هي:

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

وأن الاحتكاك السطحي هو:

$$\tau_0 = f\rho \frac{V^2}{8}$$

وبإعادة الترتيب نجد ما يلي:

$$\frac{dP}{dx} = \frac{-4\tau_0}{D}$$

وهذا يعني أن الفقد في الاحتكاك نتيجة الضغط في الأنابيب ثابتة الأقطار يعتمد على إجهاد القص.
وبالتقريب:

$$\frac{dP}{dx} = \frac{\Delta P}{L}$$

فتصبح المعادلة:

$$\frac{\Delta P}{L} = \frac{4\tau_0}{D}$$

وبخلطها مع معادلة دارسي نصل إلى المعادلة النهائية التالية:

$$\frac{f}{D} * \frac{1}{2} \rho V^2 = \frac{4\pi}{D} * \frac{f\rho V^2}{8}$$

الجريان الطباقي في الأنابيب المستديرة:

يعطى معامل الاحتكاك في حالة الجريان الطباقي في الأنابيب المستديرة بالعلاقة التالية:

$$f = \frac{64}{\mathrm{Re}}$$

كما أن توزيع السرعة في حالة الجريان الطباقي في الأنابيب المستديرة يمكن تصوره كما في الشكل أدناه ويمكن إعطاؤه بالمعادلة التالية:

$$u = U_{\max}\left(1 - \left(\frac{r}{R}\right)^2\right)$$

$$V = \frac{1}{2}U_{\max}$$

مثال(5- 10)

ما هو مقدار الفقد في الضغط نتيجة مرور مائع لزوجته الديناميكية 0.014Kg/m.s وكثافته النسبية0.848 بسرعة مقدارها2m/s في أنبوب طوله15m وقطره6mm ثم أوجد سمت الاحتكاك و إجهاد القص السطحي .

الحل:

نجد رقم رينولدز:

$$R_e = \frac{\rho VD}{\mu}$$

$$R_e = \frac{(0.848*1000)*2*\frac{6}{1000}}{0.014} = 726.86$$

وهذا يعني أن الجريان داخل الأنبوب طباقي.فيكون معامل الاحتكاك حسب المعادلة التالية:

$$f = \frac{64}{\mathrm{Re}} = \frac{64}{726.86} = 0.088$$

$$\frac{\Delta P}{L} = \frac{f}{D}\left(\rho\frac{v^2}{2}\right)$$

$$\Delta P = \frac{fL}{D}\left(\rho\frac{v^2}{2}\right) = \frac{0.088*15}{0.006}*(0.848*1000)\left(\frac{2^2}{2}\right) = 37.333kpa$$

مثال(5- 11)

يسري الكورسين في أنبوب أملس قطره100mm وطوله200m إذا علمت أن لزوجته المطلقة هي0.0032Kg/m.s وكثافته$83Kg/m^3$ وسرعته 0.003m/s أجب عما يلي:

1. حدد نوع الجريان.

$$R_e = \frac{\rho VD}{\mu} = \frac{83 * 3X10^{-3} * 0.1}{0.0032} = 7.78$$

وبذلك يكون الجريان طباقياً.

2. أوجد معامل الاحتكاك f.

$$f = \frac{64}{\mathrm{Re}} = \frac{64}{7.78} = 8.22$$

3. أوجد مقدار الفقد في الضغط في الأنبوبΔP.

$$\Delta P = \frac{fL}{D}\left(\rho\frac{v^2}{2}\right) = \frac{8.22 * 200}{0.1} * 83 * \left(\frac{0.003^2}{2}\right) = 6.114kpa$$

4. أوجد معدل التصريف الحجميQ.

$$Q = VA = V * \frac{\pi}{4}D^2$$

$$Q = 0.003 * \frac{\pi}{4} * 0.1^2 = 2.36X10^{-5}\ m^3/s$$

الجريان الطباقي في المجاريLaminar flow in Ducts:

وهنا نستخدم ما يسمى بالقطر الهيدروليكي D_h حيث يمثل النسبة بين أربعة أضعاف المساحة إلى المحيط ويعطى بالعلاقة التالية:

$$D_h = \frac{4A}{p}$$

حيث أن Aهي مساحة المجرى و Pهو محيط المجرى

و تصبح معادلة رقم رينولدز Re_{Dh} كالتالي:

$$R_{e.Dh} = \frac{\rho V D_h}{\mu}$$

وهناك جداول خاصة لعدة أشكال هندسية معروفة ففي حالة المستطيل الموضح في الشكل المرفق أدناه فإن الجدول التالي يستخدم للحصول على قيمة معامل الاحتكاك في داخل الأنبوب.

$\frac{a}{b}$	$\frac{1}{20}$	$\frac{1}{10}$	$\frac{1}{5}$	$\frac{1}{6}$	$\frac{1}{4}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{3}{4}$	1
$Re_{Dh} * f$	89.91	84.68	82.34	78.81	72.93	62.19	57.89	56.91

مثال(5- 12)

أوجد الفقد في الضغط في مجرى مستطيل الشكل أبعاده 4X3cm وطوله 200m عندما يمر به مائع لزوجته الديناميكية$0.014Ns/m^2$ وكثافته النسبية0.9 وسرعته0.8m/s؟

الحل:

نحسب القطر الهيدروليكي:

$$D_h = \frac{4A}{p}$$

$$D_h = \frac{4 * 0.04 * 0.03}{2(0.04 + 0.03)} = 0.0343m$$

$$R_{e.Dh} = \frac{\rho V D_h}{\mu}$$

$$R_{e.Dh} = \frac{0.9 * 1000 * 0.8 * 0.0343}{0.014} = 1764$$

ولكن من الجدول a=3 وb=4 ولذلك $\frac{a}{b}$ تساوي $\frac{3}{4}$ وعندها نجد أن:

$$\mathrm{Re}_{Dh} * f = 57.89$$

$$1764 * f = 57.89 \Rightarrow f = \frac{57.89}{1764} = 0.0328$$

$$\Delta P = \frac{fL}{D}\left(\rho \frac{v^2}{2}\right) = \frac{0.0328 * 200}{0.0343} * 0.9 * 1000 * \left(\frac{0.8^2}{2}\right) = 55.11 kpa$$

الجريان المضطرب في الأنابيب المستديرة Turbulent Flow in pipes:

وهناك ثلاث حالات إذا كان الأنبوب أملس حيث يتم استخدام:

1. معادلة بلازيوس:

إذا كان رقم رينولدز $100 \le \mathrm{Re} \le 2200$ فإن معامل الاحتكاك يعطى بالمعادلة التالية:

$$f = \frac{0.316}{\mathrm{Re}^{0.25}}$$

2. معادلة برانتل وتستخدم عندما يكون رقم رينولدز $2200 \le \mathrm{Re} \le 340000$ فإن معامل الاحتكاك يعطى بالمعادلة التالية:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 2Log_{10}\left(\mathrm{Re}\sqrt{f} - 0.8\right)$$

3. معادلة رايت وتستخدم في حالة الأنابيب الخشنة دائرية المقطع ويعطى معامل الاحتكاك بالمعادلة التالية:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 1.74 - 2Log_{10}\left(2\frac{K}{D} + \frac{18.7}{\mathrm{Re}\sqrt{f}}\right)$$

حيث أن K هو قطر حبيبات المادة الخشنة ويبين الجدول المرفق بعض المواد التي تصنع منها الأنابيب وأقطار حبيبات الخشونة لها.

نوع المادة	قطر حبيبات الخشونة(mm)K
فولاذ	5
خرسانة	1.65
حديد سكب	0.26
حديد مجلفن	0.15
حديد مطاوع مرن	0.045
أنبوب مسحوب	0.0015

مثال(5- 13)

ما هو مقدار الفقد في الضغط في أنبوب خشن قطره 100mm وطوله200m عندما يسري به زيت لزوجته0.05Kg/m.s وكثافته النسبية0.9 وبسرعة 3m/s إذا كان الأنبوب مصنوع من الفولاذ ؟

الحل:

$$R_e = \frac{\rho VD}{\mu} = \frac{0.9 * 1000 * 3 * 0.1}{0.05} = 5400 \rangle 2200$$

الجريان اضطرابي والأنبوب خشن ومصنوع من الفولاذ ولذلك نستخدم المعادلة التالية:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 1.74 - 2Log_{10}\left(2\frac{K}{D} + \frac{18.7}{\mathrm{Re}\sqrt{f}}\right)$$

نجد أن قيمةK من الجدول:

$K = 5mm$ نعوض في المعادلة التالية ولكنها تحل عن طريق المحاولة والخطأ حيث نعوض قيمة لمعامل الاحتكاك ونجد الطرف الأيمن والطرف الأيسر فإن كان هناك فرق بين الطرفين نعيد المحاولة إلى أن يتساويا ونتوقف.

f	الطرف الأيسر	الطرف الأيمن
0.1	3.162	3.64
0.08	3.53	3.63
0.075	3.651	3.637
0.0755	3.632	3.634

وبالتالي نجد أن معامل الاحتكاك يساوي0.0758.

$$\Delta P = \frac{fL}{D}\left(\rho\frac{v^2}{2}\right) = \frac{0.0758 * 200}{0.1} * 0.9 * 1000 * \left(\frac{3^2}{2}\right) = 613.98kpa$$

الفواقد في الضغط نتيجة التغير في شكل الجريان Losses in Pressure due to changes in the flow: Pattern

1. الفواقد بسب المداخل والمخارج Losses in a Pipe Inlet and Outlet:

عندما يدخل المائع إلى أنبوب معين تنشأ ما تسمى بطبقة حدية وتؤدي هذه الطبقة إلى حدوث فواقد في الضغط وتعطى هذه الفواقد بالمعادلة التالية:

$$h_L = K\frac{V^2}{2g}$$

حيث أن K يساوي (0.1) في حالة مدخل الأنبوب المصنوع جيداً و بشكل مستدير وفي حالتي المدخل و المخرج الفجائي فإنه يساوي0.5

2) الفقد في الأكواع المنحنيةLosses Through an Elbow:

وفي هذه الحالة يحدث الانفصال حيث يعمل على تقليل كمية المائع المتدفقة إلى الأنبوب ويعتمد هذا الفقد على شكل الكوع ونصف قطره حيث يقل الفقد كلما ازداد القطر وكذلك يعتمد على طول الأنبوب فكلما ازداد الطول ازداد الفقد. ويعبر عن طول الأنبوب بالطول المكافئ من خلال الجدول المرفق والذي يبين قيم K حسب شكل وقطر الكوع.

$\frac{L_e}{D}$	المحبس أو الكوع
340	Globe Valve
13	Gate Valve
142	Check Valve
110	Batter Fhb Valve
36	كوع 90^0

$$\frac{\Delta P}{\gamma} = h_l = f\frac{L_e}{D}\left(\frac{v^2}{2g}\right)$$

مثال(5- 14)

يتدفق حليب كثافته$1050kg/m^3$ بمعدل$0.3m^3/s$ في أنبوب قطره10cm وأثناء حركته مر الحليب من خلالGlope Valve جد الفرق في الضغط قبل وبعد المحبس علماً بأن معامل اللزوجة للحليب $0.0012N.s/m^2$؟

الحل:

$$V = \frac{Q}{A} = \frac{Q}{\frac{\pi}{4}D^2} = \frac{0.3}{\frac{\pi}{4}0.1^2} = 38.21m/s$$

$$R_e = \frac{\rho VD}{\mu} = \frac{1050*38.21*0.1}{0.0012} = 3343375\rangle 2200$$

الجريان اضطربي ولذلك نحسب معامل الاحتكاك عن طريق معادلة رايت

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 1.74 - 2Log_{10}\left(2\frac{K}{D} + \frac{18.7}{\mathrm{Re}\sqrt{f}}\right)$$

وباستخدام طريقة المحاولة والخطأ نجد أن معامل الاحتكاك يساوي0.025.

ومن الجدول نجد أن $\frac{L_e}{D}$ تساوي 340

$$\frac{\Delta P}{\gamma} = h_l = f\frac{L_e}{D}\left(\frac{v^2}{2g}\right)$$

$$\frac{\Delta P}{\gamma} = h_l = 0.025*340*\left(\frac{38.21^2}{2*9.81}\right) = 177738$$

$$\Delta P = 9.81*1050*177738 = 1830790.269\,pa$$

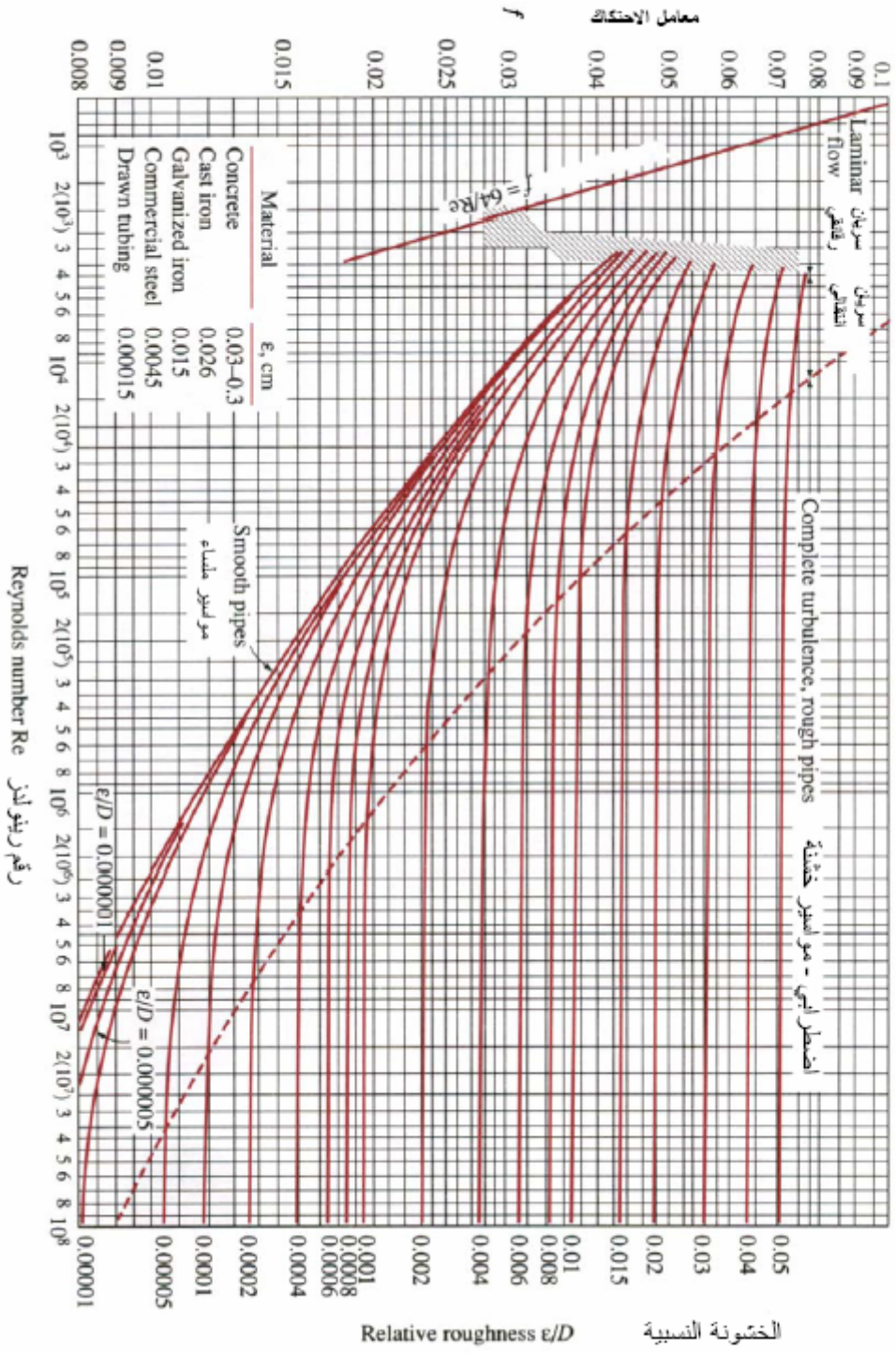
3) التضيق المفاجئ في الأنابيب Abrupt Contraction in Pipes:

ويتم في هذه الحالة حساب معامل التخصر وهو عبارة عن النسبة بين السرعة في المخرج إلى السرعة في المدخل ويعطى الرمز Cc ويمثل كما يلي:

$$C_c = \frac{V_2}{V_1}$$

ويكون الفقد في هذه الحالة يساوي:

$$h_L = \frac{(V_2 - V_1)^2}{2g}$$



شكل(5- 9) مخطط مودي.

مثال(5- 15)

يتدفق ماء في أنبوب قطره 20cm بمعدل 110Litter/s ثم يتسع الأنبوب فجأة إلى قطر 30Cm أوجد سمت الاحتكاك الضائع نتيجة التوسع والفقد في الضغط؟

الحل:

نجد السرعة قبل وبعد التوسع

$$V_1 = \frac{Q}{A} = \frac{Q}{\frac{\pi}{4}D^2} = \frac{0.11}{\frac{\pi}{4}*0.2^2} = 3.5m/s$$

$$V_2 = \frac{Q}{A} = \frac{Q}{\frac{\pi}{4}D^2} = \frac{0.11}{\frac{\pi}{4}*0.3^2} = 1.56m/s$$

$$h_L = \frac{(V_2 - V_1)^2}{2g}$$

$$h_L = \frac{(1.56 - 3.5)^2}{2*9.81} = 0.192m$$

ولإيجاد الفقد في الضغط نطبق معادلة برنولي بين النقطتين1 و2 وذلك:

$$\frac{P_1}{\rho_1 g} + \frac{V_1^2}{2g} + z_1 + h_p = \frac{P_2}{\rho_2 g} + \frac{V_2^2}{2g} + z_2 + h_T + h_l$$

$$\frac{P_1}{\rho_1 g} + \frac{3.5^2}{2*9.81} + 0 + 0 = \frac{P_2}{\rho_2 g} + \frac{1.56^2}{2*9.81} + 0 + 0 + 0.192$$

$$\frac{P_1 - P_2}{\rho_1 g} = \frac{1.56^2}{2*9.81} + 0.192 - \frac{3.5^2}{2*9.81}$$

$$\frac{P_1 - P_2}{\rho_1 g} = 0.124 + 0.192 - 0.624 = -0.308$$

$$\Delta P = -0.308 * 9810 = 3021.48Pa$$

مثال(5- 16)

زيت لزوجته الديناميكية0.09Kg/m.s وكثافته النسبية 0.75 يتدفق من خزان على ارتفاع مجهول إلى خزان آخر على ارتفاع 130m بمعدل $0.028m^3/s$. فإذا كان قطر الأنبوب يساوي15cm وطوله 200m أوجد الارتفاع الأول علماً بأن الخزانين مفتوحان على الهواء؟

الحل:

$$V = \frac{Q}{A} = \frac{Q}{\frac{\pi}{4}D^2} = \frac{0.028}{\frac{\pi}{4} * 0.15^2} = 1.59m/s$$

$$R_e = \frac{\rho VD}{\mu} = \frac{0.75 * 1000 * 1.59 * 0.15}{0.09} = 1987.5 \langle 2200$$

الجريان طباقي

$$f = \frac{64}{\mathrm{Re}}$$

$$f = \frac{64}{1987.5} = 0.0322$$

$$h_l = f\frac{L}{D}\left(\frac{v^2}{2g}\right)$$

$$h_l = 0.0322 * \frac{200}{0.15} * \left(\frac{1.59^2}{2 * 9.81}\right) = 5.53m$$

$$\frac{P_1}{\rho_1 g} + \frac{V_1^2}{2g} + z_1 + h_p = \frac{P_2}{\rho_2 g} + \frac{V_2^2}{2g} + z_2 + h_T + h_l$$

$$0 + \frac{1.59^2}{2 * 9.81} + z_1 + 0 = 0 + \frac{1.59^2}{2 * 9.81} + 130 + 0 + 5.53$$

$$z_1 = 135.53m$$

القطر الاسمي (mm)	القطر الحقيقي (mm)	كوع		تي T		صمام كروي (فاتح)	صمام بوابي
		90°	45°	فرعية	مستقيمة		
15	15.80	0.6	0.4	0.9	0.2	5	0.2
20	20.93	0.8	0.5	1.2	0.2	6	0.25
2.5	26.46	0.9	0.6	1.5	0.3	8	0.28
35	34.04	1.2	0.7	1.8	0.4	11	0.42
40	40.90	1.5	0.9	2.1	0.5	14	0.51
50	52.51	2.1	1.2	3.0	0.6	17	0.65
60	62.65	2.4	1.5	3.7	0.8	20	0.79
75	77.92	3.0	1.8	4.6	0.9	24	0.90
100	102.3	4.3	2.4	6.4	1.2	38	1.27
125	128.2	5.2	3.0	7.6	1.5	43	1.70
150	154.1	6.1	3.7	9.1	1.8	50	2.00

S_2/S_1	K_c
0	0.5
0.1	0.46
0.2	0.42
0.3	0.38
0.4	0.34
0.5	0.30
0.6	0.26
0.7	0.22
0.8	0.15
0.9	0.075

قيم L_e/D لوصلات الأنابيب

كوع ٩٠°	٣٢
كوع ٤٥°	١٥
حرف T	٢٠
حرف T خلال فتحة جانبية	٧٠
الأزدواجات	مهمل

الوصلات الناعمة	
كوع بنصف قطر طويل	٣
كوع بنصف قطر قصير	١٠
كوع مربع	٥٠
الصمامات	
صمام قلب مفتوح	٣٠٠
صمام سكينة مفتوح	٧
صمام سكينة نصف مفتوح	٢٠٠

جريان الموائع اللانيوتونية Non-Newtonian Fluid Flow:

في المواد النيوتونية يتحكم في التدفق لها قانون نيوتن الثاني حيث إن الإجهاد على جسم ما يتناسب تناسباً طردياً مع الانفعال والذي يحكمه قانون هوك Hook's Law:

$$\tau = E\gamma$$

حيث أن E هي معامل المرونة و γ هو الانفعال و τ هو الإجهاد وإذا أثرت قوة على مادة صلبة فإنها لا تتحرك إلا إذا وصلنا إلى إجهاد الخضوع Yield Stress. ومعظم المواد الغذائية تسلك سلوكاً مختلطاً بين المواد اللزجة والمواد المرنة وبالتالي فإن العلاقة التي تحكم تناسب إجهاد القص مع معدل القص علاقة غير خطية وتعتمد على كل من الزمن ومعدل التناقص في سرعة الطبقات على بعضها.

ولقد وجد أن أنسب علاقة لتمثيل السلوك غير النيوتوني رياضياً هو استخدام قانون الأسPower Law:

$$\tau = K\gamma^n$$

حيث أن :Kهو معامل القوام وهو ما يعادل معامل اللزوجة في حالة الموائع النيوتونية.

n هو الأس ويساوي الرقم واحد في حالة الموائع النيوتونية.

وتقسم الموائع غير النيوتونية إلى ما يلي:

1. **موائع بنجهام بلاستيكBingham Plastic Fluids:**

وهي مواد لها خاصية عدم البدء بالسريان أو التدفق إلا بعد الوصول إلى إجهاد الخضوع وبعدها يكون السريان لزجاً وتعطى معادلة الإجهاد لها بالتالي:

$$\tau = -K\frac{du}{dy} + \tau_y$$

2. **موائع شبيهة البلاستيك Pseudo Plastic Fluids:**

وهي تمثل معظم السوائل غير النيوتونية حيث يكون هناك تناقص في إجهاد القص كلما زاد معدل القص وبذلك تكون قيمة n أقل من الواحد الصحيح ويكون منحنى السريان مقعراً إلى الأسفل.

3. **موائع ديلاتينية Dilatent Fluids:**

وفيها يكون هناك زيادة في إجهاد القص كلما زاد معدل القص وتكون قيمة n أكبر من الواحد الصحيح ويكون منحنى السريان مقعراً إلى الأعلى.

4. **موائع مختلطة Mixed Fluids:**

وفيها يكون هناك إجهاد خضوع قبل السريان شبه البلاستيكي وتمثل بالمعادلة التالية:

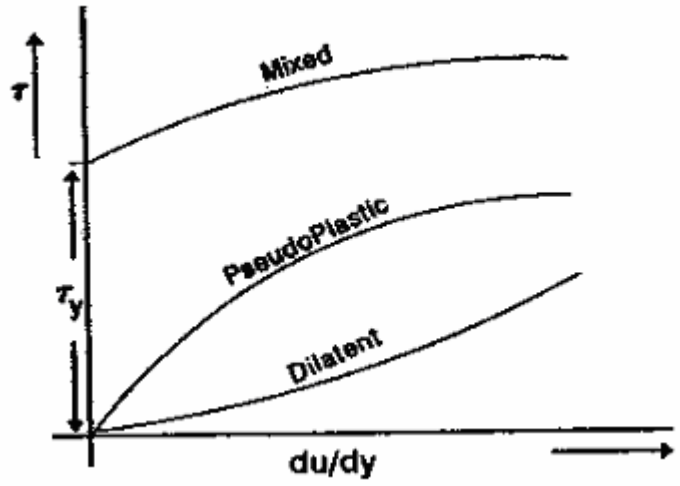
$$\tau = -K\left(\frac{du}{dy}\right)^n + \tau_y$$

وهي الحالة العامة للموائع المختلطة:

وتكون $n < 1$ $\tau_y = 0.0$ في حالة المواد شبه البلاستيكية.

وتكون $n > 1$ $\tau_y = 0.0$ في حالة المواد شبه الديلاتينية.

وتتأثر اللزوجة والقوام بدرجة الحرارة حيث يتناسب معامل اللزوجة أو القوام تناسباً عكسياً مع درجة الحرارة المطلقة للمائع.



الشكل(5- 10)إجهاد الموائع تبعاً للانفعال.

والموائع غير النيوتونية يمكن أن تظهر كلاً من السريان الطباقي والسريان الاضطرابي في الأنابيب. ولكن معظم الموائع المميزة بالسلوك غير النيوتوني لها قوام لزج وبدرجة عالية مما يجعل السريان الاضطرابي صعب التحقق. وللأسباب العملية في عمليات التصنيع الغذائي ستكون مثل هذه الموائع دائماً في سريان انسيابي وتتغير السرعة في سريان الأنابيب من صفر عند الجدار إلى أقصى ما يمكن عند المركز. وبمعلومية أن منحنى السرعة عند المركز مفلطحاً أو مستوياً فإن ذلك يؤدي إلى أن يكون المماس للسرعة مع نصف القطر يساوي صفراً بمعنى أن $\frac{dV}{dr}=0$ وبالتالي لا يوجد إجهاد قص في تلك النقطة ولذلك فإن جهد القص يتغير من صفر عند المركز إلى أقصى ما يمكن عند الجدران. وبذلك سوف يظهر المائع شبيه البلاستيكي لزوجة ظاهرية أعلى قرب المركز ولزوجة ظاهرية أقل أقرب الجدران,كما أن منحنى السرعة يكون أكثر تفلطحاً من منحنى السرعة في حالة المائع النيوتوني واقرب إلى منحنى السرعة الاضطرابي للمائع النيوتوني. وفي الحالة القصوى للقوام اللزج جداً يمكن أن يتحرك المائع ككتلة واحدة وبمنحنى سرعة مسطح تماماً ما عدا طبقة رقيقة جداً مجاورة للجدار.

ويعبر عن الفقد في الضغط في حالة السريان الطباقي للمائع شبيه البلاستيكي بالمعادلة التالية:

$$\frac{D\Delta P}{4L}=K\left(\frac{1+3n}{4n}\right)^n\left(\frac{8V}{D}\right)^n$$

حيث أنn=1 للموائع النيوتونية وتبين المعادلة أنه عندما تكون n<1 فإن الفقد في الضغط يزداد بدرجة أقل مع السرعة عما في الموائع النيوتونية وذلك لأن منحنى سرعة أكثر تفلطحاً يعني إجهاد أقل وبالتالي فقد أقل في الضغط.

إنه من الأهمية أن ندرس تأثير نوع السريان على معامل الاحتكاك بين طبقات المائع وعلى الوعاء الذي تحتويه. وحيث أن معظم المواد الغذائية تسلك سلوكاً غير نيوتونياً وتتأثر بدرجة الحرارة أثناء معاملة المواد حرارياً, فإنه يتطلب تطوير معادلات رياضية للموائع غير النيوتونية لإمكان استخدامها لوصف سلوك المائع أثناء سريانها وبالأخص داخل الأنابيب. وقد تم تطوير رقم رينولدز جديد ويسمى رقم رينولدز العام Generalized Reynolds Number ويرمز له بالرمز G_{Re} ويعطى من خلال المعادلة التالية:

$$G_{\mathrm{Re}}=\frac{\rho u^{2-n}D^n}{\left(2^{n-3}K\right)\left(\frac{3n+1}{n}\right)^n}$$

وهذا الرقم يتغير بتغير نفس المعاملات بالنسبة للرقم العادي ولكن يختلفان في أن القيمة ستتغير مع تغير قيمة الأس n ونلاحظ أن G_{Re} يساوي Reالعادي عندما تكون قيمة n = 1.0 وبالتالي تتحول K إلى μ

وفي حالة السريان الطباقي يكون G_{Re} أقل من2200. أما في حالة الجريان الاضطرابي فإنه يكون أكبر من2200. ويكون معامل الاحتكاك (Friction Factor) يساوي:

$$f = \frac{64}{G_{\mathrm{Re}}}$$

وفي حالة السريان الاضطرابي يكون معامل الاحتكاك Friction Factor يساوي:

$$f = \frac{0.316}{G_{\mathrm{Re}}^{0.25}}$$

وتتم معادلة الطاقة الحركية للمائع غير النيوتوني حيث تصبح:

$$K.E = \frac{u^2}{2ag}$$

حيث أن:

$$a = \frac{(4n+2)(5n+3)}{3(3n+1)^2}$$

وتكون a = 1.0 عندما يكون n = 1.0 (أي إن السائل نيوتوني).

مثال(5- 17)

مركز المشمش كثافته$1040kg/m^3$ يسري في أنبوب قطره2.54cm وبسرعة سريان متوسطة مقدارها 0.6m/s احسب قيمة رقم رينولدز وحدد نوع السريان إذا علمت أن كلاً من قيمة معامل القوام K =20 $pa.s^n$ وقيمة الأس n = 0.3 . واحسب أيضاً رقم رينولدز في حالة سريان مياه نقية في نفس الأنبوب .

الحل:

$$G_{\mathrm{Re}} = \frac{\rho u^{2-n} D^n}{\left(2^{n-3} K\right)\left(\frac{3n+1}{n}\right)^n}$$

$$G_{\mathrm{Re}} = \frac{1040 * 0.6^{2-0.3} * 0.0254^{0.3}}{\left(2^{0.3-3} * 20\right)\left(\frac{3*0.3+1}{0.3}\right)^{0.3}} = 27.1 \langle 2200$$

الجريان طباقي أما إذا كان المائع المتحرك هو الماء فيكون رقم رينولدز كما يلي:

$$\mathrm{Re} = \frac{\rho V D}{\mu}$$

$$\mathrm{Re} = \frac{1000 * 0.6 * 0.0254}{0.01} = 1524 \langle 2200$$

الجريان طباقي

مثال(5- 18)

يتم ضخ صلصة التفاح درجة حرارتها297K خلال أنبوب قطره 5cm وبسرعة متوسطة مقدارها 3m/s أوجد نوع السريان واحسب قيمة معامل الاحتكاك إذا كانت كثافة الصلصة$1100Kg/m^3$ و قيمة معامل القوام $K = 0.66\ pa.s^n$ و الأس $n = 0.408$.

الحل:

نحدد نوع الجريان:

$$G_{\mathrm{Re}} = \frac{\rho u^{2-n} D^n}{\left(2^{n-3} K\right)\left(\frac{3n+1}{n}\right)^n}$$

$$G_{\mathrm{Re}} = \frac{1100 * 3^{2-0.408} * 0.05^{0.408}}{\left(2^{0.408-3} * 0.66\right)\left(\frac{3 * 0.408 + 1}{0.408}\right)^{0.408}} = 8519.1$$

الجريان اضطرابي ولذلك فإن معامل الاحتكاك يحسب من المعادلة التالية:

$$f = \frac{0.316}{G_{\mathrm{Re}}{}^{0.25}}$$

$$f = \frac{0.316}{8519.1^{0.25}} = 0.0142$$

مثال(5- 19)

يتم ضخ عصير الطماطم بسرعة مقدارها 62.27 Cm/s في أنبوب قطره2.54cm فإذا كانت كثافة عصير الطماطم تساوي$1.13g/Cm^3$ ومعامل القوام K = 125 وقيمة الأس اللانيوتوني n = 0.45.احسب الفرق في ضغط العصير لمتر طولي واحد من الأنبوب .

الحل:

$$G_{\mathrm{Re}} = \frac{\rho u^{2-n} D^n}{\left(2^{n-3} K\right)\left(\frac{3n+1}{n}\right)^n}$$

$$G_{\mathrm{Re}} = \frac{\left(1.13 * \frac{1000000}{1000}\right) * \frac{62.27}{100}^{2-0.45} * \frac{2.54}{100}^{0.45}}{\left(2^{0.45-3} * 125\right)\left(\frac{3 * 0.45 + 1}{0.45}\right)^{0.45}} = 2.794$$

$$f = \frac{64}{G_{\mathrm{Re}}}$$

$$f = \frac{64}{2.794} = 22.89$$

$$\Delta P = \frac{fL}{D}\left(\rho \frac{v^2}{2}\right)$$

$$\Delta P = \frac{22.89 * 1}{0.0254}\left(1130 * \frac{0.6227^2}{2}\right) = 197.4 kpa$$

مثال(5- 20)

يتم تسخين عصير طماطم في مبادل حراري ذي أنابيب عددها عشرون أنبوباً وطول المبادل 7m وقطر كل أنبوب 1.905cm. فإذا كان معدل السريان الحجمي 40Litters/min احسب مقدار الفقد في الضغط خلال المبادل الحراري إذا علمت أن كثافة عصير الطماطم $1013Kg/m^3$ ومعامل القوام K = 7.13*E-3 وقيمة الأس اللانيوتوني n = 0.48 .

الحل:نحسب السرعة في الأنبوب:

$$V = \frac{Q}{20 * A}$$

$$V = \frac{\frac{40}{60 * 1000}}{\frac{\pi}{4} * 0.01905^2} = 0.117 m/s$$

$$G_{\mathrm{Re}} = \frac{\rho u^{2-n} D^n}{\left(2^{n-3} K\right)\left(\frac{3n+1}{n}\right)^n}$$

$$G_{\mathrm{Re}} = \frac{1013 * 0.117^{2-0.48} * 0.01905^{0.48}}{\left(2^{0.48-3} * 7.13X10^{-3}\right)\left(\frac{3 * 0.48 + 1}{0.48}\right)^{0.48}} = 2138.73$$

$$f = \frac{64}{G_{\mathrm{Re}}}$$

$$f = \frac{64}{2138.73} = 0.03$$

$$\Delta P = \frac{fL}{D}\left(\rho \frac{v^2}{2}\right)$$

$$\Delta P = \frac{0.03 * 7}{0.01905}\left(1013 \frac{0.117^2}{2}\right) = 76.24 pa * 20 = 1524.78 pa$$

انتقال الحرارة والموائع

المضخات

الوحدة السادسة : المضخات

الجدارة: التعرف على الأنواع المختلفة من المضخات.وكيفية اختيارها

الأهداف: معرفة كيفية تشغيل المضخات وأهم المشاكل التي تواجه الأنواع المختلفة من المضخات وعملية اختيار كل مضخة بناء على الغرض المطلوب منها.

مستوى الأداء المطلوب: أن يصل المتدرب إلى إتقان الجدارة بنسبة 95٪.

الوقت المتوقع للتدريب على الجدارة: 4 ساعات.

الوسائل المساعدة: لا يحتاج المتدرب إلى أية وسائل مساعدة.

متطلبات الجدارة:

1. أن يقوم المتدرب بالتفريق بين الأنواع المختلفة للمضخات وتقويم أداء كل مضخة وقراءة منحنى المضخة وكيفية المشابهة بين المضخات
2. التعرف على كيفية توصيل المضخات على التوالي وعلى التوازي والتغييرات التي تصاحب منحنى المضخة نتيجة هذا التوصيل.
3. التعرف على الاستخدامات المتعددة للمضخات في منشآت التصنيع الغذائي وأهم المشاكل التي تواجه المضخة وخاصة عند التشغيل.

المقدمة:

هناك طرق مختلفة لتحريك الموائع مثل قاذفات البخار والماء وكذلك السريان نتيجة لتأثير الجاذبية الأرضية والحمل الطبيعي. ومن الأجهزة الميكانيكية التي تهتم كثيراً بنقل الموائع والغازات هي المضخات حيث تستخدم في رفع ودفع السوائل من مستوى إلى مستوى آخر. وتعمل كما هو الحال في المراوح والضواغط إلا أنه المضخات تستخدم لدفع السوائل إلا مضخات التفريغ بينما المراوح والضواغط تعمل لدفع الغازات. وتنقسم المضخات إلى التالي:

1. **مضخات ذات إزاحة إيجابية** Positive Displacement Pumps

وهذه المضخات تؤثر بشكل مباشر على حجم محدد من المائع لدفعه إلى ضغط أعلى وبالتالي لا يمكن التحكم بمعدل السريان عن طريق صمام على خط السحب.ويتم توليد ضغوط عالية جداً في هذا النوع من المضخات كما أنها تتعامل مع موائع ذات لزوجة عالية جداً. وتنقل المضخة المائع على دفعات متقطعة إلى تجويف المضخة ويجبر على الخروج من خط الطرد. ويحسب معدل التصريف الحجمي بعدد الدفعات في المنقولة في وحدة زمنية محددة وبالتالي فإن معدل التصريف يعتمد اعتماداً كليا على السرعة الدورانية للمضخة. ومن المشاكل التي تعاني منها هذه المضخات الاهتزازات العالية والضوضاء.

والمضخات ذات الإزاحة الموجبة تكون على ثلاثة أشكال وهي:

- **المضخات الترددية Reciprocating Pumps** مثل المضخات أحادية الدفع وثنائية الدفع.

ويمكن حساب كمية التصريف للمضخة الترددية من المعادلة التالية:

$$Q = \forall N$$

$$\forall = AL$$

حيث أن V=A.L هو حجم المضخة و N هو السرعة الدورانية للمضخة ووحدتها دورة لكل دقيقة(rps).و A هي عبارة عن مساحة قطر مكبس المضخة و L هو عبارة عن طول شوط المضخة وتعطى قدرة المضخة بالعلاقة التالية:

$$P = \rho g Q H_p$$

وتعطى نسبة التفويت(Slip) بالعلاقة التالية:

$$Q_s = Q_{th.} - Q_{act.}$$

وكفاءتها بالعلاقة التالية:

$$\eta = \frac{Q_{act.}}{Q_{th.}}$$

حيث أن Q_{ac}هي التصريف الحقيقي و Q_{th} هو التصريف النظري.

مثال(6- 1)

مضخة ترددية أحادية الفعل بها أسطوانة قطر مكبسها 100mm وطول شوطها 200mm تدور بسرعةN=120rpm وتعطي ارتفاعاً كلياً 45m احسب قدرتها بالوات وبالحصان الميكانيكي إذا علمت أن المضخة تضخ الماء؟

الحل:

نحسب مساحة المكبس: $A = \frac{\pi}{4} D^2 = \frac{\pi}{4} * 0.1^2 = 7.85X10^{-3} m^2$

وبالتالي فإن حجم الشوط يساوي: $\forall = AL = 7.85X10^{-3} * 0.2 = 0.00157m^3$

ويكون معدل التدفق الحجمي بها: $Q = \forall N = 0.00157 * \frac{120}{60} = 0.00314m^3 / s$

$$P = \rho g Q H_p = 1000 * 9.81 * 0.00314 * 45 = 1386.2w$$

وقدرتها تساوي:

$$P = \frac{1386.2}{746} = 1.86Hp$$

مثال(6- 2)

مضخة أحادية المكبس مساحته $0.193m^2$ وطول شوطها0.304m تسحب من بئر عمقه2.192m وتصب على ارتفاع 10m فإذا كانت سرعة المضخة 60rpm وحجم التصريف الحقيقي$0.0546m^3/s$ أوجد نسبة التفويت والكفاءة والقدرة للمضخة .

الحل:

معدل التصريف النظري يساوي: $Q = \forall N = ALN = 0.193 * 0.304 * \frac{60}{60} = 0.059m^3 / s$

وتكون نسبة التفويت تساوي:

$$Q_s = Q_{th.} - Q_{act.}$$

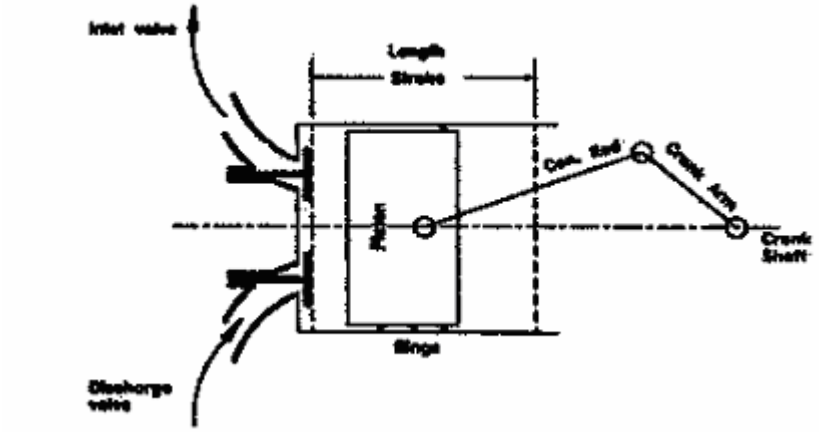
$$Q_s = 0.059 - 0.0546 = 0.0044m^3 / s$$

أما الكفاءة فإنها تساوي:

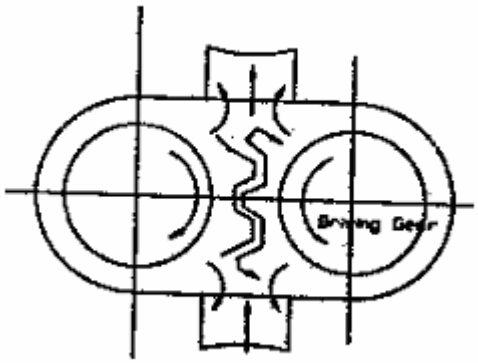
$$\eta = \frac{Q_{act.}}{Q_{th.}} = \frac{0.0546}{0.059} = 92.5\%$$

والقدرة تساوي: $P = \rho g Q H_p = 1000 * 9.81 * 0.0546 * (2.192 + 10) = 6530.4w$

- **المضخات الدورانية Rotary Pumps كالمضخات اللولبية وذات التروس.**
- **المضخات المحوريةAxial Flow Pump:**



الشكل(6- 1)مضخة ترددية.



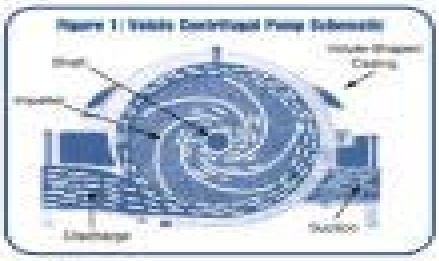
الشكل(6- 2)مضخة ترسية.

2. **المضخات الطاردة المركزية**Centrifugal Pumps.وتتكون المضخة الطاردة المركزية من الغطاء وبداخله دفاعة مروحية دورانية. القوة الطاردة المركزية الناشئة عن الدفاعة المروحية تعطي الزيادة في الضغط للمائع. ويدخل المائع في هذه المضخة عند المركز ويخرج عند المحيط حيث يتم تحويل الطاقة

الحركية للمائع(السرعة العالية) إلى ضغط عال بالإضافة إلى الضغط الناتج عن قوة الطرد المركزية. وتستخدم المضخات الطاردة المركزية لضخ الموائع ذات اللزوجة المنخفضة والتي تحتوي على معدل تدفق حجمي كبير.

وتعمل المضخات الطاردة المركزية على سرعات ثابتة. ويتم التحكم بمعدل السريان بواسطة صمام على خط الطرد. هذه الطريقة من التحكم بمعدل السريان مكلفة أكثر من المضخة ذات المحرك متغير السرعات إلا أن وجود صمام تحكم مستقل يعطي مضخة الطرد المركزي ميزة العمل حتى وإن كان صمام الطرد لها مغلقاً تماماً فلا تتلف المضخة ويؤدي ذلك إلى فقدان الطاقة على شكل احتكاك وزيادة في درجة حرارة المائع. ولزيادة تحويل الطاقة الحركية إلى ضغط فإننا نزيد من كثافة المائع ونظراً لانخفاض اللزوجة للغازات فإننا لا نستطيع تحريكها بواسطة مضخة الطرد المركزي وبالتالي فإن المضخة لا تعمل إذا دخل إلى خط السحب فيها غاز على عكس المضخات ذات الإزاحة الموجبة. ومن المشاكل التي تعاني منها المضخات الطاردة المركزية مشكلة التكهف حيث إن المائع قد يتحول إلى بخار في منطقة السحب فالضغط المنخفض يؤدي إلى تكوين أبخرة تعمل على إعاقة الضخ وتؤثر على جسم المضخة.

المضخات الطاردة المركزية لا تستخدم للموائع عالية اللزوجة لارتفاع الاحتكاك والذي يحول دون الوصول إلى السرعات العالية. وهناك أنواع من مضخات الطرد المركزي والتي تصمم بشكل خاص لضخ مواد معلقةSuspensions في الماء دون التأثير على هذه المعلقات. وتزود كل مضخة بمنحنيات خاصة تبين كيفية استعمال هذه المضخة في حالات مختلفة. وتتناسب سعة المضخة(معدل التصريف الحجمي) مع السرعة الدورانية وكذلك فإن الضغط يتناسب مع مربع السرعة الدورانية والقدرة تتناسب مع مكعب السرعة الدورانية.



شكل(6- 3)مضخة طرد مركزية.

وقد يحدث في بعض الأحيان أن يكون خط السحب طويلاً أو الضغط البخاري أعلى من الضغط الجوي فتتكون فقاعات من البخار والغازات وتعرف هذه الظاهرة بالتكهف. وتؤدي هذه الظاهرة إلى

تآكل الأسطح وضياع في الطاقة وضوضاء واهتزازات عالية. ويمكن التخلص من هذه المشكلة الكبيرة بحساب سمت السحب الموجب الصافي Net Positive Suction Head (**NPSH**) ويعطى بالعلاقة التالية:

$$NPSH = \frac{P_1}{\gamma} + \frac{V_1^2}{2g} - \frac{P_v}{\gamma}$$

حيث أنV هي السرعة وP هو الضغط عند النقطة وP_v عبارة عن ضغط البخار. وإذا كان طول خط السحب هوL وكانت مفاقيد الاحتكاك هيh_L فإن المعادلة تصبح:

$$\frac{P_{atm}}{\gamma} + \frac{V_1^2}{2g} + z_1 = \frac{P_2}{\gamma} + \frac{V_2^2}{2g} + z_s + h_L$$

$$\frac{P_2}{\gamma} + \frac{V_2^2}{2g} = \frac{P_{atm}}{\gamma} + z_s - h_L$$

$$NPSH = \frac{P_2}{\gamma} + \frac{V_2^2}{2g} = \frac{P_{atm}}{\gamma} - z_s - h_L - \frac{P_v}{\gamma}$$

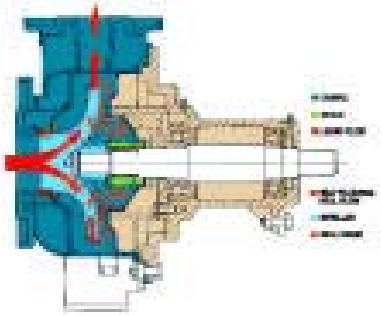
$$\delta = \frac{NPSH}{H_p}$$

حيث أن δ عبارة عن متغير التكهف ويجب أن لا تقل عن متغير معين يسمى بمتغير التكهف الحرج δ_c.والذي يعطى بالمعادلة التالية:

$$\delta_c = \frac{NPSH_{\min.}}{H_p}$$

والجدول المرفق يبين قيمة ضغط البخار والكثافة للماء عند درجات حرارة مختلفة.

$T(C^0)$	15	20	25	30	40	45	50	100
P_v(Pa)	1.71	2.73	3.16	4.21	7.36	9.58	12.81	101.3
ρ (Kg/m^3)	999	998	997	996	992	990	988	958



شكل(6- 4)مقطع داخلي لمضخة.

مثال(6- 3)

مضخة لها سمت مقداره 10m وتضخ ماء عند درجة حرارة $40C^0$ من خلال خط مواسير الفواقد الاحتكاكية فيه تساوي 2m فإذا علمت أن $NPSH_{min}$ هو 3.2m والارتفاع المطلوب للضخ هو4.8m فهل تنشا ظاهرة التكهف أم لا؟

الحل:

أولاً نحسب متغير التكهف الحرج ويساوي: $\delta_c = \frac{NPSH_{\min.}}{H_p} = \frac{3.2}{10} = 0.32$

ولكن عند درجة حرارة تساوي $40C^0$ فإن الضغط البخاري من الجدول يساوي7.36kpa. وبالتالي ولحساب سمت السحب الموجب الصافي نجد أن:

$$NPSH = \frac{P_{atm}}{\gamma} - z_s - h_L - \frac{P_v}{\gamma}$$

$$NPSH = \frac{101.3 * 1000}{9810} - 4.8 - 2 - \frac{7.36 * 1000}{9.81 * 992}$$

$$NPSH = 10.326 - 4.8 - 2 - 0.756 = 2.764$$

وبالتالي يكون متغير التكهف يساوي: $\delta = \frac{NPSH}{H_p} = \frac{2.764}{10} = 0.2764$

وحيث أن المتغير الحرج δ_c أكبر من δ فإنه ستحدث ظاهرة التكهف ولتلافي هذه الظاهرة فإننا نحسب أقصى ارتفاع يمكن أن تعمل عليه هذه المضخة حيث إنه يساوي:

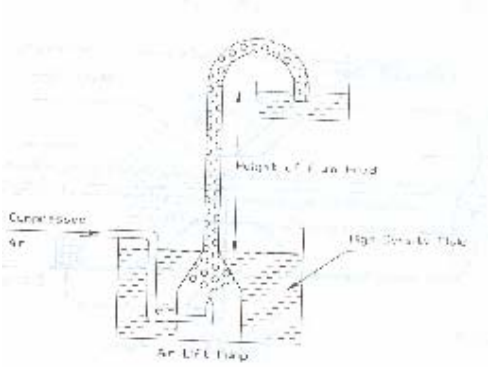
$$Z_{\max.} = \frac{P_{atm}}{\gamma} - h_L - \frac{P_v}{\gamma} - \delta_c * H$$

$$Z_{\max.} = \frac{101.3*1000}{9810} - 2 - \frac{7.36*1000}{9.81*992} - 0.32*10$$

$$Z_{\max.} = 10.326 - 2 - 0.756 - 3.2$$

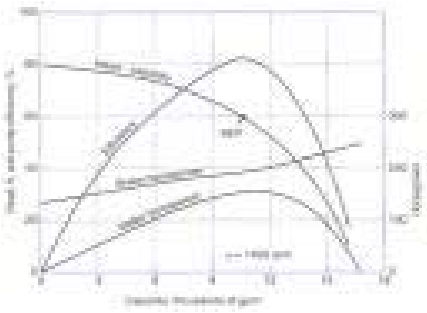
$$Z_{\max.} = 4.37m$$

3. **مضخات خاصة مثل مضخة النافورة** Jet Pump **ومضخة دفع الهواء** Air Lift Pump.

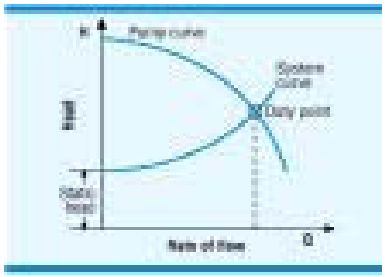


الشكل(6- 5)مضخة النافورة.

شكل(6- 6)مضخة البالوعة.



شكل(6- 7)منحنى الأداء لمضخة.



شكل(6- 8)نقطة التصميم أثناء اختيار المضخة.

وكثيراً ما تواجهنا ظروف تحتم علينا تغيير سعة المضخة ومقدار دفعها وذلك من خلال ثابت يطلق عليه السرعة النوعيةSpecific Speed ويعطى بالرمزΨ حيث إنه يساوي:

$$\psi = \frac{N^2 Q}{(g\Delta H)^{\frac{3}{2}}}$$

ومن خلال هذه المعادلة نجد أن :

$$\frac{\Delta H_1}{\Delta H_2} = \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2 \left(\frac{D_1}{D_2}\right)^2$$

$$\frac{P.E_1}{P.E_2} = \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^3 \left(\frac{D_1}{D_2}\right)^5$$

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \left(\frac{N_1}{N_2}\right)\left(\frac{D_1}{D_2}\right)^3$$

مثال(6- 4)

إذا كان لدينا مضخة قطرها0.3m وسرعتها900 rpm ومعدل جريانها $1.8m^3/s$ وتدفع إلى ارتفاع15.2m فما هو القطر لمضخة مماثلة لها لإعطاء ضعف الكمية لإعطاء ارتفاع كلي مقداره 18.3m وكذلك احسب سرعتها؟

الحل:

$$\frac{Q_1}{Q_2}=\left(\frac{N_1}{N_2}\right)\left(\frac{D_1}{D_2}\right)^3$$

$$\frac{1}{2}=\left(\frac{900}{N_2}\right)\left(\frac{0.3}{D_2}\right)^3 \Rightarrow N_2{D_2}^3=2*900*0.3^3=48.6$$

$$N_2=\frac{48.6}{{D_2}^3}$$

$$\frac{\Delta H_1}{\Delta H_2}=\left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2\left(\frac{D_1}{D_2}\right)^2$$

$$\frac{15.2}{18.3}=\left(\frac{900}{N_2}\right)^2\left(\frac{0.3}{D_2}\right)^2 \Rightarrow {N_2}^2{D_2}^2=\frac{18.3*900^2*0.3^2}{15.2}=87767.7$$

$${N_2}^2=\frac{87767.7}{{D_2}^2}\Rightarrow N_2=\sqrt{\frac{87767.7}{{D_2}^2}}=\frac{296.26}{D_2}$$

وبالتالي فان: $N_2=\frac{296.26}{D_2}=\frac{48.6}{{D_2}^3}$

$$48.6D_2=269.26{D_2}^3 \Rightarrow {D_2}^2=\frac{48.6}{269.26}=0.164$$
$$D_2=0.41m$$

وتكون سرعتها الجديدة:

$$N_2=\frac{48.6}{{D_2}^3}=\frac{48.6}{0.41^3}=705.2rpm$$

المراجع

المراجع العربية

1. أساسيات انتقال الحرارة, ترجمة د.برهان محمود العلي, أحمد نجم الصبحة, بهجت مجيد مصطفى.
2. انتقال الحرارة القسم العملي الأول والثاني, د.أحمد كاسر إبراهيم, 1983- 1984.
3. ميكانيك السوائل, م.جلال عبدالقادر العلو, 1987.
4. هندسة تصنيع الأغذية, ترجمة د. بكري حسين حسن, علي إبراهيم حوباني,1995.
5. المدخل إلى هندسة الأغذية,ترجمة د.سليمان عبدالعزيز اليحيى,1996.

المراجع الاجنبية

1. Holman J.P.,1977 Heat Transfer , 8th edition,McGraw hill.
2. Thomas, Lindon C.1993. Heat transfer.
3. Shames ,Irving.H. Mechanics of Fluids.
4. Streeter, Vector.L.E. Wyle Benjamin Fluid Mechanics.
5. Bugler J. Fluid Mechanics for Technologists.

المحتويات

مقدمة .....
تمهيد .....
الوحدة الأولى: نظم التسخين والتبريد 1
الوحدة الثانية: انتقال الحرارة في حالة الاتزان 11
الوحدة الثالثة: المبادلات الحرارية 38
الوحدة الرابعة: خواص الموائع 50
الوحدة الخامسة: المائع في حالة الحركة 66
الوحدة السادسة: المضخات 105
المراجع 115