



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

## تخصص تقنية التصنيع الغذائي

انتقال الحرارة والموائع

(عملي)

١٥٣ 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 التتموي؛ 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 - عملي " 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

## تهديد

تحتوي منشأة التصنيع الغذائي على الكثير من التطبيقات العملية والتي ترتبط ارتباطاً وثيقاً بالعمليات الحرارية وحيث إن هذه العمليات الحرارية تجري على المواد الغذائية المختلفة والتي هي في غالبيتها من الموائع، فكان لزاماً علينا أن نبين للمتدرب بعض المفاهيم والعلاقات الرياضية والتطبيقات العملية لانتقال الحرارة والموائع. وحتى يمتلك المتدرب المهارة الفكرية المعرفية التي تمكنه من فهم هذه المواضيع تعرضنا إلى بعض التطبيقات العملية لانتقال الحرارة والموائع ذات الصلة.

ويتضمن الجزء العملي من حقيبة انتقال الحرارة والموائع ثمان وحدات دراسية. حيث تتعرض الوحدة الأولى والثانية والثالثة إلى أساليب انتقال الحرارة الثلاث التوصيل والحمل والإشعاع الحراري ويتم من خلالها التعرف على كيفية حساب وتقدير قيمتي الموصلية الحرارية ومعامل انتقال الحرارة بالحمل مع تزويد المتدرب بأمثلة حسابية عليها وعلى عمليات الإشعاع الحراري لتبسيط عملية الفهم.

أما الوحدة الرابعة فتتضمن مسائل حسابية على أنواع المبادلات الحرارية المختلفة كالمبادل الحراري المتوازي والمعكوس والمبادل الحراري المتعامد. مزودة ببعض الأشكال التوضيحية لهذه الأنواع. أما الوحدة الخامسة فيتم من خلالها التعرف على الأجهزة المستخدمة في قياس الضغط مع التركيز على المسائل الحسابية على المانوميترات. ويتم في الوحدة السادسة التعرف على كيفية إجراء عمليات القياس للزوجة المائع من خلال الريوميترات والفييسكوميترات مع التركيز على الجانب الحسابي فيها لتعدد أنواع وأشكال وطرق تشغيل هذه الأجهزة مع العلم بأنها أصبحت متوفرة في منشأة التصنيع الغذائي وعلى شكل جهاز رقمي بسيط يعطي قراءة مباشرة.

والوحدة السابعة تتضمن بعض الأجهزة شائعة الاستعمال في قياس معدلات التدفق الحجمي والتي يحتاجها أي مشغل أثناء عمليات التصنيع المختلفة كجهاز الفنتشوري ميتر ومقياس الفتحة أما الوحدة الثامنة فتحتوي على أشكال مختلفة وأنواع متعددة للمضخات وكيفية إجراء حسابات الضخ والتي يتم من خلالها اختيار المضخة. وقد تم وضع بعض التمارين الحسابية في نهاية كل وحدة بحيث يقوم المتدرب بالتدرب عليها واختبار مدى استفادته من الجزء المتعلق بها.

# انتقال الحرارة والموائع - عملي

## انتقال الحرارة بالتوصيل

### الوحدة الأولى: انتقال الحرارة بالتوصيل

**الجدارة:** التعرف على كيفية إيجاد الموصلية الحرارية لثلاثة قطع معدنية مختلفة. وكذلك حساب المقاومة الحرارية للجدار البسيط والجدار المركب. كما نتعرف على أهمية العزل الحراري ودوره في تخفيض فقد الحرارة.

**الأهداف:** أن يقوم المتدرب بتطبيق قانون فورير للتوصيل الحراري عبر الجدار البسيط والجدار المركب ويتمكن من حساب الموصلية الحرارية لهما وكذلك حساب معدل التدفق الحراري بين الأسطح المعدنية. ويتعرف المتدرب على دور العازل وأنه لا يكون دائماً مفيداً في تخفيض الحمل الحراري.

**مستوى الأداء المطلوب:** أن يصل المتدرب إلى إتقان الجدارة بنسبة ٩٥٪.

**الوقت المتوقع للتدريب على الجدارة:** أربع ساعات.

**الوسائل المساعدة:** جهاز التجربة والمتكون من عداد طاقة بسيط ومؤقت زمني بالإضافة إلى مزدوجات حرارية بين كل طبقة من النحاس أو الألمنيوم أو الحديد لقياس درجة الحرارة.

**متطلبات الجدارة:** أن يكون المتدرب قادراً على تطبيق خطوات التجربة بدقة وأن يعطي القطع المعدنية الفترة الزمنية اللازمة للوصول إلى الاتزن قبل إجراء عمليات القياس لدرجات الحرارة.

## الدرس الأول

### الموصلية الحرارية للمادة

إن معدل انتقال الحرارة بالتوصيل عبر الجدار البسيط يعطى بقانون فوريير للتوصيل الحراري والذي ينص على التالي:

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

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

كما أنه وبتعريف المقاومة الحرارية مشابهة مع سريان التيار الكهربائي فإن قيمة المقاومة الحرارية بالتوصيل عبر الجدار البسيط تساوي:

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

وبالتالي فإن معدل انتقال الحرارة بالتوصيل عبر الجدار المركب يعطى بالمعادلة التالية:

$$q_k = \frac{T_1 - T_2}{R_{t1} + R_{t2} + R_{t3}}$$

$$q_k = \frac{T_1 - T_2}{\frac{L_1}{K_1 A_1} + \frac{L_2}{K_2 A_2} + \frac{L_3}{K_3 A_3}}$$

القراءات والبيانات اللازم قياسها وتوفرها:

1. قراءة عداد الطاقة الموصل بجهاز التجريبية قبل وبعد التوصيل الكهربائي وهي على التوالي تساوي (120.31Kw.h) و (120.35Kw.h) وقراءة الزمن اللازم لاستهلاك هذه الطاقة ويساوي 7.5min.

2. درجات الحرارة بين طبقات المعادن الثلاثة وذلك على النحو التالي  $T_1 = 89$

$$T_2 = 86 \quad T_3 = 81 \quad T_4 = 68 \quad C^0$$

3. سماكة القطع المعدنية الثلاثة وهي للنحاس (2.8cm) وللألومنيوم (2.5cm)

وللحديد (1.9cm) وأقطارها متساوية وتساوي (10cm)

الحسابات:

- نحول الزمن إلى ساعات وذلك بالقسمة على 60

$$t = \frac{7.5}{60} = 0.125h$$

- نحسب معدل انتقال الحرارة بالتوصيل عبر الجدار من قراءة عداد الطاقة حيث إنها تساوي الفرق بين قراءة عداد الطاقة النهائية والبدائية مقسومة على الزمن وذلك من المعادلة التالية:

$$q = \frac{(Q_2 - Q_1) * 1000}{t(h)}$$

$$q = \frac{(120.35 - 120.31) * 1000}{0.125} = 320w$$

- نحسب مساحة القطع المعدنية وذلك من المعادلة التالية:

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

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

- نجد الموصلية الحرارية لكل قطعة من القطع المعدنية على حدة على فرض أن معدل انتقال الحرارة مستقر وثابت في النظام وذلك من المعادلة التالية:

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

فالموصلية الحرارية للنحاس تساوي:

$$q_{K1} = \frac{K_1 A_1}{L_1}(T_1 - T_2)$$

$$320 = \frac{K_1 * 0.00785}{0.028}(89 - 86)$$

$$K_1 = \frac{0.028 * 320}{0.00785 * 3} = 380.5w / mk$$

وبالمثل فإن الموصلية الحرارية للألمنيوم تساوي:

$$q_{K2} = \frac{K_2 A_2}{L_2}(T_2 - T_3)$$

$$320 = \frac{K_2 * 0.00785}{0.025}(86 - 81)$$

$$K_2 = \frac{0.025 * 320}{0.00785 * 5} = 203.8w / mk$$

وكذلك فالموصلية الحرارية للحديد تساوي:

$$q_{K3} = \frac{K_3 A_3}{L_3}(T_3 - T_4)$$

$$320 = \frac{K_3 * 0.00785}{0.019}(81 - 68)$$

$$K_3 = \frac{0.019 * 320}{0.00785 * 13} = 59.6w / mk$$

- نحسب معدل انتقال الحرارة بالتوصيل عبر الجدار البسيط والجدار المركب من المعادلة التالية:

$$q_K = \frac{T_1 - T_4}{\frac{L_1}{K_1 A_1} + \frac{L_2}{K_2 A_2} + \frac{L_3}{K_3 A_3}}$$

$$q_K = \frac{89 - 68}{\frac{0.028}{380.5 * 0.00785} + \frac{0.025}{203.8 * 0.00785} + \frac{0.019}{59.6 * 0.00785}} = 320w$$

- نحسب المقاومة الحرارية عبر الجدار البسيط وعبر الجدار المركب من المعادلة التالية:

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

$$R_1 = \frac{L_1}{K_1 A_1} = \frac{0.028}{380.5 * 0.00785} = 0.0094k / w$$

$$R_2 = \frac{L_2}{K_2 A_2} = \frac{0.025}{203.8 * 0.00785} = 0.016k / w$$

$$R_3 = \frac{L_3}{K_3 A_3} = \frac{0.019}{59.6 * 0.00785} = 0.041k / w$$

$$R_T = R_1 + R_2 + R_3$$

$$R_T = 0.0094 + 0.016 + 0.041 = 0.0664k / w$$

- نقارن القيم المحسوبة بمثيلاتها من القيم النظرية المعروفة.



## الدرس الثاني

### العزل الحراري

#### Thermal Insulation

تعزل معدات التصنيع الغذائي غالباً لتقليل معدل انتقال الحرارة منها إلى المحيط. وإذا لم يتوفر العزل الحراري فإن الحرارة ستفقد من الأسطح الخارجية لتلك المعدات بواسطة جميع طرق التوصيل الحراري (التوصيل والحمل والإشعاع). ويكون الفقد الحراري عن طريق التوصيل من خلال الهواء قليل وذلك لأن الموصلية الحرارية للهواء قليلة جداً ( $0.026 \text{ w/mk}$ ). أما بالنسبة إلى الإشعاع الحراري فتتناسب قيمة الفقد الحراري فيه مع القوة الرابعة لدرجة حرارة السطح والمحيط. وحيث إن الفرق بينهما صغير فإن الفقد الحراري سيكون كذلك. وبذلك فإن الجزء الأكبر من الفقد الحراري يكون عن طريق الحمل الحراري حيث إن تيارات الحمل تحدث مهما صغر الفرق في درجة الحرارة بين السطح والهواء. ولذلك يكون العازل ضرورياً لتقليل ذلك الفقد الحراري. ويجب اختيار مادة العزل بحيث يكون لها معامل توصيل حراري قليل وقدرة على تقليل تيارات الحمل.

وتشمل مواد العزل المستخدمة الفلين والسيليكا والمغنيسيا والزجاج والصوف. كما أنه كانت تستخدم مادة الإسبستوس إلا أن استخدامها الآن أوقف لأنها من المواد التي ثبت أنها مسببة للسرطان.

#### نصف القطر الحرج Critical Radius of Insulation:

في الكثير من الأحيان لا يكون إضافة العازل مفيداً حيث إن الفقد الحراري قد يزداد بوجوده فمثلاً لو كان عندنا أنبوب وأردنا تغطيته بعازل حتى لا يفقد حرارة إلى المحيط الخارجي فيكون

مقاومتين حراريتين أحدهما بالتوصيل ومقدارها  $R_t = \frac{\ln \frac{r_0}{r_i}}{2\pi KL}$  والأخرى بالحمل ومقدارها  $R_t = \frac{1}{2\pi h_c r L}$

وعند زيادة نصف قطر العازل فإن ذلك يؤدي إلى زيادة المقاومة الحرارية بالتوصيل ونقصان المقاومة الحرارية بالحمل وبإجراء بعض الحسابات يمكن أن نتوصل إلى أن نصف القطر الحرج يعطى بالمعادلة التالية:

$$R_{cr} = \frac{K}{h}$$

حيث أن  $K$  الموصلية الحرارية للعازل و  $h$  هو معامل انتقال الحرارة بالحمل بين العازل والمحيط الخارجي.

ومن المعادلة السابقة يتبين لنا أنه عندما يكون نصف قطر العازل أقل من نصف القطر الحرج فإن زيادة العازل تؤدي إلى زيادة الفقد في الحرارة إلى أن تصل قيمة نصف قطر العازل إلى قيمة نصف

القطر الحرج. أما في حالة أن يكون نصف قطر العازل أكبر من نصف القطر الحرج فإن زيادة العازل دائماً تؤدي إلى نقص الفقد الحراري إلا أن ذلك يتطلب تكلفة إضافية لأسعار المواد العازلة. وبالتالي نخلص إلى أن إضافة العازل ليست بالضرورة دائماً تؤدي إلى تقليل الفقد الحراري. ونلجأ لذلك إلى استخدام طبقات رقيقة من العوازل في الكثير من الحالات لاسيما عند التعامل مع الأسلاك الرفيعة. كما أننا قد نلجأ إلى إضافة العوازل الحرارية لغايات التبريد وخاصة في أسلاك نقل الكهرباء.

تمرين (١):

سلك كهربائي قطره 1mm مغطى بطبقة من العازل سمكها 2mm وموصلتها الحرارية  $0.5w/mk$  يحيط به هواء درجة حرارته  $25C^0$  إذا علمت أن معامل انتقال الحرارة بالحمل بين الهواء  $10w/m^2k$  ودرجة حرارة سطح السلك  $100C^0$  احسب معدل الفقد الحراري عبر السلك لكل وحدة طول بوجود وبعدم وجود العزل الحراري

الحل:

أولاً: بدون وجود عازل حيث إنه وفي هذه الحالة لا توجد إلا مقاومة حرارية واحدة والمساحة تكون مساوية للمساحة السطحية للأنبوب وتساوي :

$$A = 2\pi rL = 2\pi * 0.0005 * L$$

$$\frac{A}{L} = 0.00314m$$

وبالتالي يكون الفقد الحراري كمايلي:

$$q = h_c 2\pi r h_c L (T_s - T_{f,\infty})$$

$$\frac{q}{L} = h_c 2\pi r h_c (T_s - T_{f,\infty})$$

$$\frac{q}{L} = 10 * 0.00314 (100 - 25) = 2.355w/m$$

ثانياً: مع وجود عازل حيث يكون هناك مقاومتان حراريتان حيث إن الأولى تكون بالتوصيل الحراري

$$R_t = \frac{\ln \frac{r_o}{r_i}}{2\pi KL} = \frac{\ln \frac{0.0025}{0.0005}}{2\pi * 0.5 * L} = \frac{0.512}{L}$$

ومقدارها:

أما المقاومة الثانية فهي بالحمل الحراري وتساوي:

$$R_t = \frac{1}{2\pi h_c r L} = \frac{1}{2\pi * 10 * 0.0025 * L} = \frac{6.37}{L}$$

فيكون معدل الفقد الحراري بوجود العازل يساوي:

$$q = \frac{\Delta T}{\sum R} = \frac{\Delta T}{R_c + R_k} = \frac{100 - 25}{\frac{0.512}{L} + \frac{6.37}{L}} \Rightarrow \frac{q}{L} = \frac{75}{6.882} = 10.9w/m$$

وبالتالي نلاحظ أن معدل الفقد الحراري بدون وجود عازل أقل منه في حالة وجود العازل.

تمرين (٢) على انتقال الحرارة بالتوصيل عبر جدار مكون من أكثر من طبقة:

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) وطبقة ثالثة من البلاستيك سماكتها (0.2cm) ولها نفس الموصلية الحرارية. احسب الفقد الحراري عبر جدار البراد بالنسبة إلى وحدة المساحة علماً بأن درجة حرارة البلاستيك من الداخل  $-4C^0$  ومن الخارج  $25C^0$

الحل:

$$q_K = \frac{T_1 - T_4}{\frac{L_1}{K_1 A_1} + \frac{L_2}{K_2 A_2} + \frac{L_3}{K_3 A_3}}$$

نلاحظ أنه لم يدل على أي اختلاف في المساحة بين الطبقات الثلاث ولذلك فإننا نعتبرها متساوية ونقسم عليها وبالتالي تصبح المعادلة كما يلي:

$$\frac{q_K}{A} = \frac{T_1 - T_4}{\frac{L_1}{K_1} + \frac{L_2}{K_2} + \frac{L_3}{K_3}}$$

$$\frac{q_K}{A} = \frac{T_1 - T_4}{\frac{L_1}{K_1} + \frac{L_2}{K_2} + \frac{L_3}{K_3}} = \frac{25 - (-4)}{\frac{0.005}{12} + \frac{0.023}{0.24} + \frac{0.002}{12}} = 300.78w/m^2$$

تمرين (٣) على السمك الحرج

احسب السمك الحرج للإسبست الذي يحيط بأنبوب قطره 5cm ودرجة حرارة سطحه  $79C^0$  يحيط به هواء درجة حرارته  $35C^0$  علماً بأن معامل انتقال الحرارة بالحمل  $5w/m^2k$  والموصلية الحرارية للإسبست  $0.165w/mk$  ومن ثم احسب معدل الفقد الحراري من الأنبوب بوجود وبدون وجود العازل

الحل:

السمك الحرج للعازل يساوي:

$$R_{cr} = \frac{K}{h} = \frac{0.165}{5} = 0.033m = 3.3cm$$

يترك حساب معدل الفقد الحراري من الأنبوب بوجود وبدون وجود العازل للمتدرب .

## انتقال الحرارة والموائع - عملي

### انتقال الحرارة بالحمل

### الوحدة الثانية: انتقال الحرارة بالحمل

**الجدارة:** حساب معامل انتقال الحرارة بالحمل  $h$  في حالتَي الحمل الحر والحمل القسري. تجريبياً وتقريبياً

**الأهداف:** أن يقوم المتدرب بالتفريق بين حالتَي الحمل الحر والحمل القسري ويتعرف على كيفية اختيار المعادلة المناسبة لحساب معامل انتقال الحرارة بالحمل.

**مستوى الأداء المطلوب:** أن يصل المتدرب إلى إتقان الجدارة بنسبة ٩٠٪.

**الوقت المتوقع للتدريب على الجدارة:** أربع ساعات

**الوسائل المساعدة:** عداد طاقة بسيط مزود بساعة توقيت بالإضافة إلى الغلاية (جهاز التجربة) التي يقاس طول الأنبوب المستخدم للتسخين فيها والمعادلات الرياضية بالإضافة إلى الآلة الحاسبة.

**متطلبات الجدارة:** أن يكون المتدرب قادراً على تطبيق خطوات التجربة بدقة والتفريق بين الحالات المختلفة لعملية الحمل الحراري. كما يطلب من المتدرب إتقان انتقاء واستخدام المعادلات الرياضية الصحيحة وإجراء العمليات الحسابية بدقة.

## الدرس الأول

إن معدل انتقال الحرارة بالحمل يحدث عندما يكون هناك اتصال مباشر بين سطح صلب ومائع أو بين مائع ومائع آخر حيث يجب أن يكون هناك فرق حراري بينهما. وهناك نوعان من الحمل الحراري الحمل الحر والحمل القسري والفرق بينهما أن الحمل الحر يعتمد على الفرق في الكثافة بين طبقات المائع ليحدث سريان الحرارة بينما في حالة الحمل القسري فإنه لا بد من وجود قوة محرّكة خارجية كمروحة أو مجرى هوائي أو مائي لإحداث هذه الحركة ولقد وجد أنه وعند نفس الفرق في درجة الحرارة بين الجسمين فإن انتقال الحرارة بالحمل القسري أكثر كفاءة منه من الحمل الحر. ويعطى معدل انتقال الحرارة بالحمل الحر بالمعادلة التالية:

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

حيث أن :

$q_c$  : معدل انتقال الحرارة بالحمل.

$A$  : المساحة التي يتم انتقال الحرارة بالحمل من خلالها.

$h_c$  : متوسط معامل انتقال الحرارة بالحمل بين المائع والسطح.

$T_s$  : درجة حرارة السطح.

$T_f$  : درجة حرارة المائع بعيداً عن السطح.

### القراءات:

- قراءة عداد الطاقة الموصول بجهاز التجربة قبل وبعد التوصيل الكهربائي وقراءة الزمن اللازم لاستهلاك هذه الطاقة.

- درجة الحرارة للمائع ودرجة الحرارة للسطح.

- طول الأنبوب المستخدم لتسخين المائع وقطره.

### الحسابات:

- نحول الزمن إلى ساعات وذلك بالقسمة على 60

- نحسب معدل انتقال الحرارة بالتوصيل عبر الجدار من قراءة عداد الطاقة حيث إنها تساوي

الفرق بين قراءة عداد الطاقة النهائية والبدائية مقسومة على الزمن وذلك من خلال المعادلة

التالية:

$$q = \frac{(Q_2 - Q_1) * 1000}{t(h)}$$

- نحسب مساحة الأنبوب والتي يتم انتقال الحرارة بالحمل من خلالها وذلك من خلال المعادلة التالية:

$$A = \pi DL$$

- بالتعويض في المعادلة نجد متوسط معامل انتقال الحرارة بالحمل بين المائع وسطح الأنبوب.

تمرين (١):

يتم تسخين ماء عبر غلاية بخار من درجة حرارة (12C°) إلى درجة (98C°). إذا علمت أن قطر الأنبوب المستخدم في التسخين يساوي (2.5cm) وطوله (70cm) وأن قراءة عداد الطاقة البدائية تساوي (23.5Kw.h) والنهائية (23.86Kw.h) وزمن التشغيل (10min) احسب متوسط معامل انتقال الحرارة بالحمل بين المائع وسطح الأنبوب

الحل:

نحول الزمن إلى ساعات وذلك كما يلي:

$$t = \frac{10}{60} = 0.167h$$

نحسب معدل انتقال الحرارة بالتوصيل عبر الجدار من قراءة عداد الطاقة حيث إنها تساوي الفرق بين قراءة عداد الطاقة النهائية والبدائية مقسومة على الزمن وذلك من المعادلة التالية:

$$q = \frac{(Q_2 - Q_1) * 1000}{t(h)}$$

$$q = \frac{(23.86 - 23.5) * 1000}{0.167} = 2155.7w$$

نحسب مساحة الأنبوب:

$$A = \pi DL$$

$$A = \pi * 0.025 * 0.7 = 0.055m^2$$

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

$$2155.7 = h_c * 0.055(98 - 12) \Rightarrow h_c = 455.8 \frac{w}{m^2k}$$

## الدرس الثاني

### تقدير معامل انتقال الحرارة بالحمل

معظم العلاقات التي تقودنا إلى تقويم معامل انتقال الحرارة بالحمل هي علاقات تجريبية ولكن يمكن اشتقاقها بناءً على أسس نظرية أو من خلال التحليل البعدي. وهناك عدة عوامل يعتمد عليها معامل انتقال الحرارة بالحمل وهي:

- (١) سرعة المائع.
- (٢) الحرارة النوعية للمائع.
- (٣) كثافة المائع.
- (٤) معامل لزوجة المائع الديناميكية..
- (٥) نوع الجريان.
- (٦) طول السطح أو قطر الأنبوب الذي يتحرك عليه المائع.
- (٧) الموصلية الحرارية للمائع.
- (٨) درجة حرارة السطح والمائع.

ولإيجاد معامل انتقال الحرارة بالحمل تجريبياً عن طريق بعض المعادلات الحسابية الجاهزة لا بد من التمييز بين نوعين من الجريان هما الجريان الطبقي والجريان الاضطرابي. وهناك ثوابت رياضية لا بد أيضاً من حسابها مثل رقم براندل ورقم نسلت ورقم جراسوف ولا بد بعد ذلك النظر إلى آلية الجريان وإلى السطح الذي يسري عليه المائع بالإضافة إلى خصائص هذا المائع ودرجة حرارة كل من السطح والمائع وهذه العوامل مجتمعة تحدد الآلية التي ستعتمد لتقدير معامل انتقال الحرارة بالحمل وهناك معادلات جاهزة جميعها تجريبية وأخذت من تجارب حقيقية لتقدير هذا المعامل.

### نوع الجريان:

ويتم عن طريق حساب رقم رينولدز ويمثل هذا الرقم النسبة بين قوى القصور الذاتي إلى قوى اللزوجة وهو رقم تجريبي. حيث إنه إذا كان المائع يتدفق في أنبوب فإن رقم رينولدز الذي يحدد ما إذا كان الجريان طباقياً أم اضطرابياً هو 2200 فإذا قل الرقم المحسوب عن هذا الرقم كان الجريان طباقياً وإذا زاد عنه فإن الجريان اضطرابي. أما إذا كان الجريان على سطح أفقي فإن رقم رينولدز الذي يحدد ما إذا كان الجريان طباقياً أم اضطرابياً هو  $1 \times 10^5$  فإذا كان الرقم المحسوب أقل من هذا الرقم فإن الجريان طباقياً وإلا فإن الجريان اضطرابي. ويعطى رقم رينولدز بالمعادلة التالية:



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

حيث أن:

$\rho$  هي كثافة المائع بوحدة  $kg/m^3$ .

$V$  هي سرعة المائع بوحدة  $m/sec$ .

$D$  هو قطر الأنبوب الذي يتحرك به المائع بوحدة  $m$ .

$\mu$  هي اللزوجة الديناميكية للمائع وتعطى بوحدة  $N.sec/m^2$ .

رقم براندل:

ويعطى بالمعادلة التالية:

$$Pr = \frac{\mu C_p}{K}$$

حيث أن:

$C_p$  هي الحرارة النوعية للمائع وتعطى بوحدة  $kJ/kgK$ .

$K$  هي الموصلية الحرارية للمائع وتعطى بوحدة  $w/mK$ .

رقم جراشوف:

ويرمز له بالرمز  $Gr$  وهو يعبر عن النسبة بين القوى المتولدة من تيارات الحمل Buoyant force والقوى

المتولدة من احتكاك طبقات المائع مع بعضها نتيجة للزوجتها Viscous Forces ويعطى رقم جراشوف

ويعطى بالمعادلة التالية:

$$Gr = \frac{\rho^2 g \beta \Delta t L^3}{\mu^2}$$

حيث أن:

$g$  هو تسارع الجاذبية الأرضية ويساوي  $9.81m/sec^2$ .

$\beta$  هي معامل التمدد الحراري وتساوي في المقدار مقلوب درجة الحرارة المتوسطة بالكلفن.  $\beta = \frac{1}{T_{avg}}$ .

$\Delta t$  الفرق في درجة الحرارة بين السطح والمائع.

$L$  طول السطح بوحدة  $m$ .

رقم نسلت:

ويعطى بالمعادلة التالية:

$$Nu = \frac{hD}{K}$$

ولحساب متوسط معامل انتقال الحرارة بالحمل يجب أن ندرس نوعين من انتقال الحرارة بالحمل وهما الحمل الحر والحمل القسري.

### (١) الحمل القسري Forced Convection :

إذا كان الجريان قسرياً وطباقياً:

$$Nu = \frac{hD}{K} = 0.664 Re^{0.5} * Pr^{0.33}$$

إذا كان الجريان قسرياً واضطرابياً وكان  $Pr < 10$

$$Nu = \frac{hD}{K} = 0.023 Re^{0.8} * Pr^{0.4}$$

إذا كان الجريان قسرياً واضطرابياً وكان  $Pr > 10$

$$Nu = \frac{hD}{K} = 0.027 Re^{0.8} * Pr^{0.3}$$

### (٢) الحمل الحر Free Convection :

في حالة انتقال الحرارة بالحمل الحر فإنه لا يحدث أي حركة أو تغيير في السرعة للمائع وفي هذه الحالة يجب تحديد نوع المائع الذي يحدث معه التبادل الحراري ونوع السطح المحيط به وطبيعة العلاقة بين المائع والسطح.

إذا كان الجريان حرّاً وكان المائع سائلاً وكان  $(Gr . Pr < 10^9)$

$$Nu = \frac{hD}{K} = 0.53 (Gr . Pr)^{0.25}$$

إذا كان الجريان حرّاً وكان المائع سائلاً وكان  $(Gr . Pr > 10^9)$

$$Nu = \frac{hD}{K} = 0.12 (Gr . Pr)^{0.33}$$

إذا كان الجريان حرّاً وكان المائع غازاً والتدفق في أنبوب بحيث إن  $(L < 30 \text{ cm})$

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

إذا كان الجريان حرّاً وكان المائع غازاً والتدفق على سطح بحيث إن الساخن من أعلى

$$h = 0.38 (\Delta t)^{0.25}$$

إذا كان الجريان حرّاً وكان المائع غازاً والتدفق على سطح بحيث إن الساخن من أسفل

$$h = 0.2 (\Delta t)^{0.25}$$

إذا كان الجريان حرّاً وكان المائع غازاً والتدفق في أنبوب بحيث إن  $(L > 30 \text{ cm})$

$$h = 0.27 (\Delta t)^{0.25}$$

تمرين (٢):

أوجد معامل انتقال الحرارة بالحمل عند تسخين عصير طماطم من  $16C^0$  إلى  $76C^0$  إذا كانت سرعة العصور  $1.25m/s$  خلال ماسورة قطرها الداخلي  $2.5cm$  وكانت درجة حرارة سطح الماسورة من الخارج  $82C^0$  وكثافة العصور  $1025kg/m^3$  وحرارته النوعية  $3420J/kg.K$  ولزوجته المتوسطة  $0.00234N.s/m^2$  ومعامل انتقال الحرارة بالتوصيل  $0.52w/m.K$ ؛

الحل:

بما أن العصور يتحرك بسرعة فإن انتقال الحرارة يكون بالحمل القسري ولذلك يجب أن نحدد أولاً نوع الجريان عن طريق حساب رقم رينولدز:

$$Re = \frac{\rho VD}{\mu} = \frac{1025 * 1.25 * 0.0025}{0.00234} = 1368.9$$

فالجريان طبقي لأن الحاصل أقل من  $2200$ .

نحسب رقم براندل:

$$Pr = \frac{\mu Cp}{K} = \frac{0.00234 * 3420}{0.52} = 15.4$$

$$Nu = \frac{hD}{K} = 0.664 Re^{0.5} * Pr^{0.33}$$

$$Nu = \frac{h * 0.0025}{0.52} = 0.664 * 1368.9^{0.5} * 15.4^{0.33}$$

تمرين (٣):

سطح أفقي طوله  $1.3m$  ودرجة حرارته  $468k$  يوجد عليه عصير طماطم درجة حرارته  $338k$  إذا علمت أن كثافة عصير الطماطم تساوي  $1090kg/m^3$  وحرارته النوعية تساوي  $3560J/kg.k$  ومعامل لزوجته المطلقة تساوي  $0.003N.s/m^2$  وموصلية الحرارية تساوي  $0.82w/mk$  احسب معامل انتقال الحرارة بالحمل بين عصير الطماطم والسطح الأفقي علماً بأن درجة الحرارة المتوسطة تساوي  $T_{avg}=304k$

الحل:

بما أن عصير الطماطم لا يتحرك فإننا نعتبر أن المسألة مسألة حمل حر وبالتالي نحسب كل من رقمي جراشوف وبراندل

ولكن يجب أولاً حساب مايلي:

$$\beta = \frac{1}{T_{avg}} = \frac{1}{304} = 0.00329 K^{-1}$$

$$\Delta T = 468 - 338 = 130 K$$

$$Gr = \frac{\rho^2 g \beta \Delta t L^3}{\mu^2}$$

$$Gr = \frac{1090^2 * 9.81 * 0.00329 * 130 * 1.3^3}{0.003^2} = 1.21688 \times 10^{12}$$

$$Pr = \frac{\mu C_p}{K}$$

$$Pr = \frac{0.003 * 3560}{0.82} = 13.02$$

$$Gr \cdot Pr = 13.02 * 1.21688 \times 10^{12} = 15.8438 \times 10^{12} > 1 \times 10^9$$

$$Nu = \frac{hD}{K} = 0.12 (Gr \cdot Pr)^{0.33}$$

$$Nu = \frac{h * 1.3}{0.82} = 0.12 (1.21688 \times 10^{12} * 13.02)^{0.33}$$

$$h = \frac{0.82}{1.3} * 0.12 (1.21688 \times 10^{12} * 13.02)^{0.33} = 1717.93 \frac{W}{m^2 K}$$

# انتقال الحرارة والموائع - عملي

## انتقال الحرارة بالإشعاع

### الوحدة الثالثة: انتقال الحرارة بالإشعاع

**الجدارة:** التعرف على كيفية إجراء العمليات الحسابية في حالة التبادل الحراري الإشعاعي.

**الأهداف:** معرفة آلية حساب الانبعاثية لجسم معين وأهمية الإشعاع الحراري وتطبيقاته المختلفة في مجال التصنيع الغذائي.

**مستوى الأداء المطلوب:** أن يصل المتدرب إلى إتقان الجدارة بنسبة ٩٥٪.

**الوقت المتوقع للتدريب على الجدارة:** ٤ ساعات.

**الوسائل المساعدة:** لا يحتاج المتدرب إلى أية وسائل مساعدة باستثناء الآلة الحاسبة.

**متطلبات الجدارة:** أن يقوم المتدرب بتطبيق قوانين الإشعاع الحراري لأمثلة حقيقية في منشأة التصنيع الغذائي ويستشعر الدور الكبير الذي يلعبه الإشعاع الحراري في رفع مستوى الفقد الحراري من هذه الأجهزة والتي تلعب دوراً أساسياً في عمليات التصنيع الغذائي المختلفة. كما يتعرف المتدرب على مفهوم الانبعاثية كخاصية هامة في الإشعاع الحراري من الأجسام.

## تمارين على انتقال الحرارة بالإشعاع في منشأة تصنيع غذائي

تمرين (١):

مبستر من إستانلس إستيل قطره 1m وارتفاعه 2m ودرجة حرارة سطحه  $70C^0$  موضوع في منشأة تصنيع غذائي أبعادها 10x6x4m ودرجة حرارة الهواء في تلك المنشأة تساوي  $20C^0$  احسب معدل الفقد الحراري من المبستر إلى المحيط بالإشعاع فقط ومن ثم احسب معدل الفقد الحراري من المبستر إلى المحيط بالإشعاع والحمل الحراري معاً علماً بأن معامل انتقال الحرارة بالحمل بين الهواء والمبستر يساوي  $13.2w/m^2k$  وانبعاثية المبستر تساوي 0.85 وثابت ستيفان وبولتزمان  $5.67 \times 10^{-8} w/m^2k^4$

الحل:

نجد مساحة المبستر على الشكل التالي:

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

$$A = 2 * \frac{\pi}{4} * 1^2 + \pi * 1 * 2 = 1.571 + 6.286 = 7.857m^2$$

نجد مساحة المنشأة على الشكل التالي:

$$A = 2 * (10 * 4) + 2 * (10 * 6) + 2 * (6 * 4) = 80 + 120 + 48 = 248m^2$$

نحول درجات الحرارة إلى الكلفن كالتالي:

$$T_1 = 70 + 273 = 343K$$

$$T_2 = 20 + 273 = 293K$$

نلاحظ أن مساحة المنشأة أكبر بكثير منها للمبستر وهي تحيط بالمبستر وبالتالي نحسب معدل الفقد الحراري بالإشعاع كمايلي:

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

$$q_r = 0.85 * 5.67 \times 10^{-8} * 7.857 (343^4 - 293^4) = 2450.5w$$

نحسب معدل الفقد الحراري بالحمل:

$$q_c = h_c A (T_s - T_f)$$

$$q_c = 13.2 * 7.857 (70 - 20) = 5185.6w$$

وبالتالي مجموع الفقد الحراري بالحمل والإشعاع معاً من المبستر يساوي 7636.1w.

تمرين (٢):

قرص معدني أسود اللون خشن الملمس A قطره 20cm وسماكته 3cm ودرجة حرارة سطحه  $300C^0$  وضع مقابل قرص آخر B مشابه له ولونه رمادي وتم عزل النظام حتى لا يتم فقد الحرارة من القرص A إلا إلى القرص B وبعد مرور خمس دقائق قيست درجة حرارة القرص B فوجدت أنها تساوي  $75C^0$  فإذا علمت أن كمية الطاقة الحرارية المفقودة بالإشعاع من القرص A إلى القرص B تساوي 120w احسب الانبعاثية للقرص B

الحل:

نحسب مساحة القرص المعدني وهي:

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

نحول درجات الحرارة إلى الكلفن كمايلي:

$$T_1 = 300 + 273 = 573K$$

$$T_2 = 75 + 273 = 348K$$

ومن المعادلة التالية نجد أن:

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

$$120 = \varepsilon * 5.67 \times 10^{-8} * 0.0314 * (573^4 - 348^4) = 0.724$$

مسائل وتمارين

١. وضح المقصود بالانبعاثية ؟ واذكر ثلاث خواص إشعاعية أخرى للأجسام
٢. ماذا نعني بالجسم الرمادي؟
٣. ما هو الفرق بين انتقال الحرارة بالحمل وانتقال الحرارة بالإشعاع؟



# انتقال الحرارة والموائع - عملي

## المبادلات الحرارية

### الوحدة الرابعة : المبادلات الحرارية

**الجدارة:** التفريق بين المبادلات الحرارية ذات الأشكال المختلفة كالمبادل الحراري المتوازي والمعكوس والمبادل الحراري من النوع المتقاطع.

**الأهداف:** أن يقوم المتدرب بالتعرف والتفريق بين المبادل الحراري المتوازي والمبادل الحراري المعكوس والمبادل الحراري المتقاطع بناء على شكل دخول المائع إلى المبادل.

**مستوى الأداء المطلوب:** أن يصل المتدرب إلى إتقان الجدارة بنسبة ٩٠٪.

**الوقت المتوقع للتدريب على الجدارة:** ٨ ساعات

**الوسائل المساعدة:** رسومات توضيحية لأشكال مختلفة وأنواع متعددة من المبادلات الحرارية.

**متطلبات الجدارة:** أن يكون المتدرب قادرا على التفريق بين الأنواع المختلفة من المبادلات الحرارية وإدراك الأهمية والغرض من وجود كل نوع منها في منشأة التصنيع الغذائي. وأن يتمكن بعد ذلك من رسم هذه المبادلات الحرارية بصورة مبسطة كما يلزم للمتدرب فهم كيفية إجراء العمليات الحسابية لكل نوع من الأنواع.

## الدرس العملي الأول

### التعرف على المبادلات الحرارية

### Heat Exchangers

المبادل الحراري هو أداة لنقل الطاقة الحرارية من مائع درجة حرارته مرتفعة إلى مائع درجة حرارته منخفضة وذلك أثناء حركة المائع خلال. ومن الأمثلة على المبادلات الحرارية المدفأة المنزلية، وروديتر 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.

### أنواع المبادلات الحرارية حسب آلية دخول وخروج المائع إليها:

١. المبادل الحراري من النوع المتوازي Parallel Flow Heat Exchanger.

٢. المبادل الحراري من النوع المعكوس Counter Flow Heat Exchanger.

٣. المبادل الحراري من النوع المتعامد Cross Flow Heat Exchanger.

### تحليل المبادل الحراري:

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

$$q_h = m_h^0 C p_h (T_{hi} - T_{h0})$$

ومعدل الكسب الحراري للمائع البارد بالمعادلة التالية:

$$q_c = m_c^0 C p_c (T_{c0} - T_{ci})$$

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.

$C p_c$  الحرارة النوعية للمائع البارد.

$C p_h$  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:

$$q = UA\Delta T_m$$

حيث أن:

$U$ : يمثل معامل انتقال الحرارة الكلي للمبادل الحراري.

$A$ : تمثل مساحة سطح التلامس للمبادل الحراري.

$\Delta T_m$ : تمثل الفرق في درجة الحرارة بين المائعين الساخن والبارد وتعطى بالمعادلة التالية:

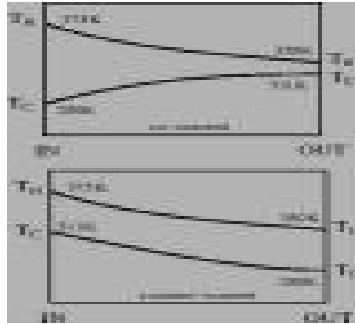
$$\Delta T_m = \frac{(Th_2 - Tc_2) - (Th_1 - Tc_1)}{\ln \left[ \frac{(Th_2 - Tc_2)}{(Th_1 - Tc_1)} \right]}$$

وهذا الفرق الحراري  $\Delta T_m$  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.



شكل (توزيع درجات الحرارة على طول المبادل الحراري المتوازي والمعاكس).

## الدرس العملي الثاني

### المبادل الحراري من النوع المعكوس

### Counter Flow Heat Exchanger

في حالة المبادل الحراري من النوع المعكوس يكون الفرق اللوغاريتمي لمتوسط درجة الحرارة يساوي:

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

تمرين (١):

ماء يتدفق بمعدل مقداره (68kg/min) يتم تسخينه بواسطة زيت من (35C<sup>0</sup>) إلى (65C<sup>0</sup>) في مبادل حراري متعاكس. إذا كانت الحرارة النوعية للماء 4100J/kgK وللزيت (1.9kj/kg) ودرجة حرارة الزيت أثناء دخوله (110C<sup>0</sup>) وأثناء خروجه (75C<sup>0</sup>) وإذا كان معامل انتقال الحرارة الكلي للمبادل الحراري هو (320w/m<sup>2</sup>) أجب عما يلي:

١. احسب معدل الكسب الحراري للماء في المبادل الحراري .

$$q_c = m_c^0 Cp (T_{c0} - T_{ci})$$

$$q_h = \frac{68}{60} * 4100(65 - 35) = 139400w$$

٢. احسب معدل تدفق الزيت .

$$q_h = m_h^0 Cp(T_{hi} - T_{ho}) = m_c^0 Cp(T_{c0} - T_{ci}) = q_c = 139400$$

$$q_h = m_h^0 * 1900 * (110 - 75) = 139400$$

$$m_h^0 = \frac{139400}{1900 * (110 - 75)} = 2.09 \frac{kg}{sec}$$

٣. احسب الفرق اللوغاريتمي لمتوسط درجة الحرارة .

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

$$LMTD = \frac{(110 - 65) - (75 - 35)}{\ln \frac{(110 - 65)}{(75 - 35)}} = \frac{45 - 40}{\ln \frac{45}{40}} = \frac{5}{0.1178} = 42.45C^0$$

٤. احسب مساحة المبادل الحراري .

$$q = UA(LMTD)$$

$$139400 = 320 * A * 42.45 \Rightarrow A = \frac{139400}{320 * 42.45} = 10.26m^2$$

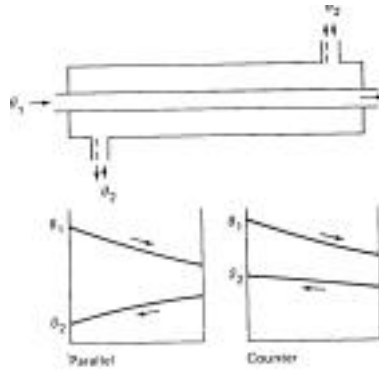
## الدرس العملي الثالث

### المبادل الحراري من النوع المتوازي

#### Parallel Flow Heat Exchanger

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

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



تمرين (٢):

يتم تبريد 1.9kg/s من الحليب من 68 C<sup>0</sup> إلى 34.5 C<sup>0</sup> في مبادل حراري من النوع المتوازي. تم استخدام الماء لهذا الغرض حيث كانت درجة حرارة الماء الداخل إلى المبادل الحراري تساوي 4C<sup>0</sup> والخارجة منه تساوي 24.9C<sup>0</sup>. إذا علمت أن الحرارة النوعية للحليب تساوي 3500J/kg.k وللماء تساوي 4100J/kg.k وكانت مساحة المبادل الحراري تساوي 3.6m<sup>2</sup>. أجب عما يلي:

١. احسب معدل تدفق الماء البارد في المبادل الحراري.

$$q_h = q_c \Rightarrow m_h^0 Cp(T_{hi} - T_{ho}) = m_c^0 Cp(T_{co} - T_{ci})$$

$$1.9 * 3500(68 - 34.5) = m_c^0 * 4100(24.9 - 4)$$

$$222775 = m_c^0 * 85690 \Rightarrow m_c^0 = \frac{222775}{85690} = 2.6 \frac{kg}{sec}$$

٢. احسب الفرق اللوغاريتمي لمتوسط درجة الحرارة .

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

$$LMTD = \frac{(68 - 4) - (34.5 - 24.9)}{\ln \frac{(68 - 4)}{(34.5 - 24.9)}} = \frac{64 - 9.6}{\ln \frac{64}{9.6}} = \frac{54.4}{1.897} = 28.67C^0$$

٣. احسب معامل انتقال الحرارة الكلي للمبادل الحراري .

$$q = UA(LMTD)$$

$$222775 = U * 36(28.67) \Rightarrow U = \frac{222775}{36 * 28.67} = 215.84 \frac{w}{m^2 K}$$



## الدرس العملي الرابع

### المبادل الحراري من النوع المتعامد

### Cross Flow Heat Exchanger

أما في حالة استخدام مبادل حراري بأكثر من أنبوب (متعدد المسار) فإننا نستخدم معامل تصحيح F Correction Factor لمعالجة الوضع الجديد. وهذا المعامل يمكن إيجاداه من الأشكال المرفقة حسب نوع المبادل الحراري ومن خلال المعادلة التالية:

$$q = UAF(LMTD)$$

بحيث يتم إيجاد F 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 من 0.75 وإذا كانت تلك القيمة أقل من هذا الرقم فإنه يجب أن نبحث عن شكل آخر. وعندما ينساب المائع البارد خلال الأنابيب فان R، P هي المتغيرات التي تستخدم في الخرائط لحساب معامل التصحيح. حيث أن P هو النسبة بين درجة الحرارة المكتسبة للمائع البارد وبين أكبر فرق لدرجات الحرارة في المبادل الحراري. أما R 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 رموز c, h في التعريفات السابقة.

تمرين (٣):

مبادل حراري متعامد الانسياب أحادي المسار يستخدم لتبريد 3.6kg/s من الزيت من 85C<sup>0</sup> إلى 40C<sup>0</sup> بواسطة ماء تبريد. فإذا كانت درجة حرارة الماء البارد الداخلة تساوي 10C<sup>0</sup> والخارجة تساوي 25C<sup>0</sup>. احسب مساحة المبادل الحراري إذا علمت أن الحرارة النوعية للزيت 3000J/kgK وللماء 4100J/kgK وكان معامل انتقال الحرارة الكلي للمبادل الحراري يساوي 250w/m<sup>2</sup>K.

نحسب أولاً قيمة R , حيث أن:

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

$$P = \frac{25 - 10}{85 - 10} = \frac{15}{75} = 0.2$$

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

$$R = \frac{85 - 40}{25 - 10} = \frac{45}{15} = 3$$

ومن الشكل نجد أن F=0.95.

نحسب الفرق اللوغاريتمي لمتوسط درجة الحرارة:

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

$$LMTD = \frac{(85 - 25) - (40 - 10)}{\ln \frac{(85 - 25)}{(40 - 10)}} = \frac{60 - 30}{\ln \frac{60}{30}} = \frac{30}{0.693} = 43.29C^0$$

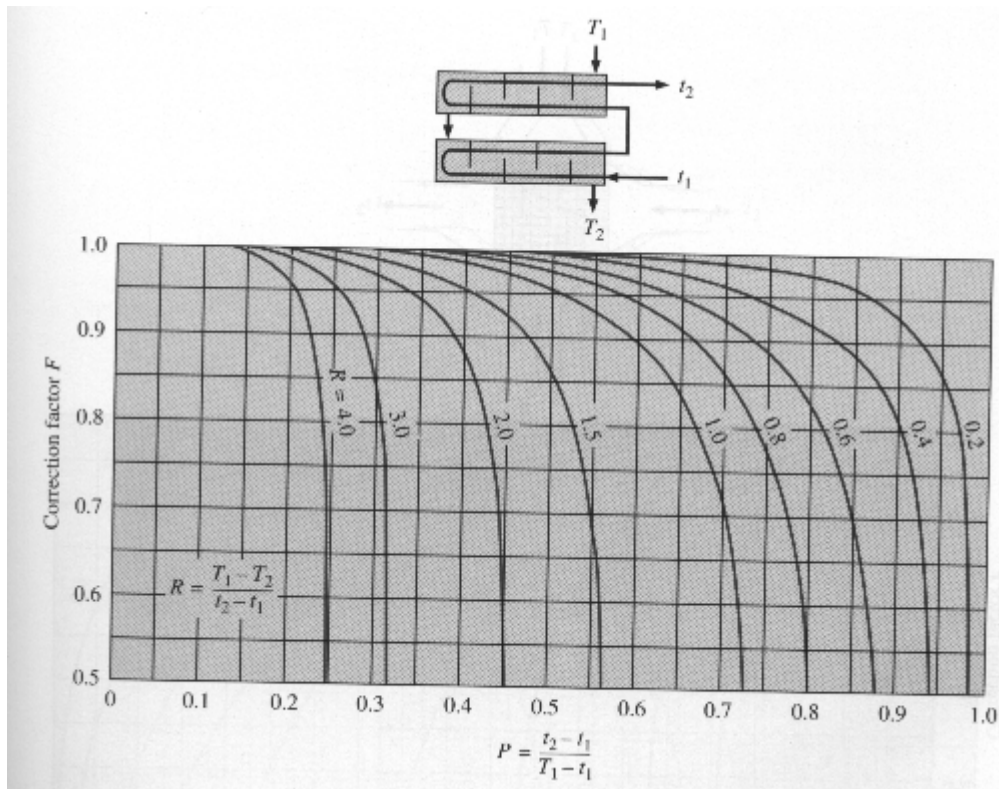
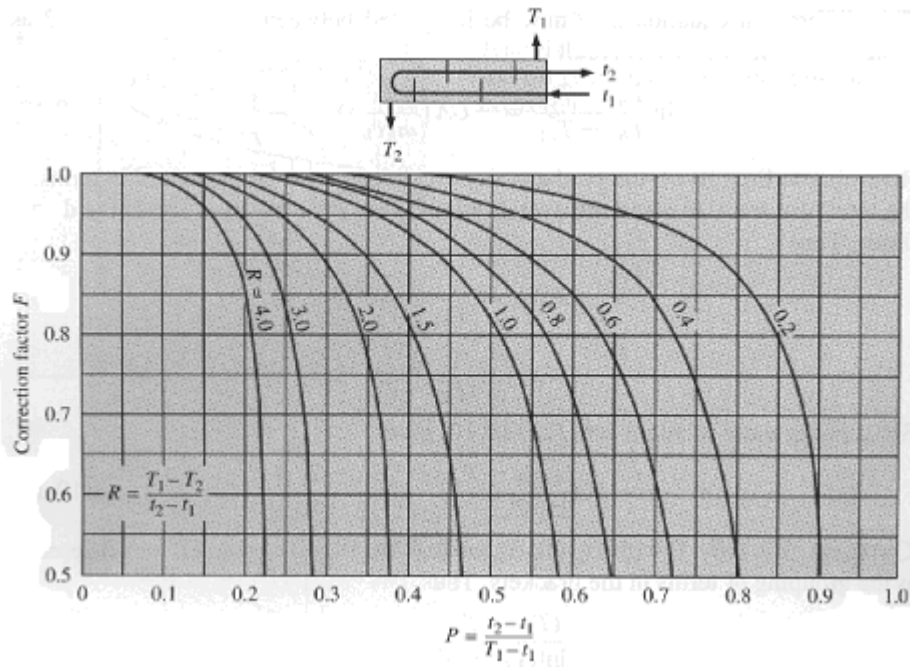
ولحساب q نستخدم المعادلة التالية:

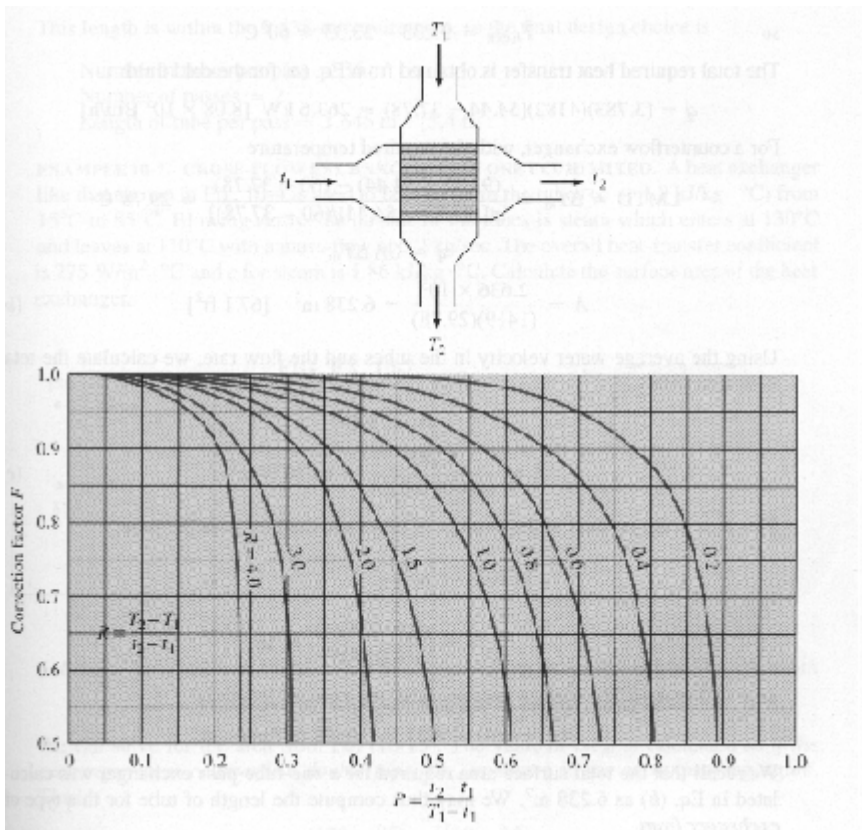
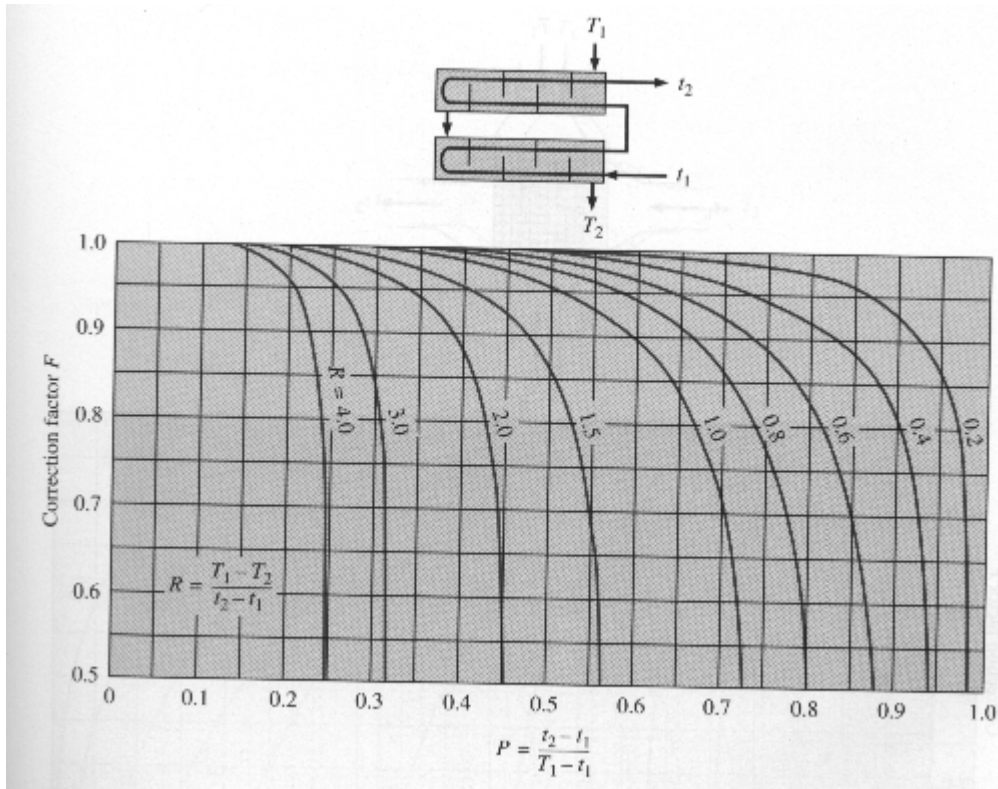
$$q_h = m_h^0 Cp(T_{hi} - T_{ho})$$

$$q_h = 3.6 * 3000(85 - 40) = 486000w$$

$$q = UAF(LMTD)$$

$$486000 = 250 * A * 0.95(43.29) \Rightarrow A = \frac{486000}{250 * 0.95 * 43.29} = 47.27m^2$$





تمارين ومسائل :

١. ارسم رسماً مبسطاً لمبادل حراري أنبوبي من النوع المعكوس وآخر من النوع المتوازي وبين عليه مكان واتجاه دخول المائع البارد والساخن .
٢. وضح بالرسم توزيع درجات الحرارة على طول المبادل الحراري في حالتي المبادل الحراري المتوازي والمعكوس مبينا عليها اتجاه الدخول والخروج للمائعين مستعيناً بالرموز .
٣. أيهما أكفأ عند نفس درجات حرارة الدخول والخروج للمائعين البارد والساخن المبادل الحراري المتوازي أم المعكوس ؟ بين ذلك بفرض أرقام تجريبية لدرجات الحرارة للمائع الساخن والبارد .

# انتقال الحرارة و الموائع - عملي

المانوميترات

المانوميترات

٥

### الوحدة الخامسة: المانوميترات

**الجدارة:** التعرف على الطرق المختلفة لقياس الضغط وكيفية إجراء حسابات الضغط..

**الأهداف:** معرفة آلية عمل المانوميتر وكيفية استخدامه في قياس الضغط والآلية التي يتغير بناءً عليها ضغط المائع وهو في حالة السكون.

**مستوى الأداء المطلوب:** أن يصل المتدرب إلى إتقان الجدارة بنسبة ٩٥٪.

**الوقت المتوقع للتدريب على الجدارة:** ٤ ساعات.

**الوسائل المساعدة:** أنبوب بوردون، ومانوميتر زئبقي، وباروميتر..

**متطلبات الجدارة:** أن يقوم المتدرب بقياس الضغط بأكثر من جهاز من الأجهزة المتوفرة على أن يتعرف على كيفية ربط كل جهاز أثناء بدء القياس. وأن يتدرب على بعض التمارين الحسابية لمانوميترات مختلفة.

## قياس الضغط : Pressure Measurements

هناك عدة أدوات تستخدم لقياس الضغط ومعظمها تستخدم مبدأ المانوميتر Manometer والذي يعمل على مبدأ أن الضغط يتغير مع الارتفاع كما هو الحال في جميع المانوميترات أو الغشاء المرن Elastic Member والذي يتأثر بمقدار الضغط المسلط عليه كما في أنبوب بوردون Bourdon-Tube Gage.

### أجهزة قياس الضغط:

١. أجهزة تعتمد على قياس عمود السائل.
٢. أجهزة تعتمد على قياس الانحراف في جسم جزء مرن.
٣. أجهزة قياس كهربائية.

### أجهزة قياس عمود السائل (المانوميتر):

وهي التي يتم فيها تعادل للضغط المراد قياسه بواسطة ضغط عمود السائل فإذا كانت كثافة عمود السائل معلومة فإن ارتفاع عمود السائل هو مقياس لذلك الضغط. وارتفاع عمود السائل يمكن أن يعبر عنه بوحدات طول أو يعدل مباشرة لوحدة ضغط. وتعرف هذه الأجهزة بالمانوميتر manometer. وبالتالي فإن ارتفاع السائل في أنبوبة عمودية تتصل بأي جهاز يحتوي على سائل هي مقياس مباشر للضغط عند نقطة الاتصال هذه. ويستخدم هذا النوع كثيراً في قياس مستوى السائل في الصهاريج وأوعية التخزين. والسائل المستخدم في هذه الأجهزة يمكن أن يكون أي سائل لا يختلط مع السائل المراد قياس ضغطه. كما أنه يستخدم في حالات فرق الضغط العالي سائل ذو كثافة عالية مثل الزئبق وفي حالات فرق الضغط المنخفض يستخدم سائل ذو كثافة منخفضة مثل الكحول أو الماء أو رابع كلوريد الكربون.

### أجهزة قياس الانحراف في جزء مرن:

وهي التي يقوم فيها الضغط المراد قياسه بتحريك الجزء المرن للمادة. ويتناسب مدى الانحراف طردياً مع الضغط. ومن أهم الأمثلة عليها أنبوب بوردون Bourdon Tubes والأجهزة ذات الأسطح المرنة. والأجهزة ذات الحجاب المرن. ويستخدم هذا النوع في قياسات الضغط المنخفضة كالتفريغ أو قياسات فرق الضغط.



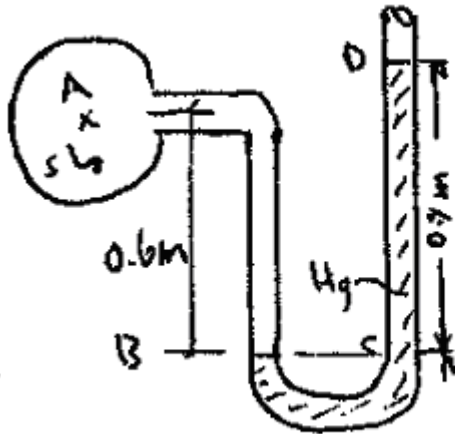
تمرين (١):

احسب الضغط عند النقطة A بوحدة bar والناشئ عن تغير منسوب الزئبق في أنبوب القياس U الموضح في الشكل علماً بأن الكثافة النسبية للزئبق هي 13.57 .

الحل:

$$P_A = P_D + \gamma_{Hg} h_{D-C} - \gamma_{h_2o} h_{B-A}$$

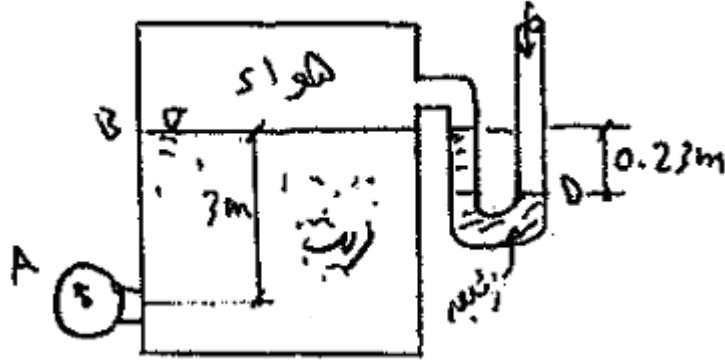
$$P_A = 1atm + 13.75 * 1000 * 9.81 * 0.7 - 9810 * 0.6$$



الشكل (٥ - ١) رسم توضيحي للتمرين رقم ١

تمرين (٢):

احسب قراءة الساعة A في الشكل التالي علماً بأن الكثافة النسبية للزيت تساوي 0.83 وللزئبق تساوي 13.6 .



الشكل (٥ - ٢) رسم توضيحي للتمرين رقم ٢

الحل:

$$P_A = P_D + \gamma_{Hg} h_{C-B} - \gamma_{oil} h_{B-A}$$

$$P_A = 0 + 13.6 * 9810 * 0.23 - 0.83 * 9810 * 3 = 2843.48 Pa$$

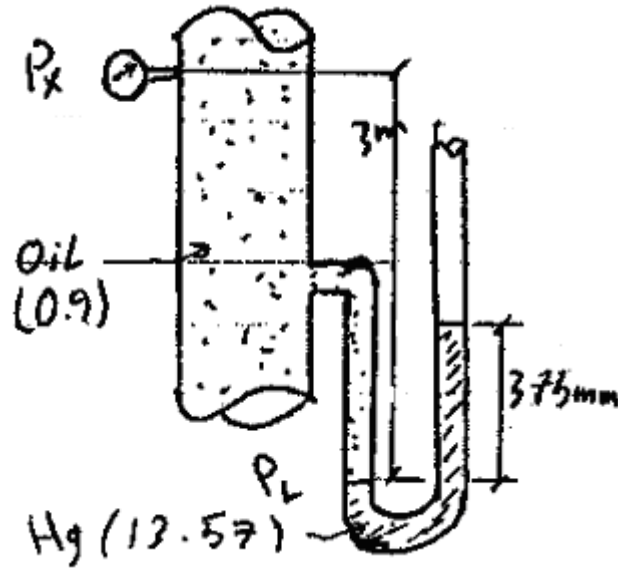
تمرين (٣):

في الشكل المرفق احسب قراءة الساعة  $p_x$ .

الحل:

$$P_x = P_D + \gamma_{Hg} h_{1-2} - \gamma_{oil} h_{2-x}$$

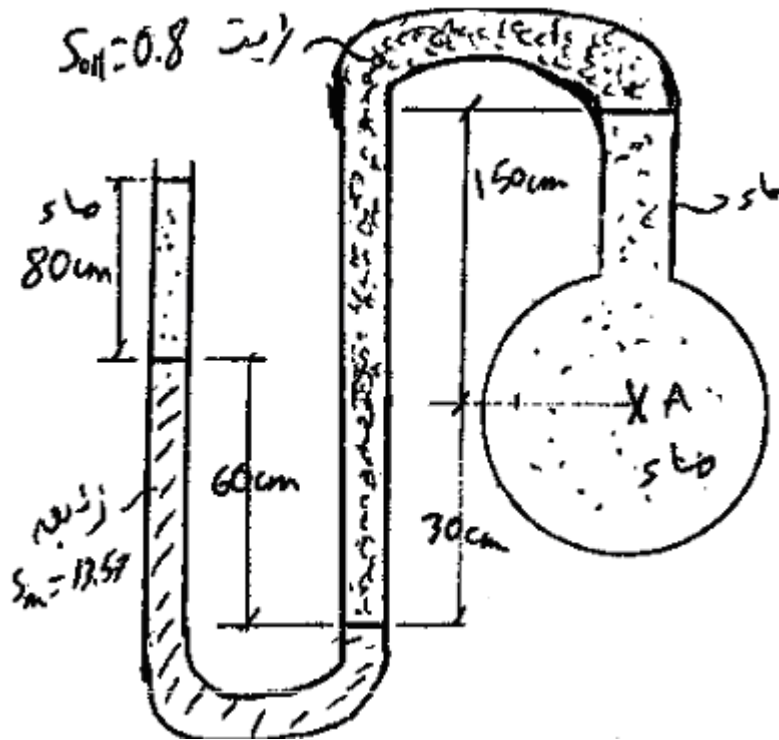
$$P_A = 0 + 13.57 * 9810 * 0.375 - 0.9 * 9810 * 3 = 47273.93 Pa$$



الشكل (٥- ٣) رسم توضيحي للتمرين رقم ٣

تمرين (٤):

في الشكل التالي ما هي قراءة الضغط عند النقطة A ؟



الشكل (٥- ٤) رسم توضيحي للتمرين رقم ٤

الحل:

$$P_A = P_1 + \gamma_{H_2O} h_{1-2} + \gamma_{Hgl} h_{2-3} - \gamma_{oi} h_{3-4} - \gamma_{oi} h_{4-5} + \gamma_{H_2O} h_{6-A}$$

$$P_A = 0 + 9810 * 0.8 + 13.57 * 9810 * 0.6 - 0.8 * 9810 * 0.3 - 0.8 * 9810 * 1.5 + 9810 * 1.5$$

$$P_A = 88309.62 Pa$$

# انتقال الحرارة والموائع - عملي

قياس اللزوجة

### الوحدة السادسة: قياس اللزوجة

**الجدارة:** التعرف على بعض الطرق والأجهزة المستخدمة لقياس اللزوجة.

**الأهداف:** معرفة كيفية استخدام الأجهزة المستخدمة لقياس اللزوجة للمائع وإجراء العمليات الحسابية المصاحبة لها كما يلزمنا التفريق بين اللزوجة الديناميكية المطلقة واللزوجة الكايناماتيكية.

**مستوى الأداء المطلوب:** أن يصل المتدرب إلى إتقان الجدارة بنسبة ٩٥٪.

**الوقت المتوقع للتدريب على الجدارة:** ٤ ساعات.

**الوسائل المساعدة:** لا يحتاج المتدرب إلى أية وسائل مساعدة باستثناء الآلة الحاسبة وورق رسم بياني لوغاريتمي.

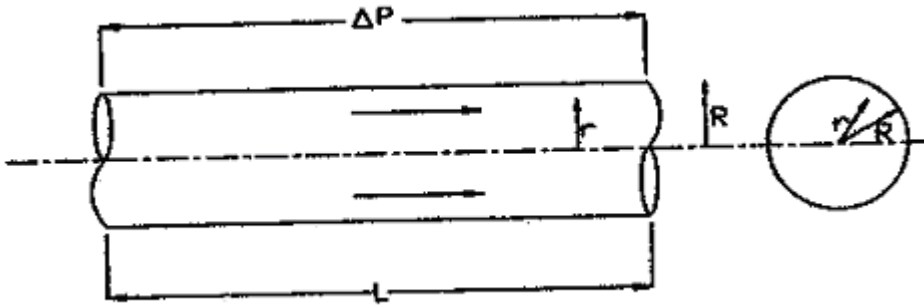
**متطلبات الجدارة:** أن يقوم المتدرب بالتعرف على الأجهزة المتوفرة لقياس اللزوجة وكيفية توصيلها وتحضيرها وكيفية التشغيل وإجراء عمليات القياس المختلفة عليها ومن ثم رسمها بطريقة مبسطة.

### أجهزة قياس اللزوجة

تقاس اللزوجة لأي مائع غذائي عن طريق الفيسكومترات Viscometers أو الريوميترات Rheometers وهناك طريقتان لحساب اللزوجة هما:

#### ١. ريوميتر الأنبوبة الشعرية Capillary Tube Rheometers:

ونستطيع الحصول على علاقة بين معدل القص وإجهاد القص وذلك بقياس تدرج الضغط ومعدل السريان الحجمي للمائع خلال الأنبوبة الشعرية.



الشكل (٦- ١) ريوميتر الأنبوبة الشعرية.

ومن موازنة القوى على المقطع العرضي للأنبوبة الشعرية نصل إلى:

$$\tau = \frac{F}{A} = \frac{\Delta P \pi r^2}{2\pi r L}$$

وبالتعويض

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

وبإجراء التكامل اللازم نصل إلى أن:

$$u = \frac{R^{\frac{n+1}{n}}}{1 + \frac{n}{n}} \left( \frac{\Delta P}{2KL} \right)^{\frac{1}{n}}$$

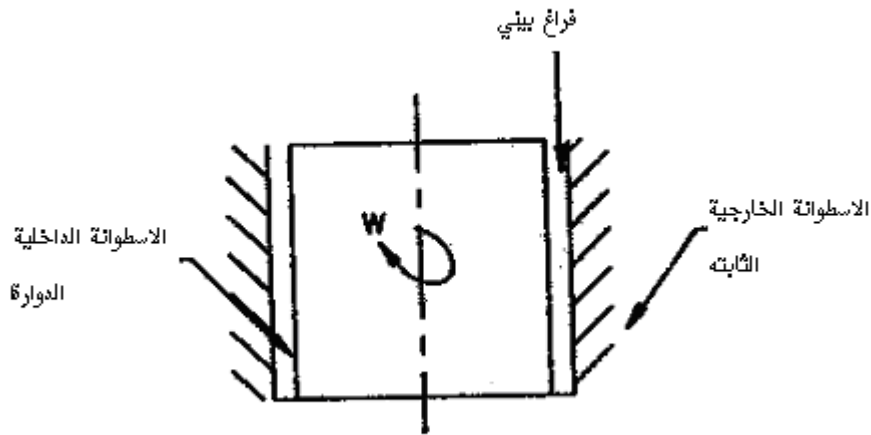
$$Q = \pi \left( \frac{n}{1+3n} \right) R^{\frac{3n+1}{n}} \left( \frac{\Delta P}{2KL} \right)^{\frac{1}{n}}$$

وبإدخال اللوغاريتم على المعادلة وإعادة الترتيب لها نصل إلى المعادلة التالية:

$$\text{Log} \frac{\Delta P}{2L} = \text{Log} K - n \text{Log} \pi - n \text{Log} \left( \frac{n}{1+3n} \right) + (3n+1) \text{Log} R + n \text{Log} Q$$

حيث أن R هو نصف قطر الأنبوب الشعري و L هو طول الأنبوب الشعري ويمكن حساب كل من معامل القوام K والأس n عن طريق رسم معدل السريان الحجمي Q مع قيمة  $(\Delta P/2L)$  على ورق رسم بياني لوغاريتمي ويكون الميل للخط المستقيم الناتج هو قيمة الأس n و مقدار المقطع الراسي هو قيمة معامل القوام K.

## (٢) - الريوميتر الدوراني المتمركز Rotational Coaxial Rheometers:



الشكل (٦- ٢) الريوميتر الدوراني المتمركز.

و في هذه الحالة تتم عملية القياس على أساس قياس عزم الدوران اللازم لإدارة الأسطوانة الداخلية عند عدد معلوم من الدوران لكل وحدة زمن ويكون:

$$T = (2\pi r L)(\tau)$$

$$\gamma = -r \frac{d\omega}{dr}$$



$$\tau = K \left( -r \frac{d\omega}{dr} \right)^n$$

حيث أن T هي العزم الدوراني ويساوي القوة مضروبة في ذراعها و  $\omega$  هي السرعة الزاوية. وبالتبسيط والتكامل وإجراء بعض العمليات الحسابية نصل إلى المعادلة التالية:

$$\omega_i = \frac{n}{2} \left( \frac{T}{2\pi K L} \right)^{\frac{1}{n}} \left( \frac{1}{R_i^{\frac{2}{n}}} - \frac{1}{R_0^{\frac{2}{n}}} \right)$$

ومن هذه المعادلة يمكننا أن نجد قيمة معامل القوام K و الأس n وذلك عن طريق رسم العلاقة التجريبية بين لوغاريتم السرعة الزاوية و لوغاريتم عزم الدوران على إحداثيات بيانية. أما للحصول على معامل اللزوجة فإننا نعوض عن  $n=1$  وبذلك تصبح المعادلة:

$$\mu = \left( \frac{T}{4\pi\omega_i L} \right) \left( \frac{1}{R_i^2} - \frac{1}{R_0^2} \right)$$

وبمقارنة المعادلتين الأخيرتين نحصل على العلاقة بين اللزوجة الظاهرية وكل من معامل القوام K و الأس n فإذا كانت السرعة الدورانية هي N فان:

$$\omega_i = 2\pi N$$

وبالتالي تكون العلاقة المطلوبة هي:

$$\mu_A = \left( \frac{1}{n} \right)^n (4\pi N)^{n-1} K$$

وبإدخال اللوغاريتم على المعادلة السابقة نجد أن:

$$\text{Log} \mu_A = n \text{Log} \left( \frac{1}{n} \right) + \text{Log} K + (n-1) \text{Log} (4\pi N)$$

مثال (٦- ١)

تم الحصول على النتائج التجريبية التالية من جهاز لقياس اللزوجة الأنبوبي قطره 0.267cm وطوله 0.91m وكان المائع المستخدم هو صلصة التفاح Apple Sauce.

12.49	8.50	5.20	3.20	2.10	2.50	0.91	Q(m <sup>3</sup> /s) 1X10 <sup>-4</sup>
2.70	2.41	2.13	1.99	2.56	1.45	1.30	ΔP(pa) 1X10 <sup>5</sup>

احسب كل من معامل القوام K وقيمة الأس n .

نرسم  $\text{Log} \frac{\Delta P}{2L}$  مع  $n \text{Log} Q$  ونحصل على أفضل خط مستقيم وميل الخط يساوي قيمة الأس n.

5.17	5.12	5.07	5.04	4.93	4.90	4.85	$\text{Log} \frac{\Delta P}{2L}$
-2.90	-3.07	-3.29	-3.50	-3.68	-3.82	-4.04	$\text{Log} Q$

ومن الرسم نجد أن الميل يساوي n=0.28. وبعد ذلك نعوض في المعادلة الأخيرة للحصول على معامل القوام K.

$$\text{Log} \frac{\Delta P}{2L} = \text{Log} K - n \text{Log} \pi - n \text{Log} \left( \frac{n}{1+3n} \right) + (3n+1) \text{Log} R + n \text{Log} Q$$

$$\text{Log} \frac{1.3 \times 10^5}{2 * 0.91} = \text{Log} K - 0.28 \text{Log} 3.14 - 0.28 \text{Log} \left( \frac{0.28}{1+3 * 0.28} \right) +$$

$$(3 * 0.28 + 1) \text{Log} \frac{0.267 \times 10^{-2}}{2} + 0.28 \text{Log} 0.91 \times 10^{-4}$$

$$4.854 = \text{Log} K - 0.139 + 0.229 - (-5.289) + (-1.131)$$

$$\text{Log} K = 4.854 + 0.139 - 0.229 - 5.289 + 1.131 = 0.606$$

$$\text{Log} K = 0.606 \Rightarrow K = \text{shiftLog} 0.606 = 4.036 \text{ Pa.s}^{0.28}$$

مثال (٦- ٢)

تم الحصول على النتائج التجريبية التالية للزوجة الظاهرية لمركز المولاس عند درجة حرارة 274K مستخدمين ريوميتر أحادي الأسطوانة المتمركزة التي قطرها 0.195m وطولها 0.1143m وذلك عند سرعات دورانية مختلفة. احسب كل من قيمة معامل القوام K والأس n .

14.2	14.6	15.4	15.5	16.0	16.6	$\mu_A(\text{pa.s})$
100.0	50.0	20.0	10.0	05.0	02.5	$N(\text{r p m})$
1.152	1.164	1.188	1.19	1.204	1.22	$\text{Log}(4\pi N)$
1.321	1.02	0.622	0.321	0.02	-0.281	$\text{Log}\mu_A$

الحل:

$$\text{Log}\mu_A = n\text{Log}\left(\frac{1}{n}\right) + \text{Log}K + (n-1)\text{Log}(4\pi N)$$

برسم العلاقة بين  $\text{Log}(4\pi N)$  وبين  $\text{Log}\mu_A$  نجد أن ميل المنحنى يساوي -0.0417. ومن المعادلة السابقة نجد أن ميل الخط المستقيم يساوي n-1 وبالتالي يكون الأس:

$$n-1 = -0.0417 \Rightarrow n = 0.9583$$

وبالتعويض في المعادلة

$$\text{Log}\mu_A = n\text{Log}\left(\frac{1}{n}\right) + \text{Log}K + (n-1)\text{Log}(4\pi N)$$

$$1.02 = 0.9583\text{Log}\left(\frac{1}{0.9583}\right) + \text{Log}K + (0.9583-1)*1.164$$

$$1.02 = 0.0177 + \text{Log}K - 0.0485 \Rightarrow \text{Log}K = 1.02 + 0.0485 - 0.0177 = 1.051$$

$$K = \text{shift}\text{Log}1.051 = 11.24\text{Pa.s}^{0.9583}$$

## انتقال الحرارة والموائع - عملي

قياس معدل التدفق الحجمي

### الوحدة السابعة: قياس معدل التدفق الحجمي

**الجدارة:** التعرف على بعض الطرق والأجهزة المستخدمة لقياس اللزوجة.

**الأهداف:** معرفة كيفية استخدام الأجهزة المستخدمة لقياس اللزوجة للمائع وإجراء العمليات الحسابية المصاحبة لها كما يلزمنا التفريق بين اللزوجة الديناميكية المطلقة واللزوجة الكايناماتيكية.

**مستوى الأداء المطلوب:** أن يصل المتدرب إلى إتقان الجدارة بنسبة ٩٥٪.

**الوقت المتوقع للتدريب على الجدارة:** ٨ ساعات.

**الوسائل المساعدة:** لا يحتاج المتدرب إلى أية وسائل مساعدة باستثناء الآلة الحاسبة وورق رسم بياني لوغاريتمي.

**متطلبات الجدارة:** أن يقوم المتدرب بتطبيق قوانين الإشعاع الحراري لأمثلة حقيقية في منشأة التصنيع الغذائي ويستشعر الدور الكبير الذي يلعبه الإشعاع الحراري في رفع مستوى الفقد الحراري من هذه الأجهزة والتي تلعب دوراً أساسياً في عمليات التصنيع الغذائي المختلفة.

**المقدمة:**

إن كمية المائع التي تتساب في وحدة الزمن من خلال مقطع معين تسمى بمعدل الانسياب أو معدل التدفق الحجمي وهو معدل الحجم من المائع والذي يدخل من خلال مقطع محدد ويعطى الرمز  $Q$  ووحدته هي  $m^3/s$  وهو يختلف عن معدل التدفق الكتلي حيث إن معدل التدفق الكتلي للمائع يرمز له بالرمز  $M^0$  ووحدته هي  $Kg/s$ . وهما يعطيان بالمعادلة التالية:

$$M^0 = \rho * Q$$

$$Q = V * A$$

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

حيث أن:

$V$  هي السرعة للمائع.

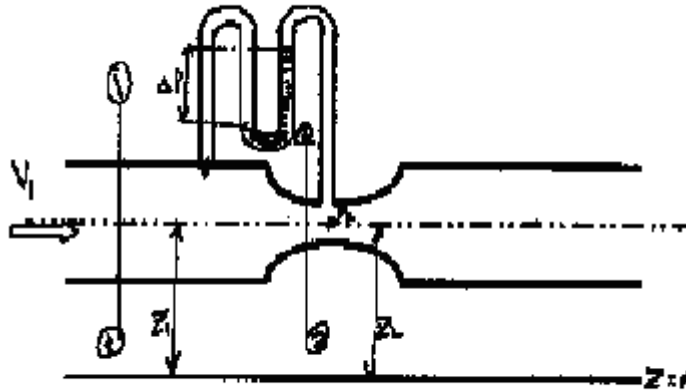
$A$  هي مساحة المقطع الذي يمر به المائع.

$\rho$  هي كثافة المائع.

## الدرس العملي الأول

### أنبوب الفنتشوري Venturi Meter :

وهو جهاز بسيط يستخدم لإيجاد التصريف الحجمي للمائع عن طريق تحويل سمت الضغط إلى سمت سرعة وذلك بالإفادة من معادلتى برنولي و الاستمرارية وهو عبارة عن أنبوب متخصر في منتصفه ومزود بما نوميتر لإيجاد فرق الضغط بين نقطتين محددتين كما هو في الشكل المرفق. ويمكن اعتبار الاحتكاك مهمل في هذه الحالة.



الشكل (٧- ١) أنبوب الفنتشوري موصول بمانوميتر.

وبتطبيق معادلة برنولي ومعادلة الاستمرارية بين النقطتين 1 و2 نجد أن:

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

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

وحيث انه تم اعتبار المائع غير قابل للانضغاط فإن معادلة الاستمرارية يمكن كتابتها كمايلي:

$$A_1 V_1 = A_2 V_2$$

$$V_1 = \frac{A_2 V_2}{A_1}$$

وحيث أن الضغط بين النقطتين 1 و2 يقاس باستخدام المانوميتر الزئبقي فإن الفرق في الضغط بين النقطتين 1 و2 يساوي:

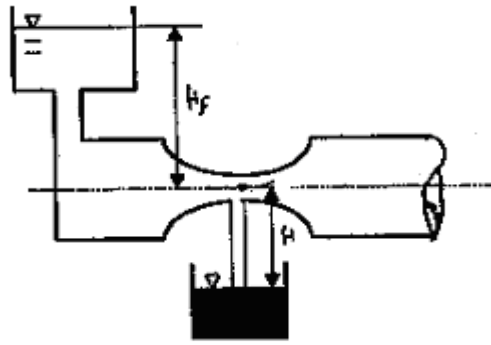
$$P_1 - P_2 = \Delta P = \gamma(h_1 - h_2) = \gamma \Delta h$$

وبالتعويض في معادلة برنولي وإعادة ترتيب المعادلة وبإدخال معامل للسريان  $C$  نجد أن:

$$V_2 = C \sqrt{\frac{2g\Delta h}{1 - \frac{A_2^2}{A_1^2}}}$$

ومعدل التدفق الحجمي يساوي:

$$Q_2 = CA_2 \sqrt{\frac{2g\Delta h}{1 - \frac{A_2^2}{A_1^2}}}$$



الشكل (٧- ٢) أنبوب فنتشوري ميتر.

ويعتبر الفنتشوري متر وسيلة دقيقة لقياس الانسياب في خطوط الأنابيب باستعمال وسيلة تسجيل مناسبة وبمكاملة معدل الانسياب لحساب الكمية الكلية للانسياب إلا أن من عيوب جهاز الفنتشوري هو المقاومة الاحتكاكية بين المائع والأنابيب. وغالباً ما نختار قيم الأقطار بحيث تكون نسبتها  $1/2$  وكلما قلت هذه النسبة تزداد دقة جهاز الفنتشوري مع زيادة مرتفعة في فقد الاحتكاكي أو انخفاض في الضغط وبالتالي حدوث ظاهرة التكهف.



## تمرين (١)

إذا كان فرق الارتفاع في المانوميتر الزئبقي المتصل بالفرنثشوري متر هو 0.36m أوجد معدل التصريف الحجمي له إذا علمت أن الأقطار للفرنثشوري عند النقطتين 1 و ٢ هي  $D_2=150\text{mm}$  و  $D_1=300\text{mm}$  وأنه لا يوجد فقد للطاقة بين النقطتين المذكورتين .

الحل:

نحسب المساحة قبل وبعد التخصر

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

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

$$A_2 = \frac{\pi}{4} * 0.15^2 = 0.0177\text{m}^2$$

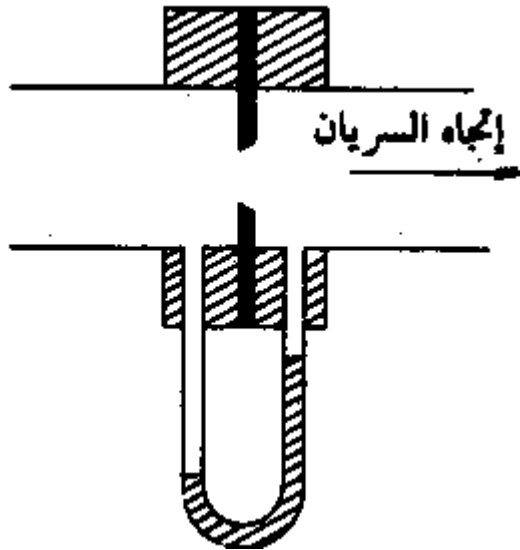
$$Q_2 = CA_2 \sqrt{\frac{2g\Delta h}{1 - \frac{A_2^2}{A_1^2}}}$$

$$Q_2 = 1 * 0.0177 \sqrt{\frac{2 * 9.81 * 0.36}{1 - \frac{(0.0177)^2}{(0.0707)^2}}} = 0.0485 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

## الدرس العملي الثاني

### مقياس الفتحة Orifice Meter :

ويتكون من قرص مسطح ذي ثقب دائري موضوع بين شفتين من أنبوبة ويعمل على نفس مبدأ عمل الفنتشوري. فسرعة المائع تزداد كلما مر خلال القرص والضغط يقل وتيار المائع سيستمر في الانفراج بعد مروره من الفتحة والسرعة القصوى تكون على بعد مسافة باتجاه التيار. والمعادلات التي تستخدم لمقياس الفتحة نفسها التي تطبق على الفنتشوري إلا أن الفقد الاحتكاكي فيه أكبر بكثير منه في حالة جهاز الفنتشوري وبالتالي لا بد من إدخال عامل لتعويض ذلك الفقد ويسمى بمعامل التصريف وقيمة معامل التصريف تعتمد على درجة دقة التصميم وعلى مكان الفتحة وعلى رقم رينولدز وكذلك على نسبة قطر الفتحة إلى قطر الأنبوب. وتقدر قيمته ب ٠.٦١ عندما يكون رقم رينولدز أقل من ٣٠٠٠. ويتم استخدام نفس المعادلات التي تستخدم في الفنتشوري إلا أنه يخلق اضطراباً للسريان أكبر بكثير من الذي يحدث في الفنتشوري وبالتالي فإن كل طاقة الحركة تفقد على شكل احتكاك. ويمكن تركيب مقياس الفتحة على خط الأنابيب بمشاكل أقل من تلك التي قد يتسبب بها مقياس الفنتشوري وتكلفة أقل.



الشكل (٧ - ٣) مقياس فتحة.

تمرين (٢)

يسري ماء في مقياس فتحة بسرعة مقدارها 0.3m/s فإذا كان قطر الأنبوب يساوي 30cm وقطر الفتحة يساوي 6cm أوجد مقدار الفقد في الضغط عبر الفتحة علماً بأن معامل التصريف للفتحة يساوي 0.82؟

الحل:

من معادلة الاستمرارية نحسب السرعة عند الفتحة وهي:

$$A_1 V_1 = A_2 V_2$$

$$\left(\frac{\pi}{4} * 0.3^2\right) * 0.5 = \left(\frac{\pi}{4} * 0.06^2\right) * V_2 \Rightarrow V_2 = 7.5 m/s$$

$$V_2 = C \sqrt{\frac{2g\Delta h}{1 - \frac{A_2^2}{A_1^2}}}$$

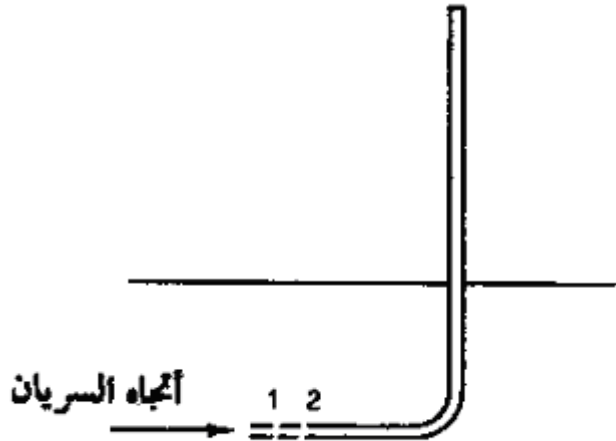
$$7.5 = 0.82 * \sqrt{\frac{2 * 9.81 * \Delta h}{1 - \frac{0.0028^2}{0.071^2}}} \Rightarrow \Delta h = 7.45 m$$

$$\Delta P = \gamma \Delta h = 9810 * 7.45 = 73084.5 pa$$

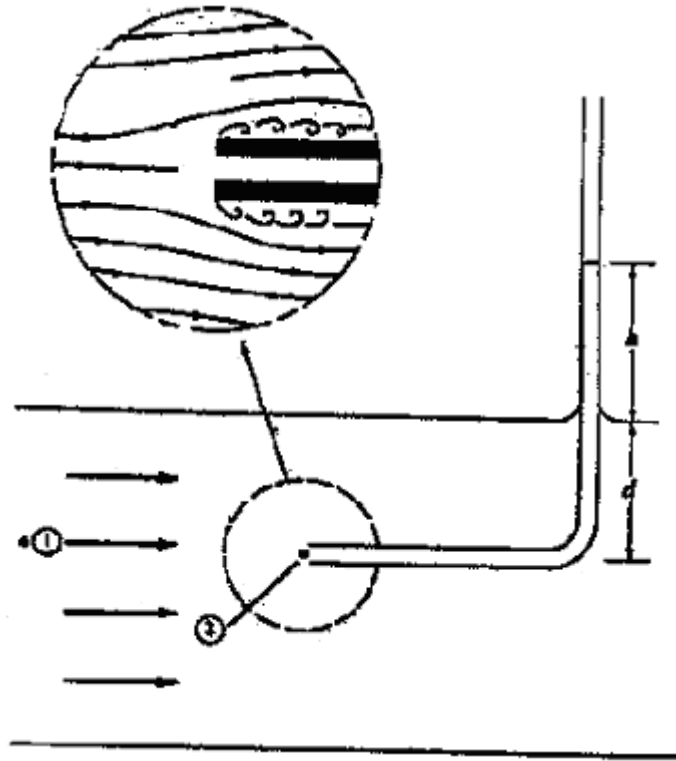
## الدرس العملي الثالث

### أنبوب بيتوت Pitot Tupe:

وهو عبارة عن مجس يستخدم لقياس الضغط (السرعة الموضعية) ولكن في الموائع المتحركة. وهو مكون من Stagnation Pressure Tap و Static Pressure Tap كما في الشكل. حيث إنه أنبوبة ذات قطر وبها انحناء  $90^0$  قرب إحدى النهايات وضعت بحيث تواجه النهاية القصيرة اتجاه التيار وتعاكسه وموازية لمحور الماسورة والنهاية الطويلة تمتد إلى الخارج خلال جدار الأنبوبة وتكون النهاية الخارجية مغلقة. فالسرعة عند المقطع الأول من هذه الأنبوبة هي السرعة التي تسود عند هذه النقطة من التيار الرئيس. ونلاحظ أنه لا يوجد سريان خلال الأنبوبة الصغيرة فإن السرعة في المقطع الثاني تساوي صفراً. ويمكن أخذ تأثير الاحتكاك بإدخال معامل على النتيجة النهائية.



الشكل (٧ - ٤) أنبوب بيتوت.



الشكل (٧ - ٥) أنبوب بيتوت مبيناً منطقة انعدام السرعة.

وعند تطبيق معادلة برنولي بين النقطتين ١ و ٢ يكون:

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

ولكن  $V_1$  تكون مساوية للصفر وكذلك:

$$\frac{P_1}{\rho_1 g} + Z_1 = h_1$$

$$\frac{P_2}{\rho_2 g} + Z_2 = h_2$$

فتصبح المعادلة كمايلي:

$$V = C\sqrt{2g(h_1 - h_2)}$$

ويسمى الفرق في الضغط بضغط السرعة (الضغط الناتج من تحويل الطاقة الحركية للتيار إلى عمود ضغط). ونلاحظ أن الفرق بينه وبين المقياسين السابقين هو أنه يقيس السرعة عند نقطة في التيار في

حين أن مقياس الفنتشوري والفتحة تعطيان السرعة المتوسطة للتيار كله. ويمكن تحريك أنبوب بيتوت خلال القطر للحصول على منحني السرعة. وللحصول على السرعة المتوسطة فإننا نكامل منحني السرعة للحصول على معدل السريان الحجمي ونقسمه على مساحة المقطع.

$$Q = \int 2V\pi r dr$$

$$\bar{V} = \frac{Q}{\pi R^2}$$

$$\bar{V} = \int V \left( \frac{r}{R} \right)^2 dr$$

تمرين (٣)

يتحرك ماء خلال ماسورة قطرها 52.5mm من الصلب بمعدل 200litters/min ويراد تركيب مقياس فتحة لقياس معدل السريان وتم استخدام مانوميتر مع القياس قراءته القصوى 25Cm Hg ما هو قطر الفتحة اللازم لإعطاء هذا الفقد في الضغط عند 200litters/min علماً بأن معامل الفتحة هو 0.61؟  
الحل:

نحسب المساحة المقطعية للماسورة قبل الفتحة

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

$$A = \frac{\pi}{4} * 0.0525^2 = 0.00216m^2$$

نحسب السرعة قبل الفتحة وهي:

$$V_1 = \frac{Q_1}{A_1} = \frac{200 * \frac{1}{1000} * \frac{1}{60}}{0.00216} = 1.543 \frac{m}{s}$$

نحسب السرعة عند الفتحة من خلال معادلة برنولي:

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

وباعتبار أن الماسورة أفقية فإن  $z_1 = z_2$  ولذلك:

$$h_1 + \frac{V_1^2}{2g} = h_2 + \frac{V_2^2}{2g} \Rightarrow V_2 = \sqrt{2g(h_1 - h_2) + V_1^2}$$

$$V_2 = \sqrt{2 * 9.81(0.25) + (1.543)^2} = 1.622 \frac{m}{s}$$

نحسب قطر الفتحة من خلال المعادلة التالية:

$$V_2 = \frac{Q_2}{A_2} = \frac{Q_2}{\frac{\pi}{4} D_2^2} \Rightarrow D_2 = \sqrt{\frac{4Q_2}{\pi V_2}}$$

$$D_2 = \sqrt{\frac{4 * \frac{200}{1000 * 60}}{3.14 * 1.622}} = 0.0511m$$

### أجهزة قياس ذات المساحة المتغيرة Variable-Area meters:

تتضمن مقاييس التدفق السابقة مثل مقياس الفتحة و فنشوري التغير في معدل التدفق خلال مقطع مساحة يتولد فيه فرق ضغط يعد دالة لمعدل التدفق. وفي مقاييس المساحة المتغيرة يعاق المائع المتدفق بطريقة تصميم بحيث يختلف مقطع المساحة. فتتيح هذه الطريقة تغييرا في التدفق بينما تحافظ على فرق ضغط ثابت. وترتبط مساحة القطع في هذه المقاييس بمعدل التدفق بوساطة المعايرة المناسبة. والنوع الشائع من هذه المقاييس هو الجهاز الدوار الروتوميتر وفي هذا الجهاز، يوضح ارتفاع الثقل أو العوامة بالأنبوبة التدفق. وتتحرك العوامة أعلى وأسفل تحركاً رأسياً. ويكون أكبر قطر للأنبوبة إلى أعلى بالقمة. ويتدفق المائع إلى أعلى من أسفل ويترك العوامة. وبسبب ارتفاع كثافة العوامة، يتجمع المائع المار حتى يزداد الضغط ويزداد التأثير عليه فيتجاوز العوامة، وعندئذ، المائع يتدفق بين العوامة وجدار الأنبوبة. عند زيادة عبور المائع، يتحقق الاتزان الحركي بين موضع العوامة و فرق الضغط عبر العوامة و قوى الطفو.

تكون مسطرة القياس موضحة على الجدار الخارجي للأنبوبة، حيث توضح القياس الرأسي لموضع العوامة من نقطة البداية و بالتالي يمكن قياس تدفق المائع. وكلما ترتفع العوامة في الأنبوبة تتوافر مساحة أكبر للمائع لكي يعبر من خلال الأنبوبة، وهذا هو السبب في تسمية هذا المقياس بمقياس التدفق المتغير. وتصنع مواد الأنبوبة من الزجاج أو من الليف أو من المعدن. ولقياس معدلات التدفق المنخفضة يمكن استعمال كرة عائمة، ولكن عند قياس المعدلات مرتفعة التدفق فإن ذلك يتطلب دقة عالية ولزوجة ثابتة وبالتالي نستعمل عوامة انسيابية. وتشمل المواد التي تصنع منها العوامة الزجاج الأسود أو الياقوت الأزرق المحمر أو المعدن غير القابل للصدأ والمواد الفلزية (التجستن). ويختبر مقياس التدفق المناسب بناء على منحنيات اختيار العوامة و جداول السعة التي تمولها الشركة المصنعة. قد يغطي جهاز واحد مدى قياس التدفق جميعه باستخدام عوامات ذات كثافات مختلفة يصل مداها إلى مائتي

ضعف. بخلاف مقياس الفتحة ، لا يكون المقياس الدوار حساسا لتوزيع السرعة في منطقة التدفق. ولا يتطلب تركيب الجهاز الدوار مقطع أنبوبة مستقيمة للتدفق سواء في اتجاه مجرى التدفق أو عكس مجرى التدفق.



# انتقال الحرارة والموائع - عملي

المضخات

المضخات

٨

## الوحدة الثامنة: المضخات

**الجدارة:** التعرف على بعض الطرق والأجهزة المستخدمة لقياس اللزوجة.

**الأهداف:** معرفة كيفية استخدام الأجهزة المستخدمة لقياس اللزوجة للمائع وإجراء العمليات الحسابية المصاحبة لها كما يلزمنا التفريق بين اللزوجة الديناميكية المطلقة واللزوجة الكايناماتيكية.

**مستوى الأداء المطلوب:** أن يصل المتدرب إلى إتقان الجدارة بنسبة ٩٥٪.

**الوقت المتوقع للتدريب على الجدارة:** ٤ ساعات.

**الوسائل المساعدة:** لا يحتاج المتدرب إلى أية وسائل مساعدة باستثناء الآلة الحاسبة وورق رسم بياني لوغاريتمي.

**متطلبات الجدارة:** أن يقوم المتدرب بتطبيق قوانين الإشعاع الحراري لأمثلة حقيقية في منشأة التصنيع الغذائي ويستشعر الدور الكبير الذي يلعبه الإشعاع الحراري في رفع مستوى الفقد الحراري من هذه الأجهزة والتي تلعب دوراً أساسياً في عمليات التصنيع الغذائي المختلفة.

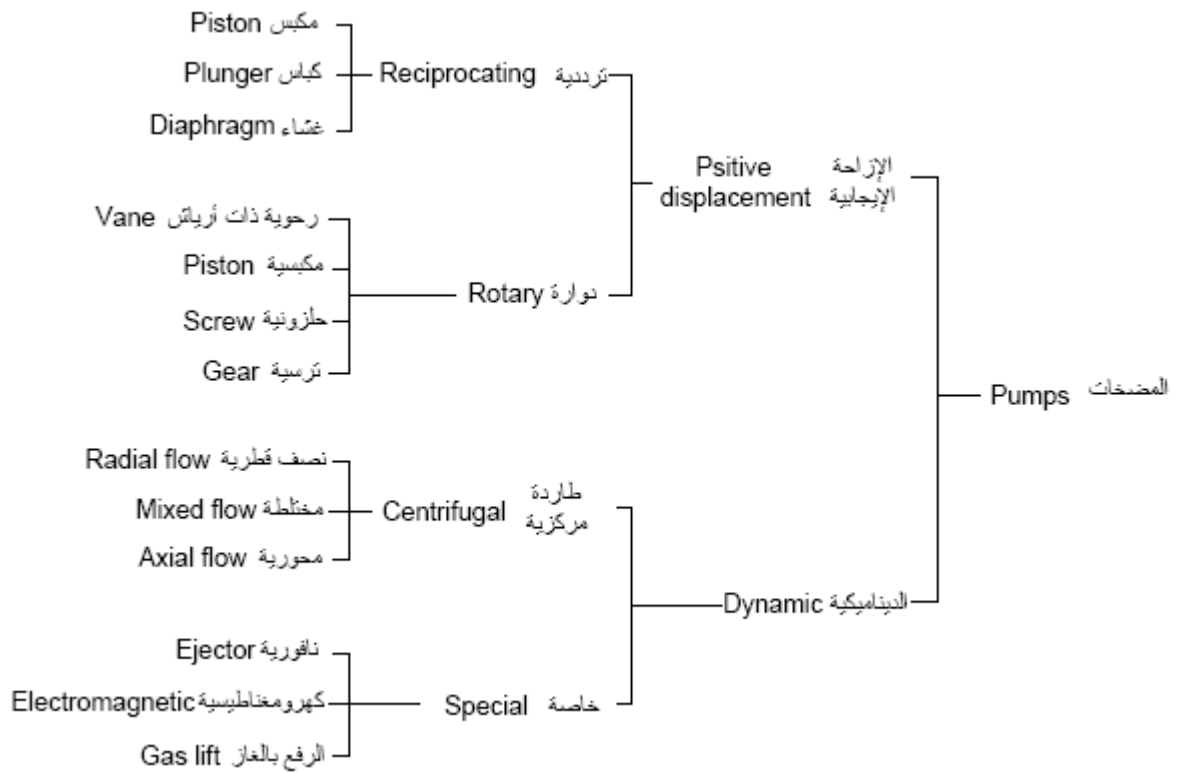
## الدرس الأول

أجزاء المضخة والأنواع المختلفة للمضخات:

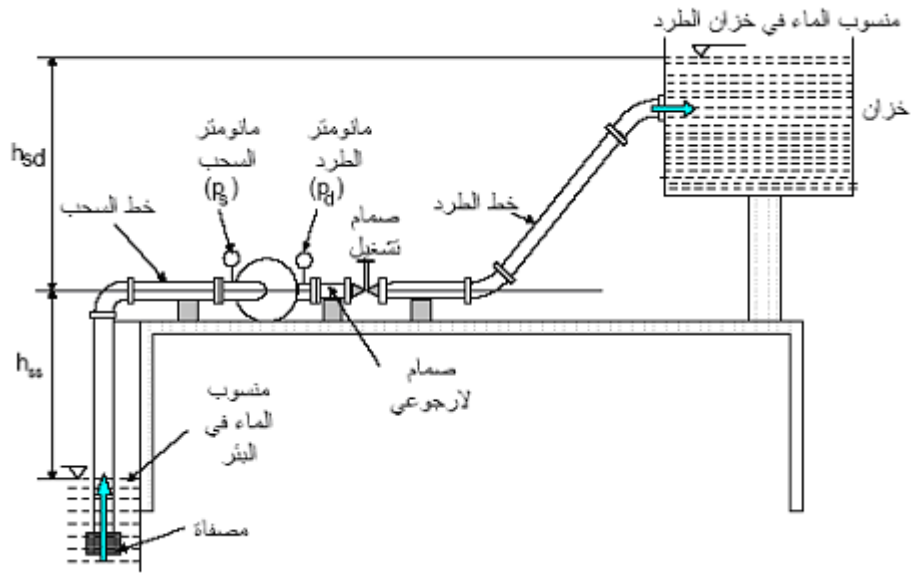
ويهدف هذا الشرح إلى:

١. التعرف على الأجزاء الرئيسية التي تتكون منها المضخة.

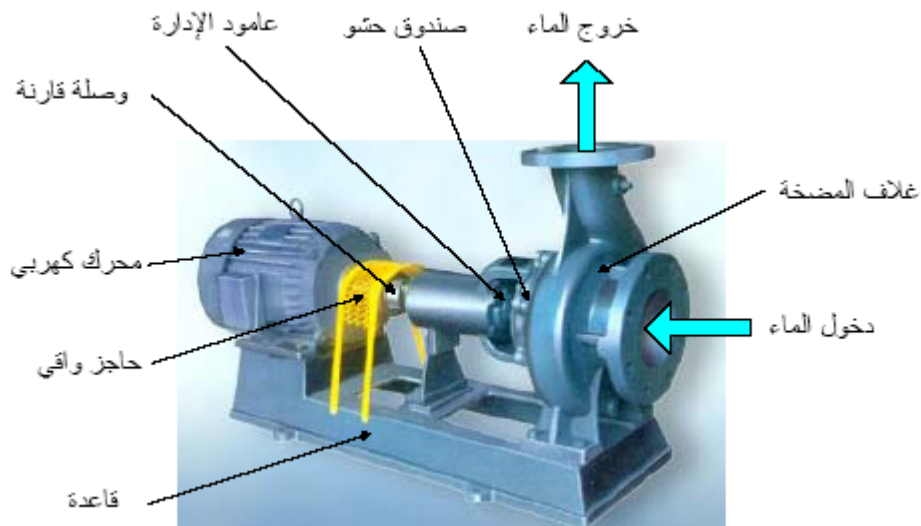
٢. التعرف على الأنواع المختلفة للمضخات.



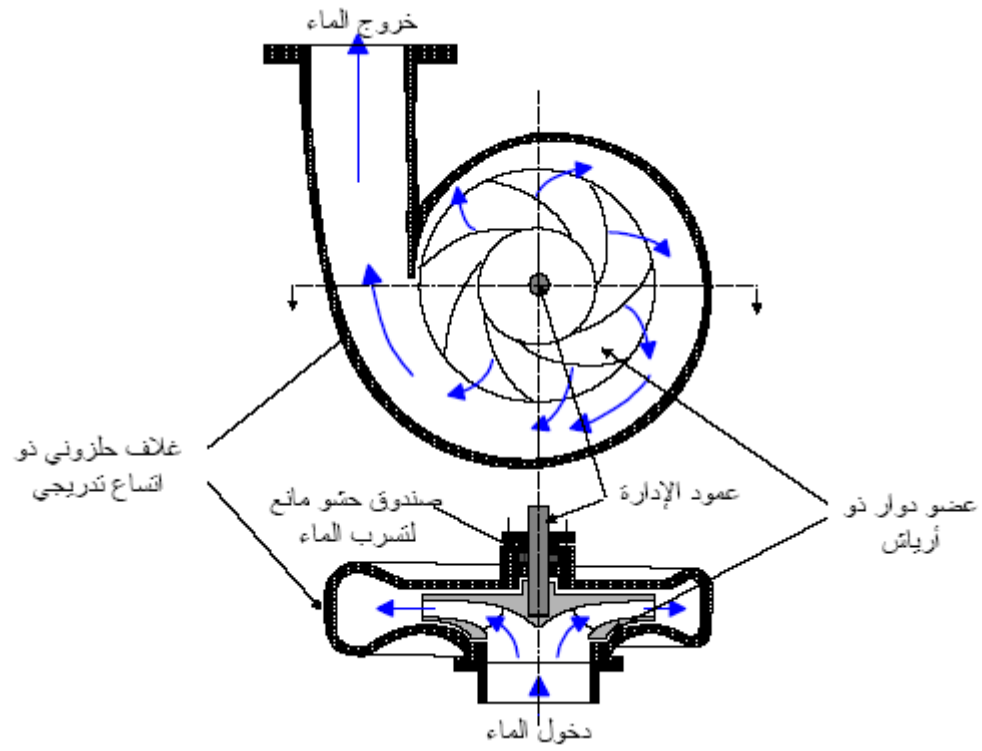
شكل (٨ - ١) تصنيف المضخات.



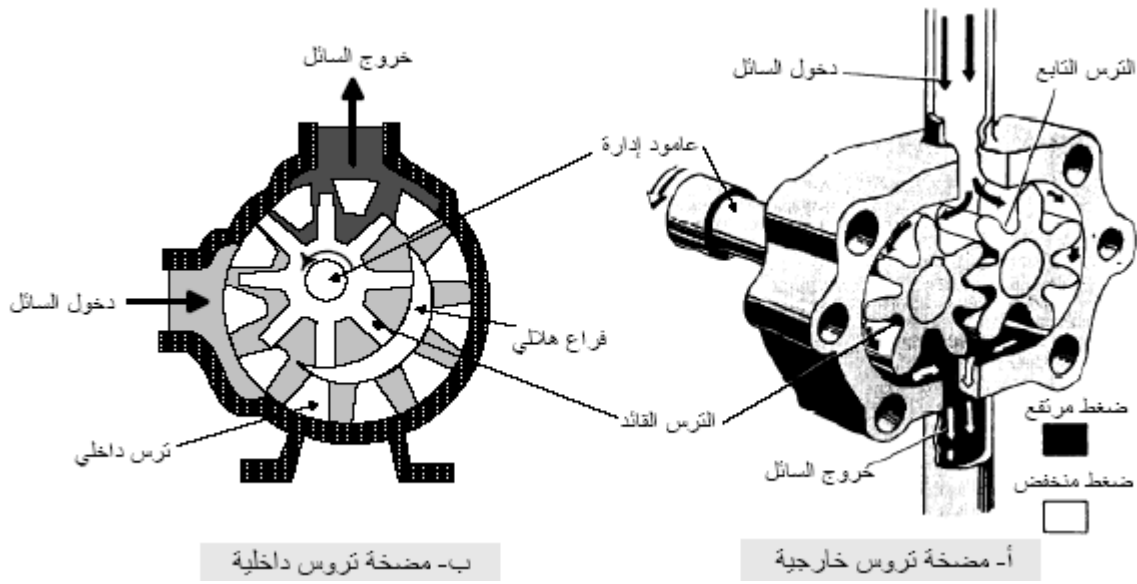
شكل (٨ - ٢) الأجزاء الرئيسية لمضخة الطرد المركزية.



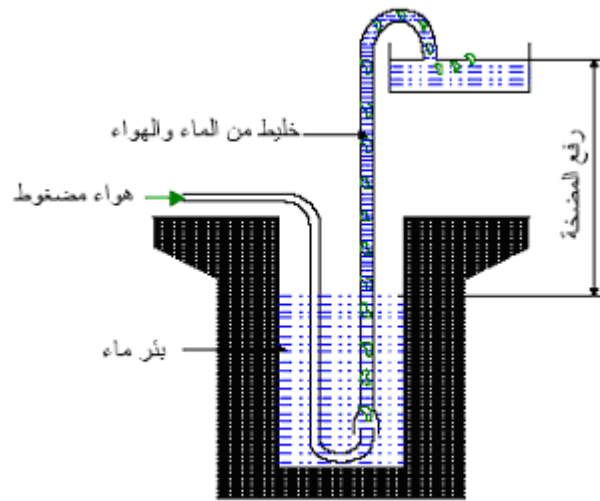
شكل (٨ - ٣) مضخة طرد مركزية مزودة بمحرك كهربائي.



شكل (٨ - ٤) مقطع من مضخة طرد مركزية.



الشكل (٨ - ٥) مضخة ترسية.

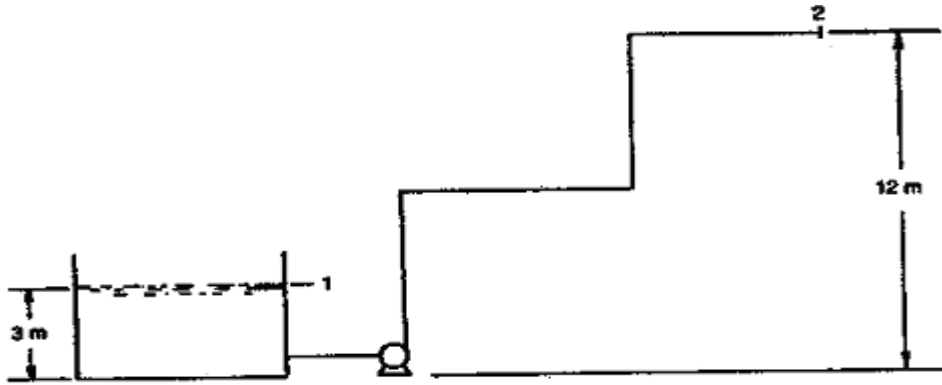


شكل (٨ - ٦) مضخة هواء.

## الدرس الثاني

## تمرين (١)

في مصنع أغذية، محلول برايكس السكروز كثافته النسبية  $S.g = 1.081$  ولزوجته المطلقة  $1.9cp$  عند  $20C^0$  ي ضخ من خزان كبير مفتوح بمعدل  $60Litters/min$  خلال أنبوب من الحديد المجلفن إلى مستوى أعلى (انظر الشكل). الأنبوبة طولها  $30m$  وقطرها  $26.65mm$  وتحتوي على ثلاثة أكواع. إذا كان منسوب الماء في الخزان  $3m$  فوق سطح الأرض و منسوب الماء المطرود  $12m$  فوق سطح الأرض والضغط عند المخرج يساوي  $35Kpa$  احسب قدرة المضخة على اعتبار أن كفاءة المضخة هي  $50\%$  ومعامل الاحتكاك بين المحلول والأنبوب  $0.0088$



الشكل (٨ - ٧) رسم توضيحي لتمرين رقم ١.

الحل:

$$\rho = s.g * \rho_w = 1.081 * 1000 = 1081 kg / m^3 \quad \text{كثافة المحلول تساوي:}$$

$$\mu = \frac{1.9cp}{1000} = 0.0019 pa.s \quad \text{لزوجة المحلول الديناميكية تساوي:}$$

$$A = \frac{\pi}{4} D^2 = \frac{\pi}{4} * 0.02665^2 = 0.000558m^2 \quad \text{مساحة الأنبوب:}$$

$$V = \frac{Q}{A} = \frac{\left(\frac{60}{1000 * 60}\right)}{0.000558} = 1.79 m/s \quad \text{السرعة تساوي:}$$

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

الفواقد الاحتكاكية نتيجة للأكواع تعدل بطول مكافئ وحسب ما هو في الجدول فإن الطول المكافئ لأكواع  $90^0$  هو 32 لكل كوع.

$$h_l = f \frac{(L + L_e)}{D} \left( \frac{v^2}{2g} \right) = 0.0088 * \frac{(30 + 3 * 32)}{0.02665} \left( \frac{1.79^2}{2 * 9.81} \right) = 6.794m$$

الفقد في الاحتكاك نتيجة انتقال المحلول من الخزان إلى الأنبوب (تضييق) وبمقارنة المساحتين بعد و قبل التضييق فإن النسبة صغيرة جداً ولذلك فإن قيمة  $K=0.5$  وبالتالي فإن الفقد الاحتكاكي يساوي:

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

$$h_L = 0.5 * \frac{1.79^2}{2 * 9.81} = 0.08m$$

$$\sum h_L = 6.794 + 0.08 = 6.874m$$

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

$$0 + \frac{0^2}{2 * 9.81} + 3 + h_p = \frac{35 * 1000}{1081 * 9.81} + \frac{1.79^2}{2 * 9.81} + 12 + 0 + 6.874$$

$$0 + 0 + 3 + h_p = 3.3 + 0.176 + 12 + 0 + 6.874 \Rightarrow h_p = 19.35m$$

$$h_p = 19.35m$$

وبالتالي فإن قدرة المضخة تساوي:

$$P = \rho g Q h_p$$

$$P_{theoretical} = 1081 * 9.81 * \frac{60}{1000 * 60} * 19.35 = 205.2w$$

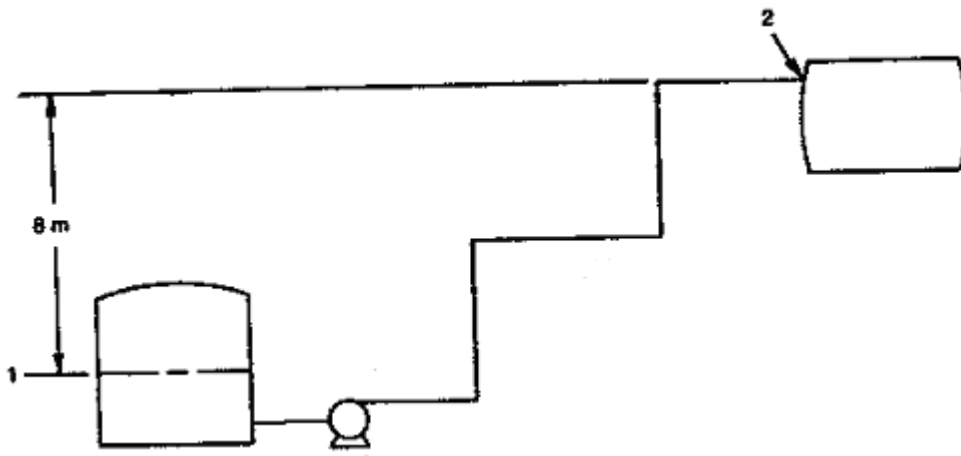
ولأن كفاءة المضخة تساوي 50% فإن القدرة الفعلية للمضخة تساوي:

$$P_{actual} = \frac{205.2}{0.5} = 410.4w$$



## تمرين (٢)

يراد ضخ 103Litters/min من الحليب خالي الدسم كثافته النسبية  $S.g = 1.2$  ولزوجته  $2.0cp$  ومركز من مبخر عند منسوب سطح الأرض إلى مجفف بالرداذا Spray dryer في دور علوي. إذا كان المبخر يعمل على ضغط مطلق  $4.74Kpa$  ويصرف الخط في خزان عند الضغط الجوي وبمنسوب  $8m$  فوق سطح الأرض. الخط مصنوع من أنابيب قطرها  $3.81cm$  وطولها  $40m$  وبها أربعة أكواع. احسب قدرة المضخة اللازمة



الشكل (٨ - ٨) رسم توضيحي للتمرين رقم ٢.

الحل:

$$\rho = s.g * \rho_w = 1.2 * 1000 = 1200kg / m^3 \quad \text{كثافة الحليب تساوي:}$$

$$\mu = \frac{2cp}{1000} = 0.002 pa.s \quad \text{لزوجة المحلول الديناميكية تساوي:}$$

$$A = \frac{\pi}{4} D^2 = \frac{\pi}{4} * 0.0381^2 = 0.00114m^2 \quad \text{مساحة الأنبوب:}$$

$$V = \frac{Q}{A} = \frac{\left(\frac{103}{1000 * 60}\right)}{0.00114} = 1.51m/s \quad \text{السرعة تساوي:}$$

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

الفواقد الاحتكاكية نتيجة للأكواع تعدل بطول مكافئ وحسب ما هو في الجدول فإن الطول المكافئ لأكواع  $90^\circ$  هو  $32$  لكل كوع.

$$h_l = f \frac{(L + L_e)}{D} \left( \frac{v^2}{2g} \right) = 0.0088 * \frac{(40 + 4 * 32)}{0.0381} \left( \frac{1.51^2}{2 * 9.81} \right) = 6.794m$$

الفقد في الاحتكاك نتيجة انتقال المحلول من الخزان إلى الأنبوب (تضييق) وبمقارنة المساحتين بعد و قبل التضييق فإن النسبة صغيرة جداً ولذلك فإن قيمة  $K=0.5$  وبالتالي فإن الفقد الاحتكاكي يساوي:

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

$$h_L = 0.5 * \frac{1.51^2}{2 * 9.81} = 0.08m$$

$$\sum h_L = 6.794 + 0.08 = 6.874m$$

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

$$\frac{0}{1200 * 9.81} + \frac{0^2}{2g} + 0 + h_p = \frac{4.74 * 1000}{1200 * 9.81} + \frac{1.51^2}{2 * 9.81} + 8 + 0 + 6.874$$

$$0 + 0 + 0 + h_p = 0.4 + 0.12 + 8 + 0 + 6.874$$

$$h_p = 15.394m$$

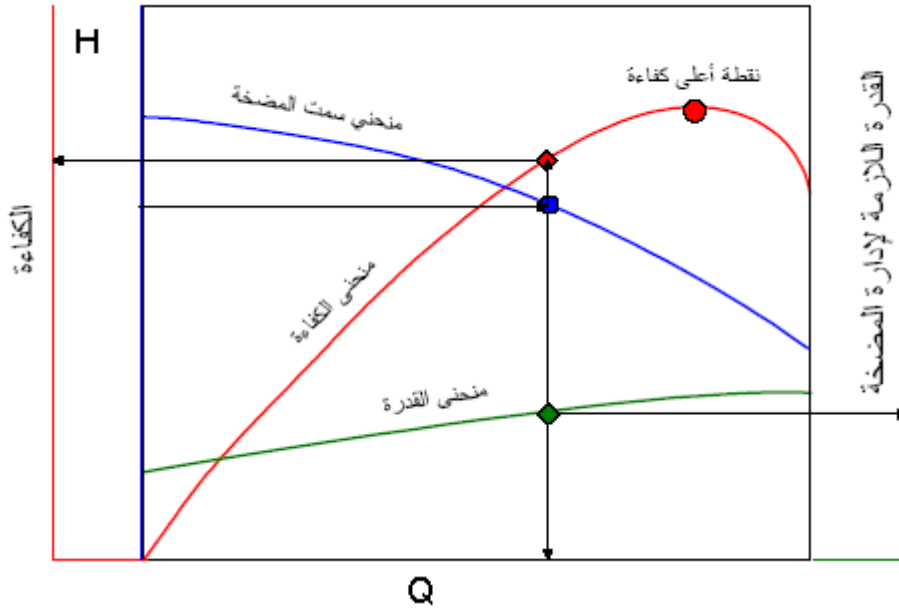
$$P = \rho g Q h_p$$

$$P_{theoretical} = 1200 * 9.81 * \frac{103}{1000 * 60} * 15.394 = 311.1w$$

$$P_{actual} = \frac{311.1}{0.55} = 565.6w$$

## الدرس الثالث

## منحنى الأداء للمضخة



شكل (٨ - ٩) منحنى الأداء لمضخة.

## توصيل المضخات على التوالي والتوازي Parallel and Series Connection:

حيث انه وفي حالة توصيل أكثر من مضخة على التوالي Parallel connection فإن الارتفاع الذي تضخ له المضخة سوف يتغير ويصبح عبارة عن حاصل جمع الارتفاع لكل مضخة على حدة:

$$H_T = H_1 + H_2 + H_3 + \dots$$

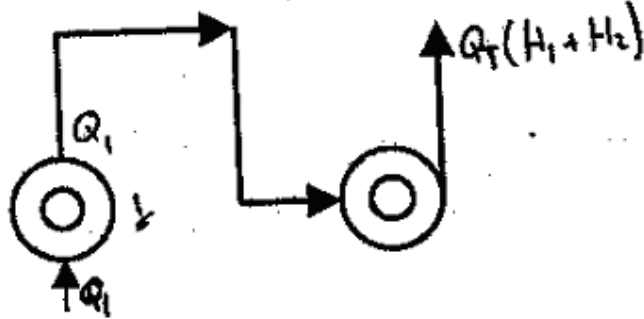
بينما تبقى كمية التصريف الحجمي (Q) ثابتة للجميع.

أما في حالة التوصيل على التوازي Series Connection فإن كمية التصريف الكلية تساوي:

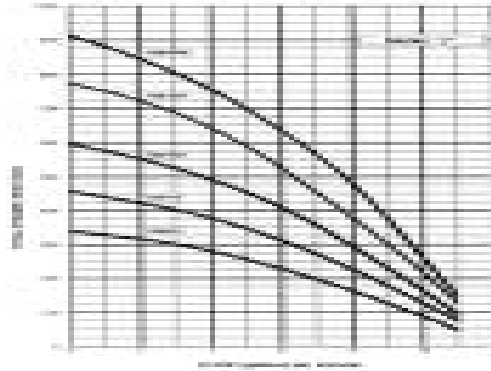
$$Q_T = Q_1 + Q_2 + Q_3 + \dots$$

سوف تكون عبارة عن حاصل جمع جميع القيم للمضخات منفردة بينما فإن قيمة الارتفاع  $H_T$  تبقى ثابتة.

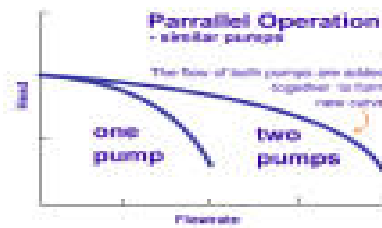
الشكل (٨ - ٩) منحنيات الأداء للمضخة.



الشكل (٨ - ١٠) مضختان موصولتان على التوالي.



الشكل (٨ - ١١) منحنى الأداء لمضختين موصولتين على التوالي.



الشكل (٨ - ١٢) منحنى الأداء لمضختين موصولتين على التوازي.

## المراجع

### المراجع العربية

١. أساسيات انتقال الحرارة، ترجمة د.برهان محمود العلي، أحمد نجم الصبحة، بهجت مجيد مصطفى.
٢. انتقال الحرارة القسم العملي الأول والثاني، د.أحمد كاسر إبراهيم، ١٩٨٣ - ١٩٨٤.
٣. ميكانيك السوائل، م.جلال عبدالقادر العلو، ١٩٨٧.
٤. هندسة تصنيع الأغذية، ترجمة د. بكري حسين حسن، علي إبراهيم حوياني، ١٩٩٥.
٥. المدخل إلى هندسة الأغذية، ترجمة د.سليمان عبدالعزيز اليحيى، ١٩٩٦.

### المراجع الاجنبية

1. Holman J.P.,1977 Heat Transfer , 8<sup>th</sup> 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	١
تمهيد	٨
الوحدة الأولى: انتقال الحرارة بالتوصيل	١٦
الوحدة الثانية: انتقال الحرارة بالحمل	١٩
الوحدة الثالثة: انتقال الحرارة بالإشعاع	٣١
الوحدة الرابعة: المبادلات الحرارية	٣٧
الوحدة الخامسة: المانوميترات	٤٣
الوحدة السادسة: قياس اللزوجة	٥٥
الوحدة السابعة: قياس معدل التدفق الحجمي	٦٦
الوحدة الثامنة: المضخات	
المراجع	

