

إنتاج كيميائي

أساسيات الحرارية والموائع

١٤١ هـ



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

تسعى المؤسسة العامة للتعليم الفني والتدريب المهني 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 للتعليم الفني والتدريب المهني 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.

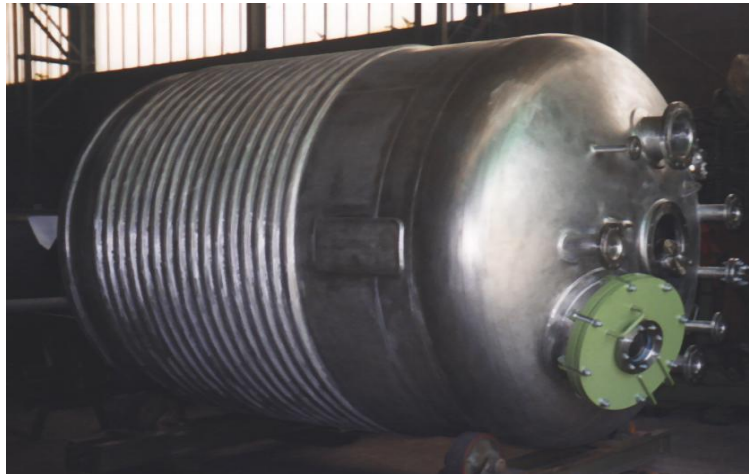
وتتناول هذه الحقيبة التدريبية " أساسيات الحرارية و الموائع " لتدريبي قسم " إنتاج كيميائي " للكليات التقنية مواضيع حيوية تتناول كيفية اكتساب المهارات اللازمة لهذا التخصص.

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

يعتبر علم الحرارة و الموائع ذو أهمية خاصة لفني التقنية الكيميائية . ذلك لأن أقسام هذا العلم الثلاثة - علم الطاقة (الديناميكا الحرارية) و علم قوى و حركة الموائع (ميكانيكا الموائع) و علم انتقال الحرارة - لا تخلو منها أي عملية كيميائية ، و على الفني الكيميائي إتقان هذه العلوم ليبنى قاعدةً علميةً متينة لا غنى له عنها لفهم التقنيات الكيميائية المختلفة . على سبيل المثال ، في المفاعل الكيميائي في الشكل ١ يتدفق المركب الكيميائي المائع - سائلاً كان أو غازاً - (علم ميكانيكا الموائع) في الأنابيب بسبب الشغل المبذول عليه في المضخة (علم الديناميكا الحرارية) . يستمر المائع في التدفق في الأنابيب إلى داخل الغلاية ليتمتص الحرارة المنتقلة من الغلاية عبر جدران الأنابيب (علم انتقال الحرارة) فيرتفع بذلك مستوى الطاقة الداخلية للمائع إلى المستوى المناسب للتفاعل . يستمر المائع في التدفق إلى المفاعل الحراري حيث يختلط مع الموائع المطلوبة لإجراء التفاعل حيث يتم خلال التفاعل امتصاص حرارة أو إطلاق حرارة (حسب نوع التفاعل) . ثم يتدفق ناتج التفاعل عبر الأنابيب إلى المبادل الحراري حيث يطرد طاقته الزائدة على شكل حرارة منتقلة إلى الخارج ليصل إلى درجة حرارة معقولة للنقل أو التخزين .



الشكل ١ : مفاعل كيميائي

إن هذا التكامل و التناسق بين علم الطاقة (الديناميكا الحرارية) و علم قوى و حركة الموائع (ميكانيكا الموائع) و علم انتقال الحرارة جعل من المناسب تقديمها جميعاً في مقرر واحد و تحت مسمى واحد و هو أسس علوم الحرارة و الموائع . في هذا المقرر يتعلم فني التقنية الكيميائية الجانب التطبيقي من هذه العلوم بالقدر الذي يحتاجه فقط مخصصاً لتطبيقات التقنية الكيميائية ما أمكن . ينقسم هذا

المقرر إلى ثلاث وحدات رئيسية بحسب العلوم الثلاث الأساسية . كما تنقسم كل وحدة إلى مواضيع رئيسية و فرعية ، متسلسلة بحسب خطة تدريس مادة أُسس علوم الحرارة و الموائع.

الأبعاد والوحدات :

تنقسم الأبعاد المستعملة في القياسات الفيزيائية إلى أبعاد أساسية (ذات وحدات مستقلة) و أبعاد ثانوية – مشتقة من الأبعاد الأساسية – (و وحداتها مشتقة من الوحدات المستقلة) . الأبعاد الرئيسية سبعة وهي : الزمن time ، و المسافة distance ، و الكتلة mass (وهي كمية المادة بالكيلوجرام kg و تختلف عن الوزن الذي هو قوة المادة عند تواجدها في مجال جاذبية و تقاس بوحدة القوة وهي النيوتن N) ، و درجة الحرارة temperature ، و شدة الضوء ، و شدة التيار الكهربائي ، و كمية المادة الذرية . سُمّيت وحدات أساسية لأنها تقاس بوحدات قياس مستقلة لا تقوم في تعريفها على وحدات أخرى و هي في النظام العالمي للوحدات SI الثانية s ، و المتر m ، و الكيلوجرام kg ، و الكالفن K (أو الدرجة المئوية °C) ، و الشمعة c ، و الأمبير A ، و المول mol ، على التوالي . في الجدول ١ قائمة بالوحدات الأساسية السبع و وحداتها .

البعء	رمزه	وحدته	رمز الوحدة
الطول	L	متر	m
الكتلة	m	كيلوجرام	kg
الزمن	t	ثانية	s
درجة الحرارة	T	كالفن	K
التيار الكهربائي	i	أمبير	A
شدة الضوء	-	كاندل	c
كمية المادة	-	مول	mol

جدول ١ : الأبعاد الأساسية السبعة و وحداتها المستقلة

الأبعاد الثانوية هي أبعاد مشتقة من الوحدات الأساسية و وحداتها مشتقة من وحدات الأبعاد الأساسية على سبيل المثال المساحة area عبارة عن طول في عرض (أي مسافة في مسافة) و وحداتها مشتقة

من حاصل ضرب وحدتي الطول و العرض فهي المتر المربع m^2 ، أما الحجم volume فهو بعد مشتق أيضاً و وحدته m^3 (لماذا ؟) . من الوحدات المشتقة التي تهمننا في هذا المقرر السرعة velocity و وحدتها $\frac{m}{s}$ ، التسارع acceleration و وحدته $\frac{m}{s^2}$ ، و القوة force و وحدتها النيوتن N (و هي اختصار لمضروب وحدة الكتلة و التسارع $\frac{m}{s^2}$ و منها الوزن الذي هو قوة الكتلة عند تواجدها في مجال جاذبية ، و الطاقة energy (حرارة كانت أو أياً من أنواع الشغل) و وحدتها الجول J (و هي اختصار لمضروب وحدة القوة و المسافة $N \cdot m$ أو $\frac{kg \cdot m^2}{s^2}$) ، و أخيراً القدرة (و هي مقدار الطاقة المتغيرة خلال الزمن) power و وحدتها الوات W (و هي اختصار وحدة الطاقة على وحدة الزمن $\frac{J}{s}$ أو $\frac{kg \cdot m^2}{s^3}$) . في الجدول ٢ قائمة بالوحدات المشتقة التي تهمننا في أسس علوم الحرارة و الموائع .

البعده	رمزه	وحدته	رمز الوحدة
المساحة	A	متر مربع	m^2
الحجم	V	متر مكعب	m^3
السرعة	v	متر في الثانية	m/s
التسارع	a	متر لكل ثانية مربعة	m/s^2
القوة	F	نيوتن	N
الطاقة	E	جول	J
القدرة	P	وات	W

جدول ٢ : بعض الأبعاد الثانوية و وحداتها المشتقة

من أهم القواعد المتبعة في حل المسائل الفيزيائية مراعاة تناسق الوحدات في المعادلة ، فلا يجوز مثلاً أن تكون أحد الأطوال الداخلة في المعادلة مقاسة بالمتر و طول آخر مقاس بمضاعفات أو أجزاء المتر (مثل السنتيمتر) . في مثل هذه الحالة يجب توحيد الأبعاد بتحويل أحد البعدين إلى وحدة الآخر و إلا كانت النتائج خاطئة و مضللة . كما يجب عند مراعاة تناسق الوحدات الانتباه للوحدات المختصرة (النيوتن N و الجول J و الوات W و غيرها) لما تضمنه ضمناً من الوحدات الأساسية التي يجب أن تكون الأبعاد الأخرى في المسألة متناسقة معها .

مثال ١ :

كم مقدار الشغل work (الطاقة المبذولة) التي بذلها عامل لدفع صندوق وزنه ربع طن لمسافة

$$10 \text{ m} \text{ حيث تزايدت سرعة الصندوق أثناء دفعة بمعدل } 50 \frac{\text{cm}}{\text{s}^2} \text{ ؟}$$

الحل :

الشغل = القوة \times المسافة

$$W = F \times L$$

$$\text{المسافة} = 10 \text{ m}$$

القوة = الكتلة \times التسارع

$$F = m \times a$$

$$\text{الكتلة} = \text{ربع طن} = 250 \text{ kg} = 1000 \text{ kg} \times 0,25$$

$$\text{التسارع} = 50 \frac{\text{cm}}{\text{s}^2} = \frac{\text{cm}}{\text{s}^2} 50 \div \frac{\text{cm}}{\text{s}^2} 100 = \frac{\text{cm}}{\text{s}^2} 0,5 = \frac{\text{m}}{\text{s}^2} 0,5 = \frac{\text{m}}{\text{cm}} \frac{1}{100} \times \frac{\text{cm}}{\text{s}^2} 50$$

و عليه فإن القوة

$$F = m \times a$$

$$= 250 \text{ kg} \times 0,5 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

$$= 125 \text{ N}$$

و عليه فإن الشغل المبذول

$$W = F \times L$$

$$= 125 \text{ N} \times 10 \text{ m}$$

$$= 1250 \text{ J}$$



أساسيات الحرارية والموائع

الموائع

الموائع

الموائع

الجدارة :

تحديد خواص الموائع حسابيا واختيار الأنواع المناسبة من المضخات للعمليات الكيميائية

الأهداف:

عند الانتهاء من هذه الوحدة تكون قادراً على

- حساب الضغط للمائع المتحرك
- تحديد لزوجة المائع بيانيا عند مختلف ظروف الضغط ودرجة الحرارة
- حساب سرعة المائع في المقاطع الدائرية
- حساب الاحتكاك أثناء سريان المائع
- حساب قدرة المضخة اللازمة لنقل المائع في نظام سرياني
- تلافي مشاكل تشغيل المضخات

الوقت المتوقع للتدريب:

١٥ ساعة اتصال

الوسائل المساعدة:

استخدام المخططات البيانية

متطلبات الجدارة:

- اجتياز مقرر أسس الهندسة الكيميائية

الفصل الأول

سكون المائع

يختص علم الموائع بدراسة سلوك الغازات والسوائل من حيث سكونها أو حركتها. وبصفة عامة فإن تشغيل الوحدات المختلفة بكفاءة في الصناعات الكيميائية مثل المفاعلات أو وحدات الفصل كأبراج التقطير أو الامتصاص أو أجهزة الاستخلاص تعتمد جزئياً على سرعة الأطوار المختلفة بالنسبة للجدران الصلبة لهذه الوحدات وأيضاً على السرعة النسبية بين هذه الأطوار ويجب أن يكون المتدرب كفني أو تقني في مجال الإنتاج الكيميائي ملماً بقواعد وأسس حسابات الهندسة الكيميائية وأساسيات الحسابات الهندسية عموماً حتى يستطيع فهم المعادلات المتعلقة بالموائع وبالتالي يكون قادراً على ضبط ظروف التشغيل من ضغط ومعدلات سريان .

طبيعة المائع

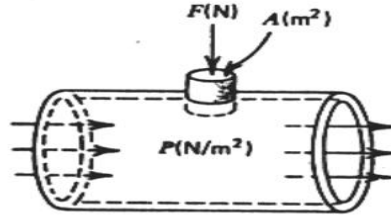
يعرف المائع على أنه المادة التي تتشوه باستمرار تحت تأثير إجهاد القص وهو ما يجعل المائع متميزاً عن المواد الصلبة التي قد تتشوه إلى درجة المرونة أو بدرجة دائمة إلى أن تنكسر (تذكر ما سبق دراسته في مقرر الفيزياء عن تجربة إيجاد معامل يونج والعلاقة البيانية بين الإجهاد والانفعال) .

مفهوم الضغط

يمكن أيضاً أن يتأثر المائع بالإجهادات العمودية فإذا تواجدت كتلة من مائع ما في حالة سكون فإن قوى الانضغاط تؤثر على هذه الكتلة وتسمى شدة قوة الانضغاط بالضغط الاستاتيكي يعرف الضغط الاستاتيكي بأنه مقدار قوة الأنضغاط المؤثرة على وحدة المساحات من سطح ما يمر بهذه النقطة وحسب مبدأ باسكال فإن الضغط عند نقطة ما في المائع يكون مقداره ثابتاً مهما كان اتجاه هذا الضغط.

ويمكن توضيح مفهوم الضغط بشكل أكثر قرباً للتصور باعتبار أسطوانة ممتلئة بمائع ما ، غاز أو سائل ، كما هو موضح بالشكل رقم (١) ، فإذا ثقت جدران الأسطوانة ينطلق المائع خارجاً تحت تأثير

ضغطه ويعرف ضغط المائع حينئذ على أنه F/A حيث F مساحة مقطع الثقب و F أقل قوة يلزم تطبيقها في الاتجاه المعاكس لمنع خروج المائع من الأسطوانة



شكل ١ : مفهوم الضغط

مبدأ التوازن الهيدروستاتيكي

يختلف الضغط من نقطة إلى أخرى داخل المائع حسب ارتفاع النقطة وذلك طبقا للمعادلة:

$$P_2 - P_1 = \rho g (z_1 - z_2)$$

حيث P_2 ضغط المائع عند نقطة ٢ (N/m^2)

P_1 ضغط المائع عند نقطة ١ (N/m^2)

ρ كثافة المائع (kg/m^3)

g تسارع الجاذبية الأرضية $9.8 m/s^2$

z_1 ارتفاع أو عمق النقطة ١ بالنسبة لمستوى مرجعي اختياري (m)

z_2 ارتفاع النقطة ٢ عن نفس المستوى المرجعي الاختياري (m)

وغالبا ما يؤخذ المستوى الاختياري على أنه قاع الخزانات أو الأبراج أو المفاعلات وتوضح المعادلة السابقة أن ضغط المائع يعتمد فقط على ارتفاعه وليس على شكل الإناء الذي يحتوي عليه ويلاحظ أن المعادلة تنطبق بشكل صحيح على السوائل نظرا لعدم تغير كثافة السائل مع تغير الضغط ولكن في

المقابل لا تصلح هذه المعادلة للضغط المجهول في حالة الغازات إذا كان تغير كثافة الغاز كبيراً مع الضغط. ومن أهم نتائج مبدأ التوازن الهيدروستاتيكي أن السطح الحر (غير المتأثر بالجدران الصلبة) يكون دائماً أفقياً.

وحدات الضغط

كما يتضح من تحليل وحدات الطرف الأيمن لمعادلة مبدأ التوازن الهيدروستاتيكي أن وحدة الضغط هي N/m^2 وتسمى أيضاً باسكال Pa وهي تتفق مع تعريف الضغط على أنه القوة المؤثرة على وحدة المساحات. والطريقة الأخرى هي التعبير عن الضغط بوحدة ارتفاع عمود من مائع ما، فمثلاً يمكن القول أن الضغط عند نقطة معينة هو $2m H_2O$ (تقرأ ثلاثة أمتار ماء) أو أن الضغط الجوي هو $76cm Hg$ (سبعة وستون سنتيمتر زئبق) وهكذا، ويمكن تحويل وحدة الضغط بالباسكال إلى ما يناظرها بوحدة ارتفاع أو العكس باعتبار أن الضغط الناتج من عمود مائع ما ذو ارتفاع معين ينتج من تأثير وزن العمود على القاعدة.

$$P = \frac{m \times g}{A}$$

m كتلة العمود

A مساحة قاعدة العمود أو مساحة مقطعه

$m = V \times \rho$ حجم العمود و ρ كثافة المائع

أيضاً $V = A \times h$ ، h ارتفاع العمود

وبالتعويض في المعادلة السابقة ينتج أن

$$P = \frac{h \times \rho \times g}{g_c}$$

الضغط الجوي والضغط المقاس والضغط المطلق

يقاس ضغط المائع دائما بالنسبة للضغط الجوي والقيمة المعتادة له هي 101.3 kPa والعلاقة بين الضغط المطلق والمقاس للمائع هي

$$P_{\text{absolute}} = P_{\text{gauge}} + P_{\text{atm}}$$

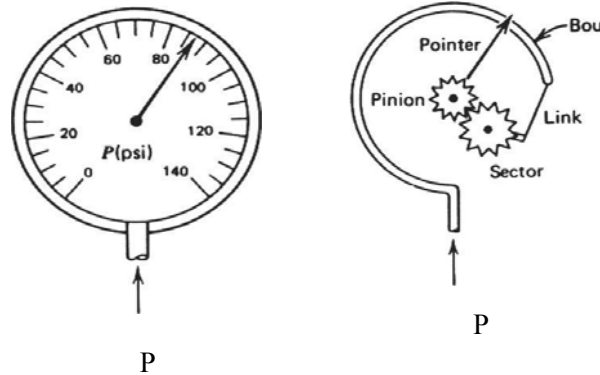
P_{absolute} هو الضغط المطلق ، P_{gauge} الضغط المقاس ، P_{atm} الضغط الجوي

أجهزة قياس الضغط

إن قياس الضغط والتحكم فيه يعد أمرا ضروريا في الصناعات الكيميائية، كذلك تعتمد العديد من أجهزة قياس معدل سريان المائع على قياس الضغط الفرقي وفيما يلي نعرض لبعض أجهزة قياس الضغط.

عداد بوردون

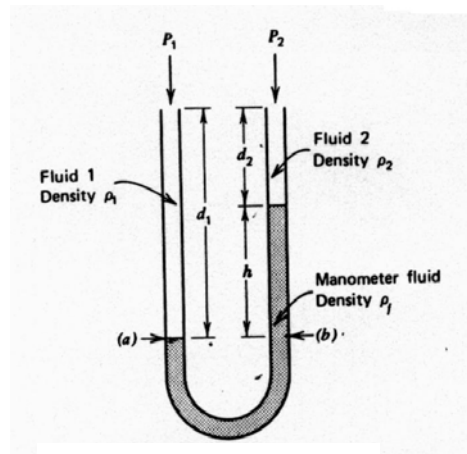
وهو نوع شائع الاستخدام من أجهزة قياس الضغط ويتكون من أنبوبة مطاطية مفرغة على هيئة حرف C ومغلقة من أحد نهايتها بينما تتعرض النهاية الأخرى لمصدر الضغط فتستقيم الأنبوبة مسببة دوران مؤشر متصل بها على تدريج معاير لإعطاء قراءة الضغط مباشرة ويوضح شكل رقم (٢) رسما تخطيطيا لعداد بوردون. ويمكن لهذا العداد قياس الضغط في مدى يتراوح من الخلخلة (الضغط السالب) إلى حوالي 7000 atm وقياس الضغط بدقة كبيرة إذا كان مدى التغير صغيرا تستخدم المانومتترات.



شكل ٢ : عداد بوردون

المانومتريات

المانومتر هو أنبوبة زجاجية على صورة حرف U وتملأ الأنبوبة جزئياً بمائع ذو كثافة معروفة يسمى مائع المانومتر وعند تعرض طرفي المانومتر لضغطين مختلفين في مائع (مثلاً للماء المتحرك في أنبوبة أفقية يكون هناك فرق في الضغط بين أي نقطتين في اتجاه السريان) يهبط مستوى المائع في المرفق المتأثر بالضغط الأعلى بينما ينخفض المستوى في المرفق المتأثر بالضغط الأقل فيصبح هناك فرق في الارتفاع بين مستويي مائع المانومتر كما يتضح من شكل (٣)



شكل ٣ : المانومتر الفرقي

وما يهم الآن هو استنتاج معادلة لحساب الفرق بين الضغطين المؤثرين على طرفي المانومتر كآتي :
عند النقطتين a, b يكون الضغط متساوياً (حسب مبدأ التوازن الهيدروستاتيكي)

$$P_1 + \frac{\rho_f g d_1}{g_c} = P_2 + \frac{\rho_f g d_2}{g_c} + \frac{\rho_m g h}{g_c} \quad \text{--- (1)}$$

، $d_1 = d_2 + h$ ، ρ_f و ρ_m كثافة مائع المانومتر وكثافة المائع الأصلي (المراد قياس فرق الضغط له)،
بالتعويض في المعادلة (١) مع بعض الترتيب الجبري

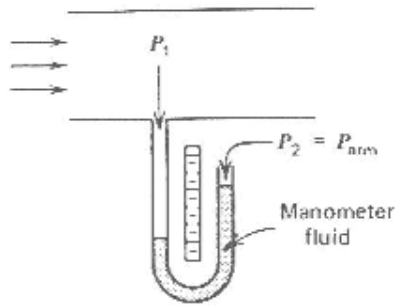
$$P_1 - P_2 = \frac{(\rho_m - \rho_f) g h}{g_c} \quad \text{--- (2)}$$

المعادلة (٢) تسمى معادلة المانومتر الفرقي أو التفاضلي (الذي يقيس فرق الضغط بين النقطتين (١) و (٢)) ، وإذا كان المائع الأصلي غازا فحينئذ تصبح $\rho_m \ll \rho_f$ ويمكن تبسيط المعادلة (٢) إلى

$$P_1 - P_2 = \frac{\rho_m g h}{g_c} \quad \text{--- (3)}$$

المانومتر ذو النهاية المفتوحة

من الممكن أن تكون إحدى نهايتي المانومتر معرضة لمصدر الضغط أما النهاية الأخرى فمفتوحة للهواء الجوي (شكل ٤)



شكل ٤ : المانومتر ذو النهاية المفتوحة

ويسمى في هذه الحالة المانومتر ذو النهاية المفتوحة. وبالتعويض عن $P_2 = P_{atm}$ في المعادلة (٢) ينتج أن

$$P_1 - P_{atm} = \frac{(\rho_m - \rho_f) g h}{g_c} \quad \text{--- (4)}$$

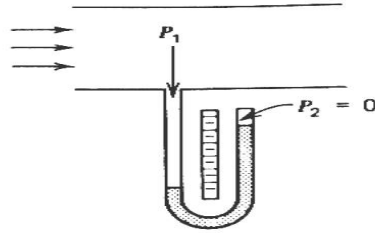
$$P_1 - P_{atm} = \frac{\rho_m g h}{g_c} \quad \text{--- (5)} \quad \rho_m \ll \rho_f$$

ويتضح من ملاحظة الطرف الأيسر في المعادلتين السابقتين أن المانومتر ذو النهاية المفتوحة يعطي مباشرة الضغط المقاس للمائع عند نقطة ما

المانومتر ذو النهاية المغلقة

في هذا النوع من المانومترات يكون أحد الأطراف مفرغاً ومغلقاً والطرف الآخر معرضاً لتأثير

مصدر الضغط (شكل ٥)



شكل ٥ : المانومتر ذو النهاية المغلقة

فإذا كان مصدر الضغط هو الهواء الجوي فإن المانومتر يعمل كبارومتر (جهاز قياس الضغط

الجوي). وبالتعويض عن $P_2 = 0$ في المعادلة (٣) ينتج أن

$$P_1 = \frac{(\rho_m - \rho_f) g h}{g_c} \quad \text{--- (6)}$$

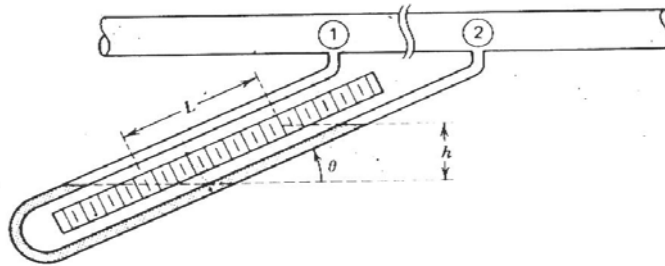
$$P_1 = \frac{\rho_m g h}{g_c} \quad \text{--- (7)} \quad \rho_m \ll \rho_f$$

المانومتر المائل

كثيراً ما تقع قياسات الضغط في مدى ضيق ولا بد عندئذ من زيادة دقة قراءة المانومتر ويمكن

تحقيق هذا الغرض بطريقتين ، إما باستخدام مائعين أو ثلاثة داخل المانومتر أو بجعل المانومتر مائلاً

(شكل ٦)



شكل ٦ : المانومتر المائل

فيزداد فرق الارتفاع h ، حيث ترتبط h بالمسافة L المقاسة في اتجاه الميل بالعلاقة $\frac{h}{L} = \sin\theta$ وكلما صغرت زاوية الميل θ أصغر كلما كانت L المقروءة من تدريج المانومتر أكبر وبالتالي تكون دقة المانومتر المائل أكبر، وتطبق جميع المعادلات السابقة حسب حالة المانومتر بالتعويض عن $h = L \sin\theta$

تمارين متنوعة (١)

إرشادات عامة لحل التمارين:

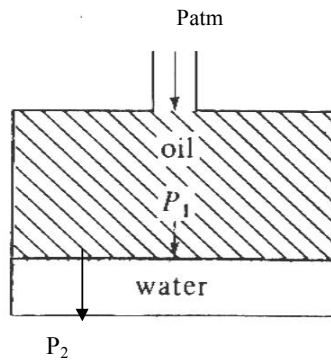
- قم دائماً برسم التمرين المعطى في صورة تخطيطية بسيطة موضحة البيانات المعطاة على الرسم حيث إن ذلك يساعدك على تصور طريقة الحل الصحيحة
- اكتب المطلوب في صورة رموز حسب ما فهمت ورسمت
- ابدأ الحل باختيار المعادلة المناسبة (أو المعادلات) لإيجاد المجاهيل وضع خطوات للحل
- قم بتنفيذ الخطوات للحصول على الحل العددي
- تأكد من الحل العددي الذي حصلت عليه بإجراء الحسابات بالتقريب

تمرين (١)

خزان واسع مفتوح للهواء الجوي وارتفاعه $3,66\text{m}$ يحتوي على زيت كثافته 917 kg/m^3 فإذا كان عمق طبقة الزيت $3,05\text{m}$ ، كذلك يحتوي الخزان على طبقة من الماء بعمق $0,61\text{m}$ ، باعتبار أن الضغط الجوي $101,3\text{ kPa}$ احسب :

(١) الضغط عند $3,05\text{m}$ من سطح الخزان

(٢) الضغط الواقع على قاع الخزان



المعطيات: كما في الرسم

الحل:

١. بتطبيق معادلة مبدأ التوازن الهيدروستاتيكي بين سطح الخزان والسطح الفاصل بين الزيت

والماء وباعتبار أن السطح الفاصل هو المستوى المرجعي ($z_1 = 0$)

$$P_{atm} - P_1 = \frac{\rho g}{g_c} (z_1 - z_{atm})$$

بالتعويض عن

$$z_{atm} = 3.05 \text{ m} \quad P_{atm} = 1.013 \times 10^5 \text{ Pa}, \quad \rho = 917 \text{ kg/m}^3, \quad g = 9.8 \text{ m/s}^2, \quad g_c = 1 \text{ kgm/Ns}^2$$

$$P_1 = 1.013 \times 10^5 + 917 \times 9.8 \times 3.05 = 1.29 \times 10^5 \text{ Pa}$$

٢. بتطبيق نفس المعادلة كما في (١) ولكن بين السطح الفاصل وقاع الخزان واعتبار قاع الخزان

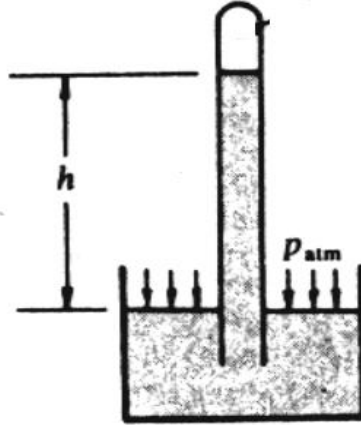
هو المستوى المرجعي هذه المرة

$$P_1 = 1.29 \times 10^5 \text{ Pa}, \quad \rho_{\text{الماء}} = 1000 \text{ kg/m}^3, \quad z_1 = 0.61 \text{ m}, \quad z_2 = 0$$

$$P_2 = 1.29 \times 10^5 + 0.61 \times 1000 \times 9.8 = 1.347 \times 10^5 \text{ Pa}$$

تمرين (٢)

احسب ضغط البارومتر بوحدة الباسكال ، إذا كان ارتفاع الزئبق به ٢٨,٧٦ in



المعطيات:

ضغط البارومتر بما يكافئ عمود من الزئبق ارتفاعه ٢٨,٧٦ in

الحل:

$$P = \frac{\rho g h}{g_c} \quad \text{بتطبيق المعادلة}$$

$$\rho_{Hg} = 13600 \text{ kg/m}^3, h = 28,76 \text{ (in)} \times (2,54/100) \text{ m}$$

$$P = 13600 \times 9,8 \times (28,76 \times 2,54/100) = 97125 \text{ Pa}$$

تمرين (٣)

بإهمال الاحتكاك ، ما هو الضغط اللازم لضخ الماء إلى أعلى مبنى يرتفع ١٢٥٠ ft بوحدة الباسكال؟

المعطيات: ارتفاع المبنى وإهمال الاحتكاك

الحل:

إهمال تأثير الاحتكاك يؤدي إلى أن يكون ارتفاع المبنى هو نفسه ارتفاع عمود الماء وتطبيق نفس

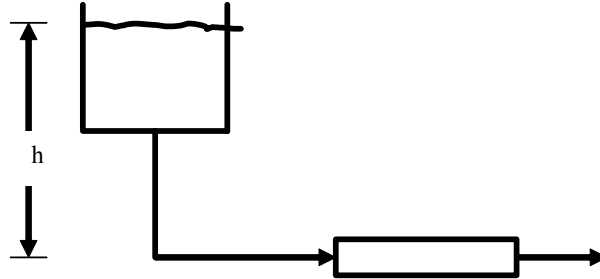
المعادلة كما في المسألة السابقة

$$\text{الكثافة} = 1000 \text{ kg/m}^3, h = 1250 \text{ (ft)} \times 0,3 \text{ m}$$

$$P = 1000 \times 9.8 \times 1250 \times 0.3 = 367500 \text{ Pa}$$

تمرين (٤)

باعتبار النظام الموضح بالشكل أدناه لتغذية الماء إلى مدخل مبادل حراري يعمل بالجاذبية، فإذا كان ضغط الماء عند مدخل المبادل هو ٣٠ psig، ما هو أقل ارتفاع يلزم لسطح الماء في الخزان محسوباً بالنسبة لمستوى المبادل؟



المعطيات:

نظام تغذية الماء الموضح في الرسم، ضغط الماء عند مدخل المبادل ٣٠ psig

الحل :

الضغط المطلق عند مدخل المبادل

$$P_v = 30 \text{ (psig)} \times (101.3 \times 10^3 / 14.7) \text{ Pa} + P_{\text{atm}}$$

بتطبيق معادلة التوازن بين مستوى سطح الماء بالخزان ومستوى مدخل المبادل

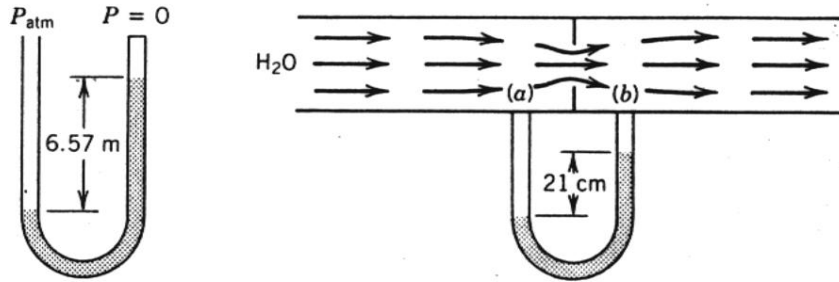
$$P_2 - P_{\text{atm}} = \frac{\rho g}{g_c} (z_{\text{atm}} - z_2)$$

$$\rho = 1000 \text{ kg/m}^3, h = z_{\text{atm}} - z_v$$

$$h = 30 \text{ (psig)} \times (101.3 \times 10^3 / 14.7) / (1000 \times 9.8) = 20.7 \text{ m}$$

تمرين (٥)

مائع ذو كثافة مجهولة يستخدم في مانومتريين أحدهما ذو نهاية مغلقة والآخر فرقي متصل بخط أنبوبي يمر به الماء، فإذا كان فرق الارتفاع بالمانومتريين كما هو موضح بالشكل أدناه وكان الضغط الجوي ٧٦٣ mmHg، احسب فرق الضغط بوحدة mmHg في المانومتر الفرقي



المعطيات:

قراءة المانومتر الفرقي، قراءة المانومتر ذي النهاية المغلقة حسب الشكل الموضح

الحل:

يجب أولاً الحصول على كثافة مائع المانومتر بتطبيق معادلة المانومتر ذي النهاية المغلقة مع ملاحظة أن

$$P_1 = P_{atm}$$

$$P_{atm} = \frac{\rho_m g h}{g_c}$$

$$P_{atm} = 763 \text{ (mm Hg)} \times 101,3 \times 10^3 / 760 \text{ Pa}, h = 6,57 \text{ m}$$

$$\rho_m = (763 \times 101,3 \times 10^3) / (760 \times 9,8 \times 6,57) = 1579,5 \text{ kg/m}^3$$

بالتعويض في معادلة المانومتر الفرقي

$$P_a - P_b = \frac{(\rho_m - \rho_f) g h}{g_c}$$

$$\rho_m = 1579,5 \text{ kg/m}^3, \rho_f = 1000 \text{ kg/m}^3, h = 0,21 \text{ m}$$

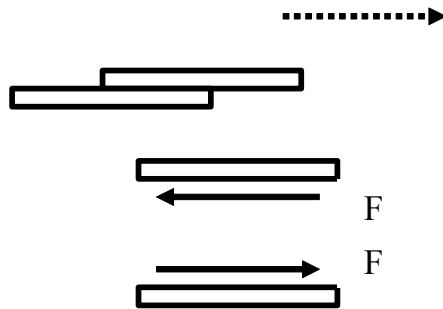
$$P_a - P_b = (1579,5 - 1000) \times 9,8 \times 0,21 = 1192,6 \text{ Pa}$$

الفصل الثاني

اللزوجة

إجهاد القص

لتوضيح مفهوم إجهاد القص في المائع يمكننا اعتبار التداخل الحادث بين طبقتين متجاورتين في مائع متحرك بين مستويين متوازيين بحيث يكون المستوى الأسفل مثبت والمستوى الأعلى متحرك تحت تأثير بحيث يكون لكل واحدة من الطبقتين سرعة مختلفة عن الأخرى وبطبيعة الحال فإنه نتيجة للحركة العشوائية للجزيئات في الطبقة ذات السرعة الأكبر تنتقل بعض هذه الجزيئات إلى الطبقة ذات السرعة الأقل فتتصادم مع جزيئاتها مسببة تسارع هذه الطبقة، وبالمثل يحدث أن تنتقل بعض جزيئات الطبقة ذات السرعة الأقل إلى الطبقة الأسرع فتسبب تباطؤها ونستطيع القول هنا أن كلاً من الطبقتين تتأثر بقوة مماسية ثابتة مقدارها F



على الطبقة السفلية ذات السرعة الأصغر في اتجاه الحركة بينما يعمل رد فعل هذه القوة على الطبقة العليا ولكن في الاتجاه المعاكس للحركة، وبناء على هذا التصور يكون المائع متأثراً بإجهاد قص

مقداره $\tau = \frac{F}{A}$ حيث A مساحة الاتصال بين سطحي الطبقتين

قانون نيوتن للزوجة

درس نيوتن حركة مائع في خطوط متوازية ومستقيمة بحيث تنزلق طبقات المائع على بعضها دون حدوث خلط بينها ووجد أن إجهاد القص يتناسب طردياً مع معدل التشوه (ويطلق عليه أيضاً معدل القص أو انحدار السرعة)، أي أن العلاقة خطية بين إجهاد القص ومعدل التشوه فيما يعرف بقانون نيوتن للزوجة حيث V سرعة المائع عند نقطة ما و y المسافة المقاسة عمودياً على اتجاه الحركة عند نفس النقطة، أما μ فهو ثابت التناسب ويسمى اللزوجة الديناميكية للمائع النيوتوني وهي الخاصية المسؤولة عن مقاومة المائع

للحركة. واللزوجة النيوتونية كما يتضح من تعريفها مقدار ثابت لا يعتمد على إجهاد القص أو معدل التشوه، وتتبع كثير من الموائع في سلوكها أثناء الحركة قانون نيوتن البسيط للزوجة وتسمى بالموائع النيوتونية ولكن غالبا ما تكون الموائع الصناعية من المركبات العضوية أو الحيوية أو البوليمرات أو المعلقات أو المستحلبات وهي جميعا لا تتبع قانون نيوتن للزوجة وتسمى موائع غير نيوتونية .

وحدات اللزوجة الديناميكية

تبعاً لقانون نيوتن للزوجة نجد أن وحدات اللزوجة الديناميكية في النظام العالمي الموحد هي Pa.s أو kg/(m.s) وهناك أيضا وحدة poise في النظام الفرنسي وهي dyn.s/cm^2 أو gm/cm.s

تأثير درجة الحرارة والضغط على اللزوجة الديناميكية

تتغير لزوجة السوائل والغازات باختلاف درجة الحرارة. ومن المهم بيان الفرق بين تغير اللزوجة في الحالتين. فتتخفض لزوجة السوائل بارتفاع درجة الحرارة بينما في حالة الغازات تزداد لزوجة الغاز بزيادة درجة الحرارة ويعزى هذا السلوك المعاكس لزيادة التصادمات بين جزيئات الغاز نتيجة لزيادة نشاطها و ما يتبع ذلك من زيادة الاحتكاك بينها وبالتالي زيادة اللزوجة، وبالنسبة للسائل فإن ارتفاع درجة الحرارة يؤدي إلى زيادة المسافات البينية بين الجزيئات وبالتالي انخفاض التداخل بينها وانخفاض اللزوجة.

أما الضغط فهو لا يؤثر في لزوجة السوائل، وتبقى لزوجة الغازات ثابتة مع ارتفاع الضغط حتى حوالي 1000 kPa ومع زيادة الضغط عن هذا الحد تبدأ لزوجة الغازات في الازدياد مع ارتفاع الضغط وبصفة عامة يمكن القول أن لزوجة الغازات أقل كثيرا من لزوجة السوائل وأيضا أن قيم اللزوجة متقاربة للغازات المختلفة عند نفس درجة الحرارة ويمكن تحديد قيمة لزوجة سائل أو غاز بيانيا بالطريقة المشروحة في ملحق (١)

الفصل الثالث

حركة الموائع

إن نوع السريان الذي يحدث في أنبوبة أو قناة مغلقة له أهمية كبرى في كثير من التطبيقات المتعلقة بحركة المائع، ونستطيع القول أن هناك نوعين للسريان يمكن رؤيتهما في القنوات المفتوحة مثل الأنهار أو البحار: نوع هادئ تميزه سرعة سريان صغيرة حيث تتزلق فيه طبقات المائع بالنسبة لبعضها بدون ظهور الدوامات ويسمى بالسريان الطبقي وينطبق على هذا النوع من السريان قانون نيوتن للزوجية كما سبق أن أوضحنا. والنوع الثاني يظهر حينما تكون سرعة السريان كبيرة وهو غير ثابت النمط حيث تتواجد الدوامات أو الاضطرابات في كل الاتجاهات الممكنة بالنسبة للاتجاه الأساسي لحركة المائع ويسمى هذا النوع من السريان بالدوامي أو المضطرب.

تجربة رينولدز

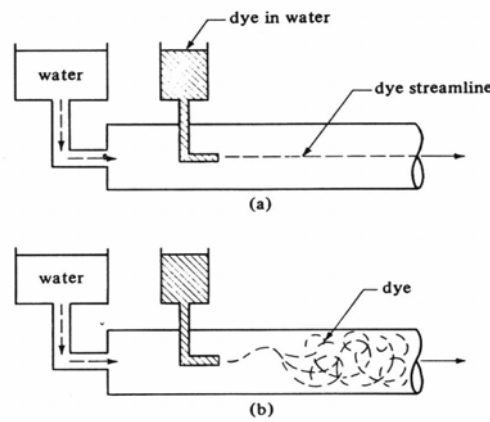
كان رينولدز أول من تحقق من تقسيم السريان إلى نوعيه الطبقي والدوامي بالملاحظة من خلال تجربة بسيطة، فقد حقن رينولدز كمية صغيرة جدا من الصبغة في ما يتفق بشكل مستمر خلال أنبوبة شفافة وأمكنه التحكم في معدل سريان الماء بواسطة صمام عند مخرج الأنبوبة وقد لاحظ رينولدز أن الصبغة تتخذ مسارا واحدا مستقيما كالخيوط الرفيع عند سرعات تدفق الماء الصغيرة بدون وجود أي خلط داخل الأنبوبة وسمي ذلك السريان بالطبقي، ومع زيادة السرعة عن حد معين، لاحظ رينولدز أن مسار الصبغة أصبح مشتتا ولم يعد هناك نمط محدد للسريان وسمي ذلك السريان بالدوامي أو المضطرب (انظر شكل ٧).

رقم رينولدز

وقد أثبتت الدراسات بعد رينولدز أن التحول من سريان طبقي إلى دوامي في الأنابيب دائرية المقطع لا يعتمد فقط على سرعة المائع وإنما يعتمد أيضا على لزوجة وكثافة المائع وعلى القطر الداخلي للأنبوبة وقد دمجت هذه المتغيرات معا في مجموعة لا بعدية (ليس لها وحدات) أسميت برقم رينولدز (Re)

$$Re = \frac{\rho v D}{\mu}$$

حيث ρ كثافة المائع، V سرعة المائع، D القطر الداخلي للأنبوبة، μ لزوجة المائع الديناميكية، وبهذا التعريف يكون رقم رينولدز هو المعيار الكمي الذي يمكن به الحكم على نوع السريان فإذا وجد بالحساب أن $Re < 2100$ فيكون السريان طبقياً، أما إذا وجد أن $Re > 4000$ فيكون السريان دوامياً و بين هذين الحدين يكون السريان ذو طبيعة انتقالية أي من الممكن أن يتحول السريان من طبقي إلى دوامي اعتماداً على التفاصيل الهندسية لمدخل الأنبوبة



شكل ٧ : تجربة رينولدز للسريان الطبقي (a) والدوامي (b)

تحليل حركة المائع

في التطبيقات الهندسية يتم التعامل مع خصائص المائع مثل السرعة والكثافة والضغط على أنها دوال متصلة في الزمن والموقع في الفراغ ثلاثي الأبعاد:

$$v = v(x, y, z, t)$$

$$\rho = \rho(x, y, z, t)$$

$$P = P(x, y, z, t)$$

ولكن يمكن تبسيط حركة المائع دائماً باعتبار السريان في الحالة المستقرة أي التي لا تتغير فيها خصائص المائع مع الزمن عند موقع ما، كما يمكن اعتبار السريان في اتجاه واحد - على سبيل المثال السريان داخل أنبوبة دائرية في اتجاه محورها وعندئذ تكون

$$v = v(y)$$

$$\rho = \rho(x)$$

$$P = P(x)$$

حيث x اتجاه الحركة، و y الاتجاه العمودي على الحركة، وتغير كثافة المائع يتبع بالضرورة تغير ضغط المائع والكثافة إما أن تظل ثابتة مع تغير الضغط ويسمى المائع غير قابل للانضغاط مثل السوائل أو تتغير الكثافة مع تغير الضغط ويكون المائع قابلاً للانضغاط مثل الغازات. وبصفة عامة تعالج الحركة المستقرة للمائع غير القابل للانضغاط في الأنابيب الدائرية بتقسيمها إلى منطقتين: منطقة بالقرب من جدران الأنبوبة يظهر فيها تأثير الاحتكاك فتتغير سرعة المائع في الاتجاه العمودي على الحركة بينما يتغير ضغطه في اتجاه الحركة نفسه والمنطقة الأخرى بعيداً عن جدران الأنبوبة ويكون السريان بها جهدياً أي بدون تأثير احتكاك ويسمى المائع مثاليًا (لزوجهته تساوي صفراً) وبالطبع فإن مسار اهتمامنا سوف يكون بدراسة تأثير الاحتكاك على السريان لأن ذلك بدوره يؤثر على تشغيل الوحدات المختلفة في العملية الكيميائية مثل حالة السريان في المفاعلات الأنبوبية أو السريان في أعمدة التقطير أو أعمدة الامتصاص.... أو مثل حالة نقل النفط أو المقطرات البترولية أو المواد الكيماوية أو البتروكيماوية عبر خطوط الأنابيب.

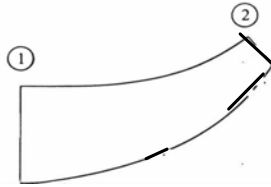
الفصل الرابع

معادلات التوازن الكلية

لحساب سرعة المائع في مقطع داخل نظام سريان أو لحساب ضغط المائع أو لاختيار المضخة المناسبة لنقل سائل من وحدة إلى أخرى داخل المصنع الكيميائي، يلزم تطبيق معادلتين أساسيتين على المائع المتحرك وهما: معادلة الاستمرارية، و معادلة التوازن الكلي للطاقة

معادلة الاستمرارية

معادلة الاستمرارية هي تطبيق لمبدأ توازن المادة في الحالة المستقرة على المائع المتحرك. باعتبار سريان مائع ما بين المقطعين (١) و (٢) الموضحين بشكل (٨)



شكل ٨ : موازنة كتلة المائع المار بين مقطعين

تكون كتلة المائع الداخلة إلى المقطع (١) في وحدة الزمن = كتلة المائع الخارجة من المقطع (٢) في وحدة الزمن

$$\dot{m}_1 = \dot{m}_2$$

حيث \dot{m} معدل السريان الكتلي للمائع (kg/s)، ويمكن التعويض عن معدل السريان الكتلي للمائع كحاصل ضرب كثافة المائع ومعدل سريانه الحجمي فتصبح المعادلة السابقة:

$$\dot{V}_1 \rho_1 = \dot{V}_2 \rho_2$$

حيث \dot{V} معدل السريان الحجمي للمائع (m^3/s) وبالتعويض عن معدل السريان الحجمي كحاصل ضرب السرعة المتوسطة للمائع ومساحة مقطع السريان ينتج أن:

$$\bar{v}_1 A_1 \rho_1 = \bar{v}_2 A_2 \rho_2$$

\bar{v}_1 السرعة المتوسطة للمائع خلال المقطع (١)

A_1 مساحة المقطع (١)

\bar{v}_2 السرعة المتوسطة للمائع خلال المقطع (٢)

A_2 مساحة المقطع (٢)

والمعادلة الأخيرة هي معادلة الاستمرارية وتستخدم لحساب سرعة المائع في مقطع سرياني ما إذا علمت سرعته في مقطع آخر ومساحتي المقطعين

معادلة توازن الطاقة الميكانيكية

تشمل صور الطاقة الميكانيكية لمائع متحرك: (١) طاقة الوضع بسبب وجود المائع في مجال

الجاذبية الأرضية وتساوي $g z$ (J/kg) حيث z ارتفاع المائع بالنسبة لمستوى مرجعي معين، (٢) طاقة

الحركة نتيجة لحركة المائع بسرعة مقدارها v وتساوي $\frac{1}{2} v^2$ (J/kg)، (٣) الشغل المبذول عند دخول المائع

مقطع ما أو عند خروجه ويساوي P/ρ (J/kg) حيث P ضغط المائع و ρ حجمه النوعي، وبتطبيق موازنة

كلية لصور الطاقة الميكانيكية الثلاث على المائع المار بين المقطعين (١) و (٢) كما في الشكل السابق

تنتج المعادلة التي تعرف بمعادلة برنولي:

$$\frac{P_1}{\rho} + \frac{1}{2} v_1^2 + g z_1 = \frac{P_2}{\rho} + \frac{1}{2} v_2^2 + g z_2$$

تطبيقات معادلة برنولي:

تستخدم معادلة برنولي لإيجاد الضغط أو السرعة في مقطع سرياني ما إذا علم الضغط و السرعة

ويتضح ذلك جليا من طريقة إيجاد معدل سريان سائل ما بواسطة مقياس فنشوري (شكل ٩) حيث يمر

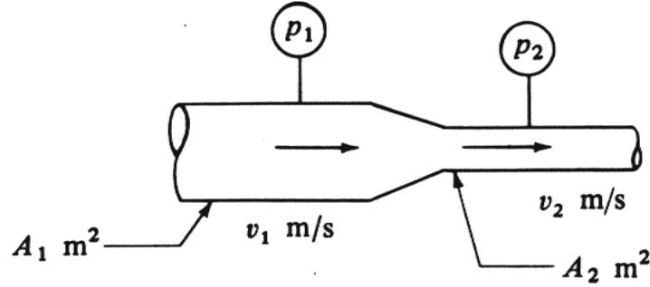
السائل بسرعة مجهولة v_1 خلال أنبوبة أفقية مساحة مقطعها A_1 وضغط المائع بها P_1 ثم بعد ذلك يمر

خلال المقطع المخروطي المتدرج إلى أنبوبة أفقية أخرى أضيق ومساحة مقطعها A_2 وضغط المائع بها P_2

ويقاس فرق الضغط $P_1 - P_2$. بتطبيق معادلة الاستمرارية أولا بين المقطعين (١) و (٢)

$$v_1 A_1 = v_2 A_2$$

$$v_2 = \frac{v_1 A_1}{A_2}$$



شكل ٩ : مقياس فنشوري

ثم تطبيق معادلة برنولي بين المقطعين (١) و (٢) وإهمال تأثير الاحتكاك على حركة السائل

وملاحظة أن $Z_1 = Z_2$

$$\frac{P_1}{\rho} + \frac{1}{2} v_1^2 = \frac{P_2}{\rho} + \frac{1}{2} v_2^2$$

وبالتعويض عن v_2 نجد أن

$$\frac{P_1}{\rho} + \frac{1}{2} v_1^2 = \frac{P_2}{\rho} + \frac{1}{2} \frac{v_1^2 A_1^2}{A_2^2}$$

$$P_1 - P_2 = \frac{\rho v_1^2 [A_1^2 / A_2^2 - 1]}{2}$$

$$v_1 = \sqrt{\frac{P_1 - P_2}{\rho} \frac{2}{[(A_1 / A_2)^2 - 1]}}$$

أو

$$v_2 = \sqrt{\frac{P_1 - P_2}{\rho} \frac{2}{[1 - (A_1 / A_2)^2]}}$$

$$\dot{V} = v_1 A_1 = v_2 A_2$$

تصحيح معادلة برنولي لتأثير الاحتكاك

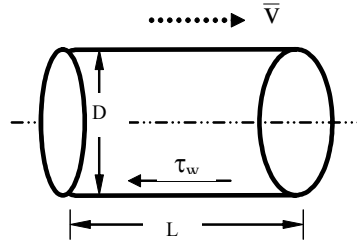
تتحقق معادلة برنولي في حالة السريان الجهدي بدون وجود احتكاك ولكن سريان الموائع دائماً يصاحبه قدر من الاحتكاك يفقد المائع جزءاً من طاقته الميكانيكية ولا يمكن عندئذ أن يستمر المائع في مساره إذ يكون الطرف الأيمن لمعادلة برنولي أقل دائماً من الطرف الأيسر ولا بد إذن من تعويض فاقد الطاقة بإضافة شغل خارجي إلى هذا الطرف بوجود مضخة في نظام السريان ويكون هذا هو التصحيح الأول لمعادلة برنولي للأخذ في الاعتبار تأثير الاحتكاك، أما التصحيح الثاني فهو استبدال السرعة V بالسرعة المتوسطة \bar{V} مع إدخال معامل التصحيح α في مقام الحد الخاص بطاقة الحركة وتعتمد α على نوع السريان إذا كان طبقياً أو دوامياً، للسريان الطبقي $\alpha = 0.5$ و للسريان الدوامي $\alpha = 1$ ويصبح الشكل النهائي لمعادلة برنولي بعد التصحيحين هو:

$$\frac{P_1}{\rho} + \frac{1}{2\alpha} v_1^2 + g z_1 + w_p = \frac{P_2}{\rho} + \frac{1}{2\alpha} v_2^2 + g z_2 + h_f$$

ويمكن الاستفادة من معادلة برنولي المصححة في حساب شغل المضخة (w_p) وإتمام هذا الحساب الهام ينبغي تعيين مقدار الاحتكاك (h_f) ويتوقف ذلك على المادة المصنوع منها الأنابيب و على طول الأنابيب و قطرها و على ما تحويه من مقاطع ضيقة أو متسعة أو وصلات وتشكل هذه العوامل قسامين للاحتكاك هما الاحتكاك السطحي والاحتكاك البنائي.

الاحتكاك السطحي

ينشأ هذا النوع من الاحتكاك عند تلامس المائع مع السطح الداخلي للأنبوبة أو القناة التي يتدفق بها نتيجة لتولد إجهاد القص τ_w الذي يقاوم حركة المائع. فإذا اعتبرنا أنبوبة مستقيمة دائرية المقطع طولها L وقطرها الداخلي D (شكل ١٠) ويتدفق بها مائع بسرعة متوسطة \bar{V}



شكل ١٠ : الاحتكاك السطحي في الأنبوبة

فان مقدار الاحتكاك السطحي في الأنبوبة (h_s) يعطى بالعلاقة:

$$h_s \text{ (J/kg)} = \frac{4 f \bar{v}^2 L}{2 D}$$

ويسمى f معامل الاحتكاك وتختلف قيمته باختلاف نوع السريان إذا كان طبقياً أو دوامياً . ويمكن الحصول على قيمة معامل الاحتكاك بيانياً من المخطط الموجود بالملحق رقم (٢) حسب الطريقة المشروحة بالمثال التوضيحي بنفس الملحق .

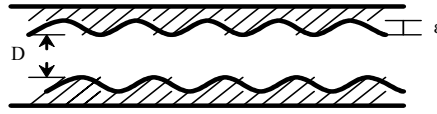
علاقة معامل الاحتكاك برقم رينولدز

في حالة السريان الطبقي تعتمد قيمة معامل الاحتكاك فقط على رقم رينولدز حسب العلاقة:

$$f = \frac{16}{Re}$$

و هي علاقة خطية إذا تم تمثيلها على مقياس رسم لوغاريتمي كما يتضح ذلك من منطقة

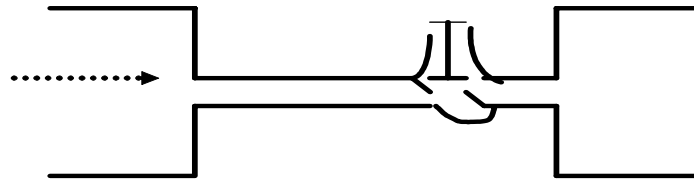
السريان الطبقي بالمخطط البياني المذكور في الفقرة السابقة. أما في حالة السريان الدوامي فتعتمد قيمة معامل الاحتكاك على رقم رينولدز ودرجة الخشونة النسبية للأنبوبة (ϵ/D) حيث ϵ هو الخشونة (شكل ١١) وتختلف قيمته باختلاف نوع الأنبوبة المصنوع منها الأنبوبة ويحدد الجدول الموجود بأعلى المخطط البياني قيمة الخشونة لعدة مواد إنشائية.



شكل ١١ : الخشونة في أنبوبة

الاحتكاك البنائي

ينشأ هذا النوع من الاحتكاك مع تغير سرعة المائع في المقدار أو الاتجاه مع وجود مقطع متسع أو ضيق مفاجئ في مسار المائع أو عند وجود الوصلات المختلفة كالصمامات أو الثنيات أو الأكواع (شكل ١٢) والتي تسبب جميعاً انفصال خطوط سريان المائع عن ملامسة الجدران الصلبة



شكل ١٢ : الأحتكاك الشكلي في أنبوبة

ويمكن تقدير الاحتكاك البنائي (h_D) في كل حالة من الحالات السابقة من المعادلة:

$$h_D (\text{J/kg}) = K \frac{\bar{v}^2}{2}$$

حيث K هو ثابت تجريبي يعتمد على نوع المسبب للاحتكاك البنائي (ملحق ٣) والجدير بالذكر أن طريقة اعتبار السرعة المتوسطة في المعادلة السابقة تختلف باختلاف المسبب للاحتكاك البنائي أيضاً. فبالنسبة للسريان خلال مقطع متسع مفاجئ أو خلال مقطع ضيق مفاجئ، تؤخذ السرعة المتوسطة في المقطع ذو المساحة الأصغر. وبالنسبة لأنواع الوصلات المختلفة تؤخذ السرعة المتوسطة في الأنبوبة المؤدية إلى الوصلة (أو التي تسبق الوصلة)

فقد الضغط والاحتكاك

يظهر أثر الاحتكاك السطحي أو الشكلي كفقد في ضغط المائع أثناء سريانه ويمكن التأكد من ذلك بقياس فرق الضغط بالمانومتر مثلا للمائع يتدفق بشكل مستقر في أنبوبة أفقية مستقيمة بين نقطة قرب مدخل الأنبوبة ونقطة أخرى قرب مخرجها، وطبقا لمعادلة توازن الطاقة الميكانيكية بين المدخل والمخرج ينتج أن

$$\frac{\Delta P}{\rho} = h_s$$

حيث ΔP فرق الضغط، ρ كثافة المائع وحسابيا يمكن الحصول أيضا على ΔP في حالة السريان الطبقي فقط للسوائل في الأنابيب الدائرية المستقيمة من معادلة هاجن - بواسيل:

$$\Delta P = \frac{32 L \bar{v} \mu}{D^2}$$

ومن أهم تطبيقات معادلة هاجن بواسيل إيجاد اللزوجة الديناميكية لسائل نيوتوني بدفعه بمعدل سريان صغير خلال أنبوبة معلومة الطول ذات قطر صغير. ويلاحظ أيضا من معادلة هاجن - بواسيل للسريان الطبقي أن $\frac{\Delta P}{L} \propto \bar{v}$ بينما وجد للسريان الدوامي أن $\frac{\Delta P}{L} \propto \bar{v}^{-n}$ حيث n تتراوح بين ٢ و ١,٧ وهو ما يتفق مع زيادة الاحتكاك في حال الوصول إلى ظروف السريان الدوامي. ومع وجود أي من مسببات الاحتكاك البنائي بمسار المائع تصبح العلاقة بين فرق الضغط و الاحتكاك الكلي:

$$\frac{\Delta P}{\rho} = h_s + h_D$$

الفصل الخامس

الصمامات والمضخات

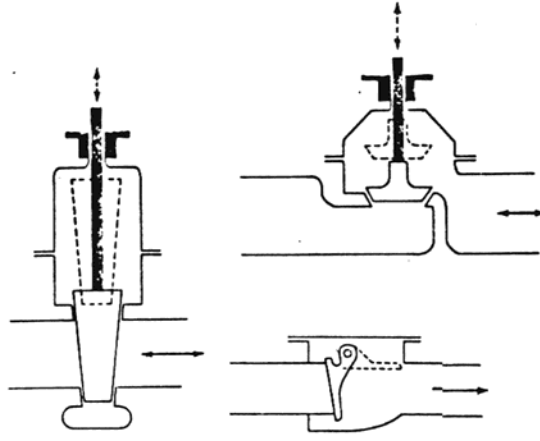
لا تخلو خطوط الإنتاج من أنواع الوصلات المختلفة وبخاصة الصمامات وكذلك يوجد عدة أنواع من المضخات داخل الوحدات الإنتاجية وهو ما يجعلنا نعرض بمزيد من التفاصيل للصمامات والمضخات.

أولاً: الصمامات

للصمامات أشكال و مقاييس مختلفة ومع اختلاف التصميم الميكانيكي أو الشكل الهندسي لكل صمام إلا أنها جميعاً تخدم أحد الأغراض الآتية: تقليل معدل سريان المائع أو إيقافه، خفض ضغط المائع بغرض تبريده أو إجبار المائع على السريان في اتجاه ما. والفكرة الأساسية للصمامات عموماً تقوم على أن الصمام يتكون من عائق متحرك داخل فتحة ذات أبعاد محددة ويتم اختيار حجم الصمام حسب الدرجة المطلوبة لمقاومة سريان المائع، فإذا كان الغرض من الصمام أن يبقى مفتوحاً ويكون ذو مقاومة صغيرة، فإن حجم العائق والفتحة التي يتحرك بها الصمام يجب أن يكونا كبيرين أما إذا كان الغرض من الصمام هو التحكم الدقيق في معدل سريان المائع فيجب تضيق الفتحة مع استخدام عائق ذي حجم صغير.

أنواع الصمامات

هناك ثلاثة أنواع شائعة من الصمامات هي: الصمام البوابة ويتميز بإحداث فقد صغير في ضغط المائع وهو إما أن يستخدم مفتوحاً دائماً أو مغلقاً دائماً والنوع الثاني من الصمامات هو الصمام ذو القلب ويحدث فقداً كبيراً في ضغط المائع أما النوع الثالث فهو صمام عدم الرجوع ويسمح بمرور المائع في اتجاه واحد فقط ويفتح بضغط المائع ويغلق إذا توقف السريان ويوضح شكل (١٣) أنواع الصمامات وكيفية عملها.



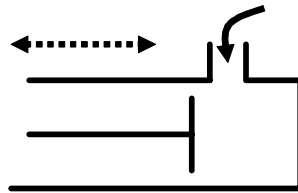
شكل ١٣ : الأنواع الرئيسية للضمامات

ثانياً: المضخات

تتقل السوائل من نقطة إلى أخرى داخل الوحدات الإنتاجية بالمضخات أما الغازات فتتقل بالمرآوح أو الضواغط وتعمل المضخات على زيادة الطاقة الميكانيكية للمائع وتصنف حسب طريقة عملها إلى مضخات إزاحية موجبة أو مضخات طاردة مركزية.

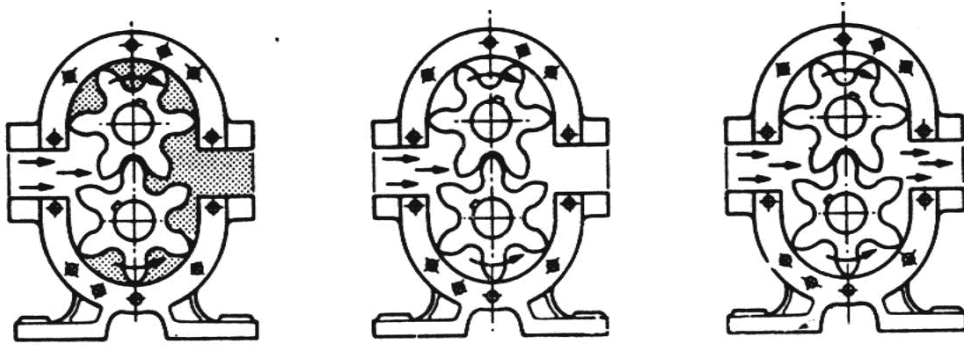
المضخات الإزاحية الموجبة

وهي نوعان: المضخة الترددية وتتكون من مكبس متحرك داخل أسطوانة حيث يتم سحب حجم معين من المائع إلى غرفة ثم يدفع المائع بحركة المكبس العكسية إلى الخارج عند ضغط أعلى (شكل ١٤) ويمكن استخدام المضخات الترددية لإعطاء ضغوط مرتفعة.



شكل ١٤ : المضخة الترددية

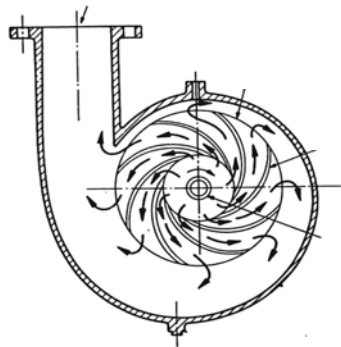
والنوع الآخر هو المضخة ذات التروس حيث تدور مجموعة من التروس المرتبطة مع بعضها البعض حيث يسحب السائل إلى الفراغات بين أسنان التروس ثم يدفع إلى الخارج مع الحركة الدورانية (شكل ١٥).



شكل ١٥ : المضخة ذات التروس

المضخة الطاردة المركزية

وهي أكثر الأنواع استخداماً في الصناعات الكيميائية ويوضح الشكل (١٦) رسماً تخطيطياً للمضخة التي تتكون في أبسط صورها من مجموعة من الدفاعات أو الأرياش تدور داخل غلاف معدني ويدخل السائل من فتحة السحب في اتجاه محور الدوران (١) ثم يملأ القنوات الموجودة بين الأرياش (٢) ويندفع خارجاً إلى السطح (٣) حيث يتجمع ويتدفق خارجاً من مخرج التصريف (٤). ومن عيوب المضخة الطاردة المركزية دفع السائل إلى الخارج عند ضغط منخفض ولكن يبقى الضغط الخارج من المضخة ثابتاً بدون تغيرات، كما يمكن للمضخة الطاردة المركزية التعامل مع السوائل المحتوية على مواد صلبة.



شكل ١٦ : المضخة الطاردة المركزية

ظاهرة التكيف في المضخة الطاردة المركزية

تحدث هذه الظاهرة إذا انخفض ضغط السائل في خط السحب خلف المضخة مباشرة عن الضغط البخاري أو تساوى معه وعند ذلك يتحول بعض السائل إلى بخار داخل المضخة بشكل مفاجئ وسريع وهو ما يسبب انخفاض سعة المضخة ومع استمرار هذه الظاهرة تتعطل المضخة نهائياً. ويمكن تلافي ظاهرة التكيف بزيادة ارتفاع فتحة السحب عن مستوى السائل (Z_s) عند نقطة التغذية وكذلك بتخفيض الاحتكاك في خط السحب بقدر الإمكان.

تمارين متنوعة (٢)

تمرين (١)

يسري سائل كثافته 1030 kg/m^3 ولزوجته 2.12 cp بمعدل 0.605 kg/s في أنبوبة قطرها 63.5 mm ، احسب:

(a) رقم رينولدز، حدد نوع السريان

(b) السرعة المتوسطة عند رقم رينولدز 2100 لنفس السائل في نفس الأنبوبة

الحل:

$$(a) \text{ Re} = \frac{\rho \bar{v} D}{\mu}$$

$$\rho = 1030 \text{ kg/m}^3, \mu = 2.12 \times 10^{-3} \text{ Pa.s}, D = 0.0635 \text{ m}, \bar{v} = ??$$

لحساب \bar{v} نستخدم $\dot{m} = \rho \bar{v} A$

$$A = \frac{\pi D^2}{4} = 3.17 \times 10^{-3} \text{ m}^2, \dot{m} = 0.605 \text{ kg/s}$$

$$\bar{v} = \frac{0.605}{1030 \times 3.17 \times 10^{-3}} = 0.185 \text{ m/s}$$

$$\text{Re} = \frac{1030 \times 0.185 \times 0.0635}{2.12 \times 10^{-3}} = 5707.5 > 4000$$

نوع السريان دوامي

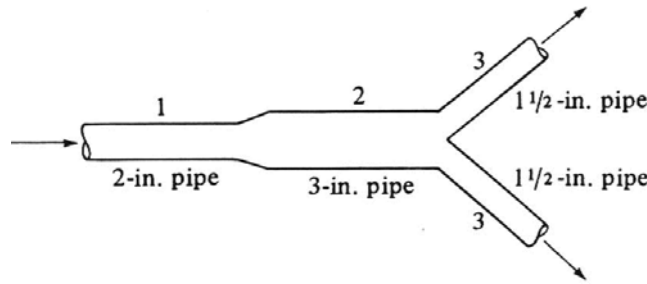
$$(b) \text{ Re} = 2100 = \frac{1030 \times \bar{v} \times 0.0635}{2.12 \times 10^{-3}}$$

$$\bar{v} = \frac{2100 \times 2.12 \times 10^{-3}}{1030 \times 0.0635} = 0.068 \text{ m/s}$$

تمرين (٢)

يتدفق زيت كثافته 829 kg/m^3 خلال النظام الأنبوبي الموضح بالشكل أدناه بمعدل سريان حتمي $1.388 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ مبتدءاً من الأنبوبة (١) ثم (٢) ثم ينقسم التدفق في النهاية بالتساوي في الأنابيب (٣)، احسب

- (a) معدل السريان الكتلي في الأنبوبة (١) وفي الأنبوبة (٢) وفي الأنبوبة (٣) في الحالة المستقرة
(b) السرعة المتوسطة في الأنبوبة (١) و الأنبوبة (٢) والأنبوبة (٣)



الحل:

a. $\dot{m}_1 = \dot{V} \times \rho$ ومعدل السريان الكتلي في الأنبوبة (١) $\dot{V} = 1.388 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$

بالتعويض عن $\rho = 829 \text{ kg/m}^3$ ، $\dot{V} = 1.388 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ ،
 $\therefore \dot{m}_1 = 1.238 \text{ kg/s}$

معدل السريان الكتلي في الأنبوبة (١) هو نفسه معدل السريان الكتلي في الأنبوبة (٢) لأن السريان مستقر، ومعدل السريان الكتلي في الأنبوبة (٣) هو نصف معدل السريان الكتلي المحسوب في الأنبوبة (٢) لأن التدفق ينقسم بشكل متساو على الأنبوبتين من النوع الثالث

$$\therefore \dot{m}_3 = \frac{\dot{m}_1}{2} = \frac{1.238}{2} = 0.619 \text{ kg/s}$$

b. لحساب السرعة المتوسطة في الأنابيب، يجب أولاً حساب مساحة مقطع كل أنبوبة

$$D_1 = (2 \times \frac{2.54}{100}), A_1 = \frac{\pi D_1^2}{4} = 2.027 \times 10^{-3} \text{ m}^2$$

$$D_2 = (3 \times \frac{2.54}{100}), A_2 = \frac{\pi D_2^2}{4} = 4.56 \times 10^{-3} \text{ m}^2$$

$$D_3 = (1.5 \times \frac{2.54}{100}), A_3 = \frac{\pi D_3^2}{4} = 1.14 \times 10^{-3} \text{ m}^2$$

بالنسبة للأنبوبة (١)

$$\dot{m}_1 = \bar{v}_1 \times \rho \times A_1$$

بالتعويض عن ρ ، A_1 ، \dot{m}_1

$$\bar{v}_1 = \frac{\dot{m}_1}{A_1 \times \rho} = \frac{1.238}{2.027 \times 10^{-3} \times 892} = 0.685 \text{ m/s}$$

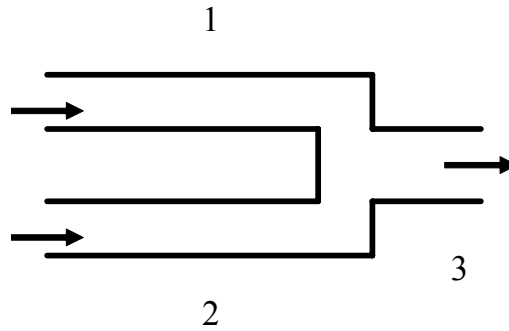
بالمثل

$$\bar{v}_2 = \frac{\dot{m}_2}{A_2 \times \rho} = \frac{1.238}{4.56 \times 10^{-3} \times 892} = 0.304 \text{ m/s}$$

$$\bar{v}_3 = \frac{\dot{m}_3}{A_3 \times \rho} = \frac{1.238}{1.14 \times 10^{-3} \times 892} = 1.218 \text{ m/s}$$

تمرين (٣)

يتدفق سائل في أنبوتين قطر الأولى ١٠ cm وسرعة السريان فيها ١٩ m/s وقطر الأنبوبة الثانية ٧ cm وسرعة السريان فيها ١٠ m/s وفي النهاية يصب السائل من الأنبوتين في أنبوبة واحدة قطرها ١٥ cm ، (انظر الشكل أدناه) ، احسب سرعة السريان في الأنبوبة الكبرى



الحل:

$$\dot{m}_3 = \dot{m}_1 + \dot{m}_2$$

$$\rho \bar{v}_3 A_3 = \rho \bar{v}_1 A_1 + \rho \bar{v}_2 A_2$$

$$\bar{v}_3 A_3 = \bar{v}_1 A_1 + \bar{v}_2 A_2$$

لحساب \bar{v}_3 لابد من حساب A_1 ، A_2 ، A_3

بالتعويض عن $D_1 = 0.1 \text{ m}$ ، $D_2 = 0.07 \text{ m}$ ، $D_3 = 0.15 \text{ m}$

$$A_1 = \frac{\pi D_1^2}{4} = 7.854 \times 10^{-3} \text{ m}^2$$

$$A_2 = \frac{\pi D_2^2}{4} = 3.848 \times 10^{-3} \text{ m}^2$$

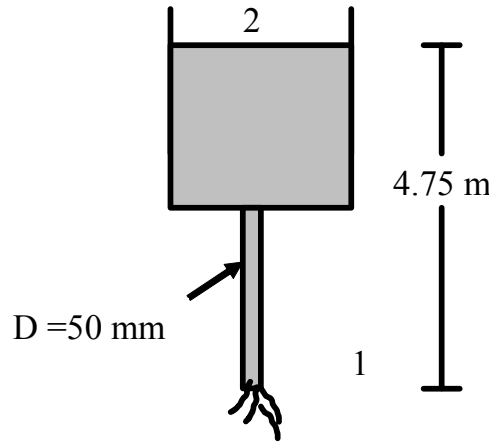
$$A_3 = \frac{\pi D_3^2}{4} = 0.018 \text{ m}^2$$

بالتعويض عن $\bar{v}_1, \bar{v}_2, \bar{v}_3, A_1, A_2, A_3$ في المعادلة الأخيرة

$$\therefore \bar{v}_3 = \frac{19 \times 7.85 \times 10^{-3} + 10 \times 3.848 \times 10^{-3}}{0.018} = 10.428 \text{ m/s}$$

تمرين (٤)

خزان واسع يحتوي على محلول ملح له كثافة نوعية ١.١٥، يصرف المحلول خلال أنبوبة رأسية ذات قطر ٥٠ mm متصلة بقاع الخزان وتنتهي الأنبوبة عند نقطة تتخفض ٤.٥m تحت سطح المحلول في الخزان كما هو موضح في الشكل أدناه، احسب سرعة خروج السائل من الأنبوبة بإهمال أي احتكاك في الأنبوبة



المعطيات:

كما في الرسم

إرشاد: تحسب السرعة المجهولة في أنبوبة ذات مساحة مقطع ما من معادلة الاستمرارية إذا عرفت السرعة في أنبوبة أخرى ذات مساحة مقطع معلومة (لا بد إذن أن يكون هناك أنبوبتان لاستخدام هذه الطريقة وهذا غير متوفر في هذه الحالة) أو بتطبيق معادلة برنولي إذا علم الضغط والسرعة عند أحد النقاط في نظام السريان وعلم الضغط فقط عند النقطة المراد إيجاد السرعة عندها وهو ما سنفعله في هذا التمرين

الحل:

تطبق معادلة برنولي بين نقطة على سطح محلول الملح بالخزان (النقطة (١)) ونقطة خروج المحلول من الأنبوبة الرأسية (النقطة (٢))

$$\frac{P_1}{\rho} + \frac{1}{2} v_1^2 + g z_1 = \frac{P_2}{\rho} + \frac{1}{2} v_2^2 + g z_2$$

(لأن الخزان واسع) $v_1 = 0$, (لأن الخزان مفتوح للهواء الجوي) $P_1 = P_{atm}$

$$P_2 = P_{atm}, v_2 = ?$$

(باعتبار أن مستوى الخروج هو المستوى المرجعي) $z_2 = 0$, $z_1 = 4.57 \text{ m}$

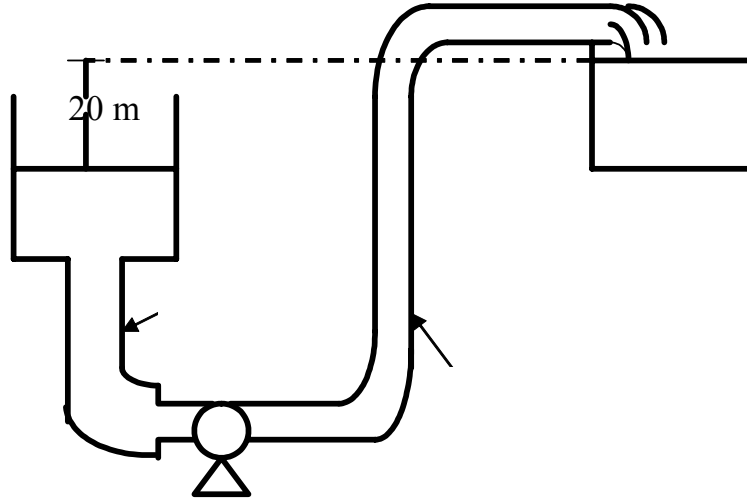
بالتعويض في معادلة برنولي:

$$v_2 = \sqrt{2 g z_1} = \sqrt{2 \times 9.8 \times 4.57} = 9.46 \text{ m/s}$$

تمرين (٥)

يضخ الماء من خزان تغذية واسع و مفتوح إلى خزان آخر بمعدل $10 \text{ m}^3/\text{s}$ (انظر الشكل أدناه). يحتوي خط السحب على كوع واحد كما أن هناك ضيق مفاجئ من خزان التغذية إلى أنبوبة السحب، أما خط التفريغ فيحتوي على كوعين، باعتبار أن مستوى الماء في خزان التفريغ يعلو بمقدار 20 m فوق سطح الماء في خزان التغذية، وأن ثابت الكوع هو 0.75 وثابت الضيق المفاجئ هو 0.55 وأن كثافة الماء 1000 kg/m^3 ولزوجته الماء 0.001 Pa.s وباعتبار أن جميع الأنابيب ملساء، احسب:

- سرعة المائع في خط السحب
- سرعة المائع في خط التفريغ
- رقم رينولدز في خط السحب
- رقم رينولدز في خط التفريغ
- مقدار الاحتكاك السطحي في خط السحب
- مقدار الاحتكاك السطحي في خط التفريغ
- مقدار الاحتكاك البنائي في خط السحب
- مقدار الاحتكاك البنائي في خط التفريغ
- قدرة المضخة إذا كانت كفاءة المضخة 65%
- الضغط المتولد بالمضخة



الحل:

يتضح من الرسم المعطى أن خط السحب هو الأنبوبة (أو مجموعة الأنابيب) الواصلة من خزان التغذية إلى المضخة، وأن خط التفريغ هو الأنبوبة (أو مجموعة الأنابيب) الواصلة من المضخة إلى خزان التفريغ (a) لحساب السرعة في خط السحب، يتعين أول حساب مساحة مقطع خط السحب

$$D = 4 \times 2,04 / 100 \text{ m}, A = \frac{\pi D^2}{4} = 8,107 \times 10^{-3} \text{ m}^2$$

$$\bar{v} = \frac{\dot{V}}{A} = \frac{6,31 \times 10^{-3}}{8,107 \times 10^{-3}} = 0,778 \text{ m/s}$$

(b) نكرر الحساب السابق لخط التفريغ

$$D = 2 \times 2,04 / 100 \text{ m}, A = \frac{\pi D^2}{4} = 2,027 \times 10^{-3} \text{ m}^2$$

$$\bar{v} = \frac{\dot{V}}{A} = \frac{6,31 \times 10^{-3}}{2,027 \times 10^{-3}} = 3,113 \text{ m/s}$$

(c) رقم رينولدز خط السحب

$$Re = \frac{\rho \bar{v} D}{\mu}$$

$$\rho = 1000 \text{ kg/m}^3, \bar{v} = 0,778 \text{ m/s}, D = 4 \times 2,04 / 100, \mu = 0,001 \text{ Pa.s}$$

$$Re = \frac{1000 \times 0.778 \times 4 \times 2.54}{0.001 \times 100} = 79044$$

(d) كما في (c) رقم رينولدز خط التفريغ

$$Re = \frac{\rho \bar{v} D}{\mu}$$

$$\rho = 1000 \text{ kg/m}^3, \bar{v} = 3.113 \text{ m/s}, D = 2 \times 2.54/100, \mu = 0.001 \text{ Pa.s}$$

$$Re = \frac{1000 \times 3.113 \times 2 \times 2.54}{0.001 \times 100} = 158140$$

(e) حساب الاحتكاك السطحي في خط السحب

$$h_s = \frac{4 f L \bar{v}^2}{2 D}$$

(من منحني الأنابيب المساء) $f = 0.0045$, السريان دوامي $\rightarrow Re = 79044$

$$L = (20 \text{ ft} / 3.2808) = 6.096 \text{ m}, \bar{v} = 0.778 \text{ m/s}, D = 2 \times (2.54/100)$$

بالتعويض عددياً بالقيم السابقة

$$h_s = \frac{4 \times 0.0045 \times 6.096 \times (0.778)^2}{2 \times 2 \times \frac{2.54}{100}} = 0.327 \text{ J/Kg}$$

(f) نكرر نفس الحساب السابق بالنسبة لخط التفريغ

$$Re = 158140, \rightarrow f = 0.0040, L = (125 + 10 + 34 + 50) \text{ ft} / 3.2808 = 66.752 \text{ m},$$

$$D = 2 \times (2.54/100) \bar{v} = 3.113 \text{ m/s}$$

$$h_s = \frac{4 \times 0.0040 \times 66.752 \times (3.113)^2}{2 \times 2 \times \frac{2.54}{100}} = 101.871 \text{ J/Kg}$$

(g) حساب الاحتكاك الشكلي بالنسبة لخط السحب

$$h_D = (K_{\text{Elbow}} + K_{\text{Contraction}}) \times \frac{\bar{v}^2}{2}$$

بالتعويض عن $K_{\text{Elbow}} = 0.75$, $K_{\text{Contraction}} = 0.55$, $\bar{v} = 0.778 \text{ m/s}$

$$h_D = (0.75 + 0.55) \times \frac{(0.778)^2}{2} = 0.393 \text{ J/kg}$$

(h) نكرر الحساب في الخطوة السابقة بالنسبة لخط التفريغ

$$h_D = 2 \times K_{\text{Elbow}} \times \frac{\bar{v}^2}{2}$$

بالتعويض عن $K_{\text{Elbow}} = 0.75$, $\bar{v} = 0.778 \text{ m/s}$

$$h_D = 0.75 \times (3.113)^2 = 7.268 \text{ J/kg}$$

(i) قدرة المضخة = $\frac{W_p \times \dot{m}}{\eta}$ حيث η كفاءة المضخة، $\eta = 0.65$

$$\dot{m} = \dot{V} \times \rho = 6.31 \times 10^{-3} \times 1000 = 6.31 \text{ kg/s}$$

تحسب W_p بتطبيق معادلة برنولي المصححة بين مستوى سطح الماء (١) في خزان التغذية ومستوى سطح الماء في خزان التفريغ (٢)

$$\frac{P_1}{\rho} + \frac{1}{2} \frac{\bar{v}_1^2}{\alpha} + g z_1 + W_p = \frac{P_2}{\rho} + \frac{1}{2} \frac{\bar{v}_2^2}{\alpha} + g z_2 + h_f$$

$$P_1 = P_2 = P_{\text{atm}}$$

$$\bar{v}_1 = \bar{v}_2 = 0$$

(باعتبار أن سطح الماء في خزان التغذية هو المستوى المرجعي) $z_1 = 0$, $z_2 = 20 \text{ m}$

$$h_f = h_{s_{\text{الكلية}}} + h_{D_{\text{الكلية}}} = 0.327 + 101.871 + 0.393 + 7.268 = 109.859 \text{ J/kg}$$

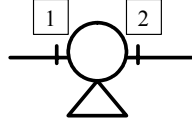
(لأن السريان دوامي) $\alpha = 1$

$$W_p = 9.8 \times 20 + 109.859 = 305.859 \text{ J/kg}$$

بالتعويض عن $\dot{m} = 6.31 \text{ kg/s}$, $\eta = 0.65$

$$\text{قدرة المضخة} = \frac{305.859 \times 6.31}{0.65} = 2969.486 \text{ W} = 2.97 \text{ kW}$$

(ج) للحصول على الضغط المتولد بالمضخة ، تطبق معادلة توازن الطاقة الميكانيكية مرة أخرى ولكن على المضخة فقط بين الموضعين (١) و (٢) كما هو موضح بالشكل



الموضع (١) مدخل المضخة ، الموضع (٢) مخرج المضخة

$$P_2 - P_1 = ?, \quad W_p = 302.2 \text{ J/kg}, \quad h_f = 0, \quad z_1 = z_2$$

$$W_p = (P_2 - P_1) / \rho, \quad P_2 - P_1 = 302.2 \text{ J/kg}$$

ملاحظات : دائماً يؤخذ المستوى (١) في معادلة توازن الطاقة الميكانيكية عند سطح السائل في خزان التغذية ويؤخذ المستوى (٢) إما عند نقطة التفريغ أو عند سطح السائل في خزان التفريغ حسب المعطيات. أيضاً من الملاحظ أنه لا بد من إيجاد التسع مطلوبات الأولى للوصول لحساب قدرة المضخة في المطلوب العاشر

امتحان ذاتي (١)

اختر الإجابة الصحيحة

١. طبقا لمعادلة التوازن الهيدروستاتيكي
 - الضغط عند نقطة ما في المائع يتغير تبعا لشكل الإناء المحتوي على المائع
 - الضغط عند نقطة ما في المائع يتغير تبعا لحجم الإناء المحتوي للمائع
 - الضغط عند نقطة ما في المائع يتغير من نقطة إلى أخرى حسب ارتفاع النقطة
٢. يعطي المانومتر ذو النهاية المغلقة
 - الضغط المقاس للمائع
 - الضغط المطلق للمائع أو الضغط الجوي
 - فرق الارتفاع بين مستويي مائع المانومتر
٣. في معادلة المانومتر الفرقي
 - يمكن إهمال كثافة المائع الأصلي إذا كان المائع الأصلي غازا
 - يمكن إهمال كثافة المائع الأصلي إذا كان المائع الأصلي ماء
 - يمكن إهمال كثافة المائع الأصلي إذا كان المائع الأصلي زئبقاً
 - يكون ضغط المائع ثابتا دائما
٤. السطح الحر لسائل ساكن في كأس يكون
 - أفقيا
 - رأسيا
 - مائلا
٥. الضغط الصغير المقاس بعدد بوردون
 - يكون ذو دقة كبيرة
 - يكون ذو دقة صغيرة
 - يكون بلا دقة

إجابة امتحان ذاتي (١)

اختر الإجابة الصحيحة

١. طبقا لمعادلة التوازن الهيدروستاتيكي
 - الضغط عند نقطة ما في المائع يتغير تبعا لشكل الإناء المحتوي على المائع
 - الضغط عند نقطة ما في المائع يتغير تبعا لحجم الإناء المحتوي للمائع
 - الضغط عند نقطة ما في المائع يتغير من نقطة إلى أخرى حسب ارتفاع النقطة
٢. يعطي المانومتر ذو النهاية المغلقة
 - الضغط المقاس للمائع
 - الضغط المطلق للمائع أو الضغط الجوي
 - فرق الارتفاع بين مستويي مائع المانومتر
٣. في معادلة المانومتر الفرقي
 - يمكن إهمال كثافة المائع الأصلي إذا كان المائع الأصلي غازا
 - يمكن إهمال كثافة المائع الأصلي إذا كان المائع الأصلي ماء
 - يمكن إهمال كثافة المائع الأصلي إذا كان المائع الأصلي زئبقاً
 - يكون ضغط المائع ثابتا دائما
٤. السطح الحر لسائل ساكن في كأس يكون
 - أفقيا
 - رأسيا
 - مائلا
٥. الضغط الصغير المقاس بعدد بوردون
 - يكون ذو دقة كبيرة
 - يكون ذو دقة صغيرة
 - يكون بلا دقة

امتحان ذاتي (٢)

اختر الإجابة الصحيحة

١. اللزوجة
 - للسوائل تزيد مع ارتفاع درجة الحرارة بينما تقل اللزوجة مع ارتفاع درجة الحرارة في حالة الغازات
 - للسوائل تنخفض مع ارتفاع درجة الحرارة بينما ترتفع اللزوجة مع درجة الحرارة في حالة الغازات
 - للسوائل تنخفض مع ارتفاع درجة الحرارة بينما تقل اللزوجة مع ارتفاع درجة الحرارة في حالة الغازات
٢. للمائع في حالة السريان المستقر
 - تتغير السرعة مع الزمن عند نفس الوضع
 - تظل السرعة ثابتة مع الزمن عند نفس الموضع
 - تتغير السرعة مع الموضع والزمن
٣. معامل الاحتكاك السطحي لسائل يتدفق في أنبوبة خشنة
 - يعتمد فقط على رقم رينولدز في حالة السريان الدوامي
 - يعتمد فقط على درجة خشونة الأنبوبة في حالة السريان الطبقي
 - يعتمد فقط على كل من رقم رينولدز ودرجة خشونة الأنبوبة في حالة السريان الدوامي
٤. تكون قدرة المضخة اللازمة لدفع سائل في أنبوبة
 - أكبر إذا كان بالأنبوبة وصلات
 - أصغر إذا كان بالأنبوبة وصلات
 - هي نفسها إذا كان بالأنبوبة وصلات
٥. تحدث ظاهرة التكهف في المضخات الطاردة المركزية
 - نتيجة لارتفاع ضغط المائع في خط السحب عن الضغط البخاري
 - نتيجة لانخفاض ضغط المائع في خط السحب عن الضغط البخاري
 - نتيجة لارتفاع ضغط المائع في خط التفريغ

إجابة امتحان ذاتي (٢)

اختر الإجابة الصحيحة

١. اللزوجة
 - للسوائل تزيد مع ارتفاع درجة الحرارة بينما تقل اللزوجة مع ارتفاع درجة الحرارة في حالة الغازات
 - للسوائل تنخفض مع ارتفاع درجة الحرارة بينما ترتفع اللزوجة مع درجة الحرارة في حالة الغازات
 - للسوائل تنخفض مع ارتفاع درجة الحرارة بينما تقل اللزوجة مع ارتفاع درجة الحرارة في حالة الغازات
٢. للمائع في حالة السريان المستقر
 - تتغير السرعة مع الزمن عند نفس الوضع
 - تظل السرعة ثابتة مع الزمن عند نفس الوضع
 - تتغير السرعة مع الموضع والزمن
٣. معامل الاحتكاك السطحي لسائل يتدفق في أنبوبة خشنة
 - يعتمد فقط على رقم رينولدز في حالة السريان الدوامي
 - يعتمد فقط على درجة خشونة الأنبوبة في حالة السريان الطبقي
 - يعتمد فقط على كل من رقم رينولدز ودرجة خشونة الأنبوبة في حالة السريان الدوامي
٤. تكون قدرة المضخة اللازمة لدفع سائل في أنبوبة
 - أكبر إذا كان بالأنبوبة وصلات
 - أصغر إذا كان بالأنبوبة وصلات
 - هي نفسها إذا كان بالأنبوبة وصلات
٥. تحدث ظاهرة التكهف في المضخات الطاردة المركزية
 - نتيجة لارتفاع ضغط المائع في خط السحب عن الضغط البخاري
 - نتيجة لانخفاض ضغط المائع في خط السحب عن الضغط البخاري
 - نتيجة لارتفاع ضغط المائع في خط التفريغ



أساسيات الحرارية والموائع

الديناميكا الحرارية

الديناميكا الحرارية

٢

الجدارة :

تحديد متطلبات الطاقة لمعدات العمليات الكيميائية حسابيا من قوانين الديناميكا الحرارية

الأهداف:

عند الانتهاء من هذه الوحدة تكون قادراً على:

- التمييز بين صور الطاقة الأساسية في العمليات الصناعية
- تحديد خواص الماء من جداول البخار واستخدامها في حسابات الغلايات والمبادلات الحرارية
- تحديد ظروف التشغيل المناسبة للأنظمة المغلقة والمفتوحة
- تحديد السعة الحرارية للمواد الصلبة والسائلة والغازية

الوقت المتوقع للتدريب:

١٥ ساعة اتصال

الوسائل المساعدة:

استخدام جداول البخار

متطلبات الجدارة:

- اجتياز مقرر أسس الهندسة الكيميائية

الفصل الأول

المفاهيم الأساسية في علم الديناميكا الحرارية Thermodynamics

يمكن تعريف علم الديناميكا الحرارية على أنه علم الطاقة، وقد بدأ هذا العلم بجهود ترمي لتحويل الحرارة إلى قدرة مع اكتشاف الآلة البخارية. واليوم يتناول هذا العلم صور الطاقة المختلفة وتحولاتها وتصاغ هذه التحولات فيما يعرف بالقانونين الأول والثاني للديناميكا الحرارية وهي قوانين طبيعية موجودة منذ أن خلق الله سبحانه وتعالى الكون وقد أدى معرفة الإنسان بهذه القوانين إلى ظهور العديد من التطبيقات المفيدة في الحياة. وعلى سبيل المثال في مجال الصناعات الكيميائية يكون هناك احتياج لتحديد متطلبات الحرارة ونسب التحول عند الاتزان للتفاعلات الكيميائية وكذلك تعيين متطلبات القدرة للمضخات والضواغط وتحديد علاقات الاتزان في حال انتقال المادة بين الأطوار المختلفة.

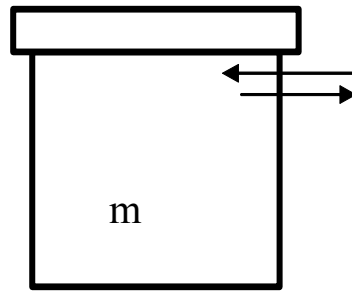
النظام الديناميكي الحراري System: هو كمية من المادة التي تتواجد في حيز ما ونقوم بدراستها

الوسط المحيط Surroundings: هو حيز المادة خارج النظام الديناميكي الحراري

الحدود Boundaries: هي الفواصل بين النظام والوسط المحيط

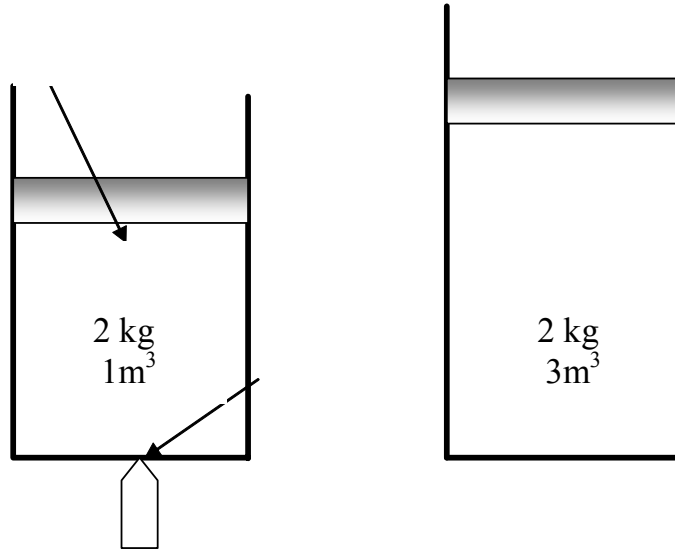
ويمكن تقسيم الأنظمة إلى نوعين رئيسيين :

النظام المغلق: هو الذي يحتوي على كتلة محددة من المادة ولا تخرج المادة من هذا النظام أو تدخل إليه، أي أنه لا يتبادل المادة مع الوسط المحيط وكمثال على ذلك الخزان المغلق ذو الحدود الثابتة الذي يحتوي على كتلة محددة من الغاز أو السائل (شكل ١).



شكل ١ : النظام المغلق ذو الحدود الثابتة

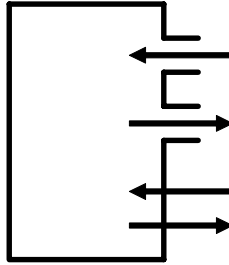
لكن في المقابل يمكن أن يتبادل النظام المغلق الطاقة مع الوسط المحيط في صورة حرارة أو شغل وفي هذه الحالة لا يكون ضرورياً أن يبقى حجم النظام ثابتاً وقد يتحرك جزء من حدود النظام وكمثال نعتبر الأسطوانة الرأسية ذات المكبس المتحرك (شكل ٢) والتي تحتوي على كتلة من الغاز. نطلق على الغاز المائع الشغال **working fluid** ويتكون النظام هنا من الأسطوانة والمكبس والغاز. فإذا تم تسخين الأسطوانة من الخارج يتحرك المكبس إلى أعلى (بتغيير حجم (النظام) الغاز ويتحرك جزء من حدود النظام وهو السطح الداخلي للمكبس)



شكل ٢ : النظام المغلق ذو الحدود المتحركة

الأنظمة المغلقة المعزولة : هي أنظمة لا تتبادل الكتلة أو الطاقة مع الوسط المحيط

الأنظمة المفتوحة Open Systems: وهي حيز محدد في الفراغ وبه سريان للكتلة مثل الضواغط والمضخات والآلة البخارية وتتميز هذه الأنظمة بتبادل كل من الطاقة والمادة مع الوسط المحيط (شكل ٣)



شكل ٣ : النظام المفتوح

خواص الأنظمة Properties of a System: يتميز النظام الديناميكي الحراري بعدة خواص ومن أمثلة الخواص الضغط P ودرجة الحرارة T والحجم V والكتلة m .. ويمكن تقسيم خواص الأنظمة إلى قسمين رئيسيين: الخواص الممتدة والخواص المركزة (extensive and intensive properties). تعتمد قيمة الخواص الممتدة على كمية المادة التي يتكون منها نظام ما مثل الحجم، الكتلة، الطاقة الكلية للنظام. أما الخواص المركزة فهي مثل درجة الحرارة والضغط والكثافة وهي لا تعتمد على كمية المادة ويجري التعامل بكثرة في الديناميكا الحرارية بالخواص النوعية أو المنسوبة لوحدة الكتل مثل الحجم النوعي ويعرف على أنه حجم وحدة الكتل أو V/m

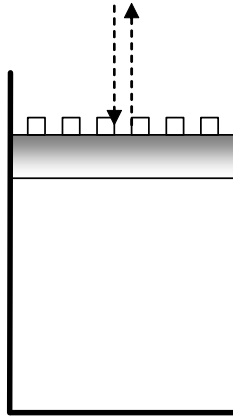
حالة الأنظمة: تحدد حالة النظام بمجموعة من الخواص التي يمكن قياسها ومعرفة قيمة كل منها فإذا تغيرت قيمة أحد خواص النظام تتغير بالتالي حالة النظام، فإذا لم يحدث تغير في حالة النظام لكان النظام متزنًا. على سبيل المثال، في حالة تسخين الأسطوانة ذات المكبس المتحرك المشروحة سابقًا يتغير حجم الغاز من ١ m^3 إلى ٣ m^3 ،

العمليات الديناميكية الحرارية: يسمى التغير الذي يحدث في النظام بين حالتيه الابتدائية والنهائية بالعملية الديناميكية الحرارية Thermodynamic process ويطلق على مجموعة الحالات الوسيطة التي يمر بها النظام أثناء العملية مسار العملية Path ويشمل وصف التغير تحديد الحالة الابتدائية والنهائية للنظام ومسار العملية وكذلك التداخل الذي يحدث بين النظام والوسط المحيط. ويمكن تصنيف العمليات التي تحدث بالأنظمة إلى نوعين رئيسيين:

- **عمليات انعكاسية Reversible processes:** حيث يمكن عكس اتجاه هذه العمليات عند أي نقطة موضوعية أو لحظة زمنية بتغيير صغير جدا في ظروف العملية فيعود كل من النظام والوسط المحيط إلى حالتها الابتدائية

- **عمليات غير انعكاسية Irreversible processes:**

حيث لا يمكن عكس اتجاه التغيير في هذه العمليات دون حدوث تغيير دائم في الوسط المحيط. ولتوضيح طبيعة العمليات المذكورة نعتبر عدة أمثلة، فلا يمكن إعادة تسخين كوب الماء الذي بردتوا و فقد حرارته إلى الوسط المحيط به باسترجاع هذه الحرارة وبالتالي فان عملية تبريد الماء هنا غير انعكاسية. ونعود إلى المثال الخاص بتمدد الغاز(النظام) داخل الأسطوانة ذات المكبس المتحرك (أو ضغط الغاز بدلا من تمدده). ولتبسيط عملية التمدد نعتبر أن ضغط الغاز في البداية يكون كافيا للاتزان مع مجموعة الأثقال المتساوية الكتلة الموضوعة فوق السطح الخارجي للمكبس. ويهمل الاحتكاك بين جدران الأسطوانة والأسطح الجانبية للمكبس. ولكي يتمدد الغاز لابد أن يزال ثقل أو أكثر من على سطح المكبس، وحينئذ يتسارع المكبس متحركا إلى أعلى حتى يصل إلى وضع أقصى ارتفاع فإذا تم تثبيت المكبس عند هذا الوضع لكنت الزيادة في طاقة وضع المكبس مساوية تقريبا للشغل المبذول في دفع المكبس إلى أعلى ولكن نتيجة لانعدام أي قيود يبدأ المكبس في الهبوط إلى أسفل بحركة تذبذبية تخبو مع الزمن حتى يتوقف المكبس تماما عند موضع أعلى من موضع الاتزان الابتدائي وهذا يدل على فقد جزء من طاقة المكبس ولا يمكن العودة إلى نفس الحالة الابتدائية للنظام والوسط المحيط بإعادة الأثقال مرة أخرى إلى سطح المكبس وبالتالي تكون عملية التمدد بهذه الطريقة غير انعكاسية. وفي المقابل إذا تم استخدام أثقال ذات كتل متساوية ومتناهية في الصغر وإذا أزيلت تلك الأثقال الواحدة تلو الأخرى بالتدرج وببطء ثم أعيدت مرة أخرى فإنه يمكن العودة بالنظام (الغاز) والوسط المحيط (المكبس) إلى الحالة الابتدائية.

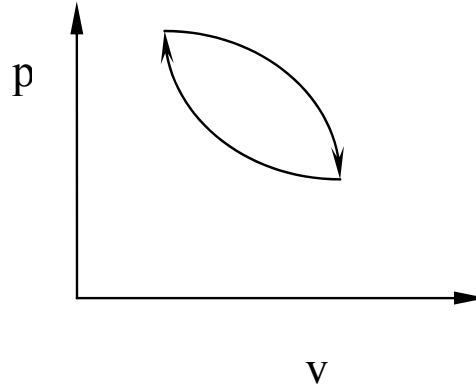


شكل ٤ : عملية تمدد غاز

والمثال الأخير هو التفاعل الكيميائي الانعكاسي. وندرس للتحلل الحراري لكاربونات الكالسيوم لإعطاء أكسيد الكالسيوم وثاني أكسيد الكربون. فباعتبار أن الأسطوانة السابقة يتواجد بها بدلا من الغاز خليط متزن من كربونات الكالسيوم وأكسيد الكالسيوم و ثاني أكسيد الكربون مع وضع الأسطوانة في حمام ذي درجة حرارة ثابتة بحيث يكون ضغط ثاني أكسيد الكربون كافيا للاتزان مع الأثقال على سطح المكبس ، فإذا أضيفت أثقال متناهية في الصغر للمكبس فسوف يزداد ضغط ثاني أكسيد الكربون بمقدار صغير جدا ويتحد مع أكسيد الكالسيوم لتكوين كربونات الكالسيوم مما يسبب هبوط المكبس ببطء . و إذا تمت إزالة الأثقال ببطء عاد النظام إلى حالته الابتدائية. ويمكن الوصول إلى نفس النتيجة بتخفيض أو زيادة درجة حرارة الحمام بطريقة متناهية في الصغر.

وكما يتضح لنا من الأمثلة السابقة أن العمليات الانعكاسية هي عمليات مثالية لا يمكن أن تتحقق وأن كل التغيرات الطبيعية هي عمليات غير انعكاسية وقد يتساءل المتدرب لماذا إذن الاهتمام بالعمليات الانعكاسية مادامت لا تتحقق؟ لسببين، الأول هو سهولة التعامل مع هذه العمليات حسابيا والثاني لأن آلات توليد القدرة مثل الآلة البخارية وغيرها تنتج أقصى شغل ممكن إذا كانت تعمل حسب مبدأ الانعكاسية وهي بذلك تمثل معيار الحكم على أداء الآلات الحقيقية كذلك فإن استهلاك الطاقة في الآلات مثل المضخات والضواغط التي تعمل حسب مبدأ الانعكاسية يكون أقل ما يمكن.

الدورات: هي تلك السلسلة من العمليات التي يعود بعدها النظام إلى حالته الابتدائية وبالتالي تنطبق حالة النظام الابتدائية على حالته النهائية والدورات هامة جدا في توليد القدرة مثل الآلة البخارية. وبصفة عامة يمكن تمثيل العمليات الديناميكية الحرارية على المخططات الإحداثية حيث تكون الإحداثيات هي درجة الحرارة والضغط أو الحجم النوعي ويمثل شكل (٥) دورة مكونة من عمليتين

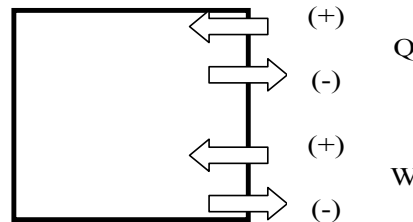


شكل ٥ : دورة مكونة من عمليتين

الفصل الثاني

تصنيف الطاقة في الديناميكا الحرارية

يمتلك النظام الديناميكي الحراري دائماً قدراً من الطاقة الكلية، وهذا القدر بالطبع يختلف حسب حالة النظام. والطاقة الكلية لأي نظام هي مجموع طاقة حركته وطاقة وضعه وطاقته الداخلية. وهناك صور أخرى من الطاقة مثل الطاقة الكهربائية والطاقة المغناطيسية وطاقة الرياح والطاقة الشمسية والتوتر السطحي ولكننا لن نعتبر هذه الأنواع في هذا المقرر. وطاقة الحركة والوضع تنسب إلى إطارات مرجعية خارج النظام أما الطاقة الداخلية فهي ترتبط بالتركيب الجزيئي للمادة وتعتمد على مدى نشاط الجزيئات وتشمل طاقة حركة الجزيئات وطاقة وضعها والطاقة التي تربط بين ذرات الجزيئات وكذلك طاقة الإلكترونات والنويات في الذرات. وتكمن أهمية الطاقة الداخلية في أن المحتوى الحراري أو الانثالي للمادة هو مجموع الطاقة الداخلية لها وحاصل ضرب الضغط المؤثر عليها وحجمها. وصور الطاقة التي فرغنا توا من الحديث عنها تختزن بواسطة الأنظمة وثمة نوعان آخران من الطاقة هما الشغل والحرارة المنتقلة وهي صور متحركة للطاقة لا يمكن اختزانها وإنما يتم تبادلها مع الوسط المحيط ونقلها أيضاً أن الشغل والحرارة المنتقلة هما دوال مسار لا يعتمدان على حالة النظام الابتدائية والنهائية وإنما يعتمدان على مسار العملية التي غيرت في حالة النظام. وحيث إن النظام والوسط المحيط يتبادلان الشغل والحرارة فلا بد أن يكون لهما إشارة وقد جرى العرف على أن المرغوب فيه أن يكون الشغل منتجا من النظام وتكون إشارته موجبة أما إذا استهلك النظام شغلا فتكون إشارة الشغل سالبة أما الحرارة المكتسبة بواسطة النظام فتكون إشارتها موجبة والحرارة المفقودة من النظام تكون إشارتها سالبة (شكل ٦). ونعرض الآن لمفهوم الشغل الميكانيكي للمكبس المتحرك في أسطوانة لأنه أساس عمل آلات الاحتراق الداخلي وكذلك بعض أنواع المضخات والضواغط



شكل ٦ : إشارات الشغل والحرارة المنتقلة

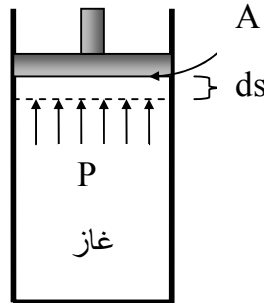
الشغل الميكانيكي

من المبادئ البسيطة لديناميكا الأجسام المتحركة نعرف أن الشغل الميكانيكي ينتج من تأثير قوة F على جسم ما فتزيحه مسافة متناهية الصغر ds ويكون مقدار الشغل الكلي W

$$W = \int_0^s F ds$$

و يتضح من المعادلة السابقة أن هناك متطلبين للحصول على شغل يمكن أن يتبادله النظام مع الوسط المحيط: قوة تؤثر على حدود النظام، وحدود تتحرك بتأثير هذه القوة. والسؤال الآن كيف تطبق المعادلة لحساب الشغل من مكبس متحرك داخل أسطوانة ؟

نعتبر الترتيبية المكونة من أسطوانة ومكبس ويملاً غاز الحيز الداخلي للأسطوانة ، حيث الضغط الابتدائي للغاز هو P وحجمه الكلي V ومساحة مقطع المكبس هي A ، وبحيث يؤثر على سطح المكبس من الخارج ضغط مقداره $P-dP$. فإذا تغير حجم الغاز بمقدار dV يتحرك المكبس إلى الأعلى أو إلى الأسفل ببطء شديد تحت تأثير القوة الناتجة من ضغط الغاز P مسافة مقدارها ds كما هو موضح في شكل (٧)



شكل ٧ : حركة مكبس تحت تأثير ضغط الغاز

وحسب الظروف المذكورة وما تم شرحه في السابق فإن هذه العملية تكون انعكاسية ويكون الشغل المبذول فيها

$$W_b = \int_0^s F ds = \int_0^s PA ds = \int_{V_1}^{V_2} PdV$$

حيث $F = P A$ ، $dV = A ds$ ، و V_1 ، V_2 الحجم الابتدائي والحجم النهائي للنظام على الترتيب، والملاحظ أن إشارة شغل الحدود (W_b) تكون موجبة إذا كان الغاز يتمدد أي dV موجبة،

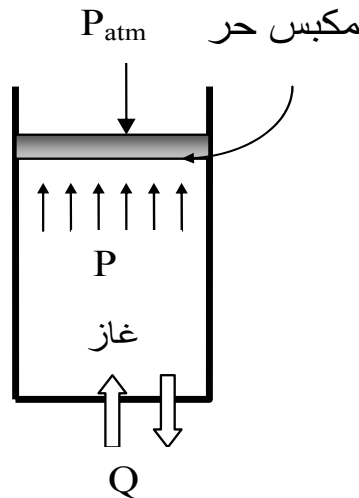
فيبذل المكبس شغلا على الوسط المحيط أما إذا كان الغاز ينكمش أو dV سالبة، فيبذل الوسط المحيط شغلا على الغاز وتكون إشارة شغل الحدود سالبة ويتفق ذلك مع ما قلناه في السابق عن إشارة الشغل. ولإجراء التكامل وحساب قيمة شغل الحدود، يلزم معرفة مسار العملية أو بطريقة أخرى العلاقة بين الضغط والحجم وعادة ما يحدث التمدد أو الانكماش بأحد العمليات الآتية :

عملية ذات ضغط ثابت Isobaric Process

وفيها يكون المكبس حر الحركة تحت تأثير وزنه والضغط الجوي الخارجي وغير متصل بعمود إدارة من سطحه الخارجي وبسبب ثبات كتلة المكبس والضغط الجوي يظل ضغط الغاز ثابتا أثناء هذه العملية ويمكن تمثيل هذه العملية رياضيا بالمعادلة : $P = \text{const}$ وبالتالي يكون شغل الحدود

$$W_b = \int_{V_1}^{V_2} PdV = P (V_2 - V_1)$$

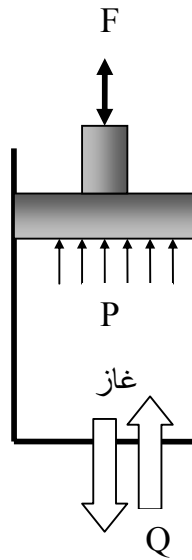
ووحدة الشغل كما نستطيع أن نستنتجها من المعادلة هي Joule (J). ونلاحظ في هذه العملية أن حجم الغاز يتغير مع درجة حرارته بشكل طردي وتتغير درجة حرارة الغاز في الأصل نتيجة انتقال حرارة Q إليه (أي تسخين الغاز) أو منه (أي تبريد الغاز) ويمكن تمثيل العملية كما في شكل (٨)



شكل ٨ : عملية تمدد أو انكماش عند ضغط ثابت

عملية ذات درجة حرارة ثابتة Isothermal Process

هنا أيضا يحدث تمدد أو انكماش للغاز ولكن يكون المكبس متصلا بعمود للإدارة ويتأثر العمود بقوة شد أو ضغط F فيتمدد الغاز أو ينضغط ولا بد في هذه الحالة من تبريد أو تسخين الغاز حتى تظل درجة حرارته ثابتة. وتمثل هذه العملية كما في شكل (٩)، كما يمكن تمثيل العملية رياضيا بالمعادلة: $P V = \text{const}$ حيث يتناسب الضغط عكسيا مع الحجم



شكل ٩ : عملية تمدد أو انكماش الغاز عند درجة حرارة ثابتة

ولحساب شغل الحدود لهذه العملية يجب التعويض عن الضغط بدلالة الحجم لإجراء التكامل:

$$P = \frac{\text{const}}{V}$$

$$W_b = \int_{V_1}^{V_2} \frac{\text{const}}{V} dV = \text{const} \int_{V_1}^{V_2} \frac{dV}{V} = \text{const} \times \ln \left(\frac{V_2}{V_1} \right) = \text{const} \times \ln \left(\frac{P_1}{P_2} \right)$$

العملية العامة Polytropic Process

في هذا النوع من عمليات التمدد أو الانكماش، يتغير الضغط والحجم ودرجة الحرارة معا و ينتقل مقدار من الحرارة من أو إلى الغاز تماما كما في العمليتين السابقتين وتمثل العملية رياضيا بالمعادلة:

$P V^n = \text{const}$ حيث n هو أس مميز للعملية وبالتعويض عن P بدلالة V من العلاقة السابقة يمكن إجراء التكامل ونجد أن

$$W_b = \text{const} \frac{V_2^{1-n} - V_1^{1-n}}{1-n} = \frac{P_2 V_2 - P_1 V_1}{1-n}$$

فإذا كانت $n=0$ لرجعنا مرة أخرى للعملية ذات الضغط الثابت وإذا كانت $n=1$ لكنت العملية ذات درجة حرارة ثابتة. ويلاحظ ظهور ثابت في المعادلتين السابقتين تعتمد قيمته على طبيعة الغاز أو المائع الشغال

العملية ذات الحجم الثابت Isochoric Process

في هذه العملية يكون $dV=0$ وبالتالي لا يوجد شغل حدود ($W_b=0$) ويكون المكبس هنا غير متحرك فتصبح حدود النظام كلها ثابتة كما في الخزانات المغلقة وتمثل العملية رياضياً بالمعادلة $V = \text{const}$ ويتناسب الضغط مع درجة الحرارة.

أنواع الموائع الشغالة:

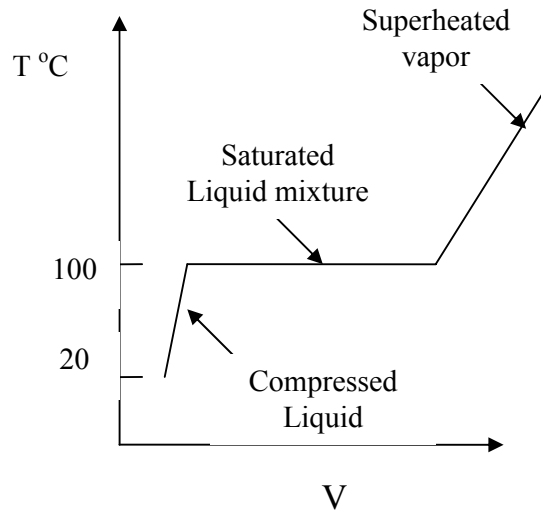
سبق أن ذكرنا أن الموائع الشغالة هي المواد التي تتكون منها الأنظمة والتي تتغير حالتها مع حدوث العملية وفي تطبيقات الديناميكا الحرارية التي تهتم التقني في مجال الإنتاج الكيميائي يتم التعامل مع الغازات على أنها مثالية السلوك أو مع الماء في أطواره المختلفة.

الغاز المثالي

هو الغاز الذي تهمل قوى التجاذب أو التنافر بين جزيئاته (راجع مبادئ الغازات في مقرر الكيمياء العامة) و يتحقق ذلك إذا كان ضغط الغاز لا يختلف كثيرا عن الضغط الجوي أو إذا كانت درجة الحرارة مرتفعة. ويربط بين ضغط الغاز وحجمه ودرجة حرارته المعادلة: $P V = n R T$ ، حيث P ضغط الغاز المطلق، V الحجم الكلي للغاز، n عدد مولات الغاز، R الثابت العام للغازات 8.314 J/mol K بوحدة SI و T هي درجة الحرارة المطلقة بالكلفين. وباستخدام معادلة الغاز المثالي يمكن الحصول على قيمة الثابت الذي يظهر في معادلة العملية ذات درجة الحرارة الثابتة أو العملية العامة ويتضح ذلك من التمارين المحلولة.

الماء وأطواره المختلفة

الماء أحد الموائع الصناعية الهامة في مجال الإنتاج الكيميائي. على سبيل المثال، تتم عمليات التبريد في المبادلات الحرارية أو المكثفات أو في المفاعلات بالماء. كذلك يمكن استخدام بخار الماء الناتج من الغلايات أو التقطير في محطات تحلية المياه في توليد القدرة الكهربائية من خلال الآلة البخارية. وفي جميع التطبيقات المذكورة يصبح من اللازم تحديد حالة الماء وخواصه. ولتتبع ما يحدث للماء من تغيرات طورية نعتبر أسطوانة بها مكبس حر الحركة ومملوءة بالماء عند درجة حرارة الغرفة (20°C) والضغط الجوي العادي 1 atm ، عند هذه الظروف يتواجد الماء في الطور السائل ويسمى السائل البارد أو المضغوط (compressed liquid) ويشير ذلك إلى قدرة الماء المحدودة على التبخر. بالتسخين يبدأ الماء السائل في التمدد ومع زيادة التسخين ترتفع درجة حرارة الماء حتى الوصول إلى 100°C حيث الماء قد أصبح في حالة تشبع (saturated liquid) أي يبدأ الماء في التحول الطوري إلى بخار ويسمى بخار الماء الناتج في هذه الحالة بخارا مشبعاً (saturated vapor) ويتواجد الماء في طورين كخليط من البخار والسائل المشبع وتظل درجة الحرارة ثابتة حتى يتحول كل الماء السائل إلى بخار مشبع ومع المزيد من التسخين ترتفع مرة أخرى درجة الحرارة ويتواجد الماء هذه المرة كطور بخاري واحد يسمى البخار المحمص (superheated vapor). ويمكن إجمال التغيرات الطورية للماء على المخطط البياني T-V كما في شكل (١٠).



شكل ١٠ : تسخين الماء عند الضغط الجوي الثابت

ويلاحظ من المخطط السابق أن الماء يمكن أن يتواجد في أحد خمس أطوار : سائل مضغوط، سائل مشبع، خليط من سائل مشبع وبخار مشبع، بخار مشبع أو بخار محمص. ولذا فمن الصعب إيجاد علاقات رياضية بين خواص الماء كالضغط ودرجة الحرارة والحجم وإنما يتم قياس بعض هذه الخواص ويحسب بعضها الآخر ثم توضع النتائج في صورة جداول يطلق عليها جداول البخار. وجداول البخار تقع في قسمين قسم يطلق عليه جدول البخار المشبع saturated steam tables يختص بتحديد خواص الماء في حالة التشبع التي تشمل تواجد الماء كسائل مشبع أو كبخار مشبع أو كخليط مشبع من السائل والبخار. وترتب جداول البخار المشبع بحيث يحتوي العمود الأول من الجدول القيم المحتملة لدرجات حرارة التشبع (الغليان) $T(^{\circ}C)$ للماء عند الضغوط المختلفة والتي تظهر في العمود الثاني من الجدول P_{sat} (kPa) إذا وفي العمود الثالث من الجدول تظهر قيم الحجم النوعي للماء كسائل مشبع وكبخار مشبع v_f, v_g (m^3/kg) ثم في العمود الثالث والرابع قيم الطاقة الداخلية النوعية والانثالبي النوعي للماء كسائل مشبع وكبخار مشبع على الترتيب u_f, u_g, h_f, h_g (kJ/kg). والقسم الثاني من جداول البخار هو جداول البخار المحمص superheated steam tables وترتب جداول بخار الماء المحمص كأعمدة لإعطاء قيم الحجم النوعي والطاقة الداخلية النوعية والانثالبي النوعي عند درجات حرارة مختلفة وعند ضغط معين.

تحديد حالة الماء الطورية

غالباً في التطبيقات ما تكون معروفة خاصية أو اثنتان من خواص الماء ويمكن لنا معرفة باقي الخواص إذا تم أولاً تحديد حالة الماء الطورية إذا كان سائلاً بارداً أو في حالة التشبع أو بخاراً محمصاً، وفي هذا السبيل يمكن مقارنة الخواص المعطاة مع الخواص المقروءة من جداول البخار المشبع واستنتاج حالة الماء الطورية كما هو متبع في الجدول ١ .

بخار محمص	بخار مشبع	خليط مشبع	سائل مشبع	سائل بارد	الخواص المعطاة
$P < P_{sat}$ at T	$P = P_{sat}$ at T	$P = P_{sat}$ at T	$P = P_{sat}$ at T	$P > P_{sat}$ at T	T, P
$T > T_{sat}$ at P	$T = T_{sat}$ at P	$T = T_{sat}$ at P	$T = T_{sat}$ at P	$T < T_{sat}$ at P	
$v > v_g$ at T or P	$v = v_g$ at T or P	$v_f < v < v_g$ at T or P	$v = v_f$ at T or P	$v < v_f$ at T or P	v, (T or P)
$u > u_g$ at T or P	$u = u_g$ at T or P	$u_f < u < u_g$ at T or P	$u = u_f$ at T or P	$u < u_f$ at T or P	u, (T or P)
$h > h_g$ at T or P	$h = h_g$ at T or P	$h_f < h < h_g$ at T or P	$h = h_f$ at T or P	$h < h_f$ at T or P	h, (T or P)

جدول ١ : استنتاج حالة الماء الطورية

الفصل الثالث

القانون الأول للديناميكا الحرارية

الأنظمة المغلقة :

إن القانون الأول للديناميكا الحرارية ما هو إلا مبدأ حفظ الطاقة وهذا المبدأ ينص بناء على المشاهدات التجريبية أن الطاقة لا تفنى ولا تستحدث من العدم ولكن تتحول من صورة إلى أخرى. وطبقا لمبدأ حفظ الطاقة فإن النظام المغلق الذي لم يحدث به أي تغير تظل طاقته الكلية ثابتة. وعندما تتغير حالة النظام نتيجة عملية ما فإن مجموع التغير في الطاقة الكلية للنظام والتغير في الطاقة الكلية للوسط المحيط لابد أن يساوي صفرا، أي أنه لا يمكن الفصل عند تطبيق القانون الأول للديناميكا الحرارية بين النظام والوسط المحيط به.

$$\Delta U = \Delta Q + \Delta W$$

والتغير في الطاقة الكلية للنظام = مجموع التغير في الطاقة الداخلية والتغير في طاقة الحركة والتغير في طاقة وضع النظام، أما التغير في الطاقة الكلية للوسط المحيط = المجموع الجبري للشغل المبذول بكافة صورته والحرارة المنقولة من أو إلى الوسط المحيط. ولكن عادة ما يتم إهمال التغير في طاقة الحركة وطاقة الوضع للأنظمة المغلقة وباعتبار القاعدة التي تحكم إشارات الشغل والحرارة المتفق عليها سابقا تكون الصورة النهائية للقانون الأول للديناميكا الحرارية مطبقا على الأنظمة المغلقة هي

$$\Delta U = Q - W$$

حيث ΔU هي التغير في الطاقة الداخلية الكلية للنظام

الانتالبي

من أهم تطبيقات القانون الأول للديناميكا الحرارية حساب التغير في الانتالبي وهي دالة الحالة التي تم تعريفها سابقا. و التغير في الانتالبي هام جدا في عمليات موازنة الحرارة وبخاصة في تحديد معدل الحرارة الذي يجب إضافته أو نزعها من مفاعل ما.

من تعريفنا للانتالبي الكلي سابقا :

$$H = U + PV$$

$$h = u + Pv$$

أو الانتالبي النوعي

بإجراء تفاضل للمعادلة الأولى

$$dH = dU + d(PV)$$

$$dH = dU + P dV + V dP$$

فإذا كان التغير نتيجة عملية ثابتة الضغط فإن $V dP = 0$ وإذا كان شغل الحدود هو نوع

$$\delta W_b \text{ حيث } dU = \delta Q - \delta W_b \text{ التفاضلية يصبح القانون الأول في صيغته التفاضلية } dU = \delta Q - \delta W_b \text{ حيث } \delta W_b = P dV$$

وتكون $dH = \delta Q$ أو أن

$$\Delta H = Q$$

وبنفس الطريقة السابقة يمكن الوصول من تعريف الانتالبي النوعي إلى أن

$$\Delta h = q$$

حيث q الحرارة النوعية (أي الحرارة بالنسبة لوحدة الكتل من النظام)

أما إذا كان التغير نتيجة عملية ثابتة الحجم فإن $P dV = 0$ ويمكن استنتاج أن

$$\Delta H = \Delta U + P \Delta V$$

$$\Delta h = \Delta u + P \Delta v \quad \text{أو}$$

وإذا كان التغير نتيجة عملية ثابتة درجة الحرارة فإن

$$\Delta H = \Delta U$$

$$\Delta h = \Delta u \quad \text{أو}$$

السعة الحرارية

تعرف السعة الحرارية للمواد على أنها الحرارة اللازمة لرفع درجة حرارة وحدة الكتل من مادة النظام بمقدار درجة واحدة وتكمن الأهمية التقنية للسعة الحرارية في كونها خاصية يمكن بها مقارنة إمكانية تخزين الحرارة بواسطة المواد المختلفة. وحسب هذا التعريف فإن هذه الحرارة المشار إليها سوف تختلف تبعاً للعملية التي تغير من حالة النظام. وفي الديناميكا الحرارية هناك نوعان من السعة الحرارية:

١. السعة الحرارية عند حجم ثابت C_v وهي مقدار الحرارة اللازمة لرفع درجة حرارة وحدة الكتل من

مادة النظام بمقدار درجة واحدة مع بقاء حجم النظام ثابتاً وفي هذه الحالة تكون $q = \Delta u$

$$C_v = du / dT \quad \text{و}$$

٢. السعة الحرارية عند ضغط ثابت: وهي مقدار الحرارة اللازمة لرفع درجة حرارة وحدة الكتل من

مادة النظام بمقدار درجة واحدة مع بقاء الضغط المؤثر على النظام ثابتاً وفي هذه الحالة تكون

$$C_p = dh / dT \quad \text{و} \quad Q = \Delta h$$

التعريف المذكورة للسعة الحرارية تنطبق في حالة الغازات، أما المواد السائلة والمواد الصلبة فهي غير قابلة للانضغاط فيظل حجمها ثابتاً عند حدوث أي عملية وبالتالي تتساوى السعة الحرارية عند ضغط ثابت وعند حجم ثابت لهذه المواد

حساب التغير في الانتالبي والطاقة الداخلية للغازات المثالية

يمكن الاستفادة من التعاريف السابقة للسعة الحرارية في حساب التغير في الطاقة الداخلية والانتالبي للغازات المثالية التي تتغير حالتها نتيجة أي عملية. فقد أوضحت التجارب العملية أن الطاقة الداخلية للغاز المثالي تكون دالة فقط في درجة الحرارة وبالتالي يكون الانتالبي والسعة الحرارية دوال فقط في درجة الحرارة.

$$\Delta u = \int_{T_1}^{T_2} C_v(T) dT$$

$$\Delta h = \int_{T_1}^{T_2} C_p(T) dT$$

يتم إجراء التكاملات السابقة بمعرفة C_p كدالة في درجة الحرارة للغازات المختلفة مع الأخذ في الاعتبار أن $C_p - C_v = R$ للغازات المثالية.

القانون الأول للديناميكا الحرارية للأنظمة المفتوحة

تعتبر الأنظمة المفتوحة ذات أهمية مباشرة للتقني في مجال الإنتاج الكيميائي حيث إن غالبية المعدات والأجهزة هي أنظمة مفتوحة تعمل بشكل مستمر، أي أن المادة تدخل إليها وتخرج منها بمعدل تدفق كتلي ثابت وكأمثلة على هذه الأنظمة: المضخات، الضواغط، الصمامات، الأبواق، غرف الخلط، الغلايات، المبادلات الحرارية والمفاعلات. وخلال العمليات السريانية المستقرة تظل الطاقة الكلية للنظام المفتوح ثابتة وبالتالي تكون الطاقة التي تدخل إلى النظام بكل صورها (مثل الحرارة المنقولة، الشغل، الانتالبي، طاقة الحركة، طاقة الوضع) لا بد أن تساوي الطاقة الخارجة من النظام وتتخذ المعادلة المعبرة عن القانون الأول للديناميكا الحرارية الصورة الآتية:

$$\dot{Q} - \dot{W} = \dot{m} \left[h_2 - h_1 + \frac{u_2^2 - u_1^2}{2} + g(z_2 - z_1) \right]$$

$$q - w = \left[h_2 - h_1 + \frac{u_2^2 - u_1^2}{2} + g(z_2 - z_1) \right]$$

\dot{Q} = معدل انتقال الحرارة من أو إلى النظام المفتوح وإشارتها كما سبق شرحه للنظام المغلق (J/s)

\dot{W} = قدرة الموتور (المحرك) كما في الضواغط والمضخات والآلة البخارية (J/s)

\dot{m} = معدل السريان الكتلي (kg/s)

$\Delta h = h_2 - h_1 = (J/kg)$ والمدخل (h_1) والمخرج (h_2) التغيير في الانتالبي الكلي بين المخرج والمدخل

$\Delta k e = \frac{u_2^2 - u_1^2}{2} = (J/kg)$ التغيير في طاقة الحركة بين المخرج والمدخل

$\Delta p e = g(z_2 - z_1) (J/kg)$ التغيير في طاقة الوضع بين المخرج والمدخل

q = الحرارة المنتقلة من أو إلى النظام المفتوح (J/kg)

w = شغل عمود الإدارة المبذول من أو على النظام المفتوح (J/kg)

الفصل الرابع

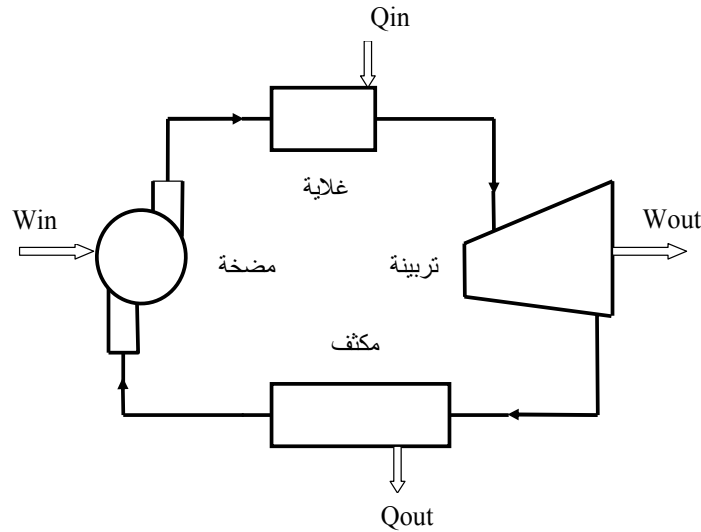
مقدمة في القانون الثاني للديناميكا الحرارية

كما رأينا فان القانون الأول للديناميكا الحرارية يتحدث عن حفظ الطاقة في الأنظمة المغلقة والمفتوحة والعمليات أو التغيرات التي تحدث بصفة عامة في هذه الأنظمة يجب أن تحقق هذا القانون. إلا أن تحقيق القانون الأول وحده لا يضمن حدوث أي عملية، ونود أن نوضح ذلك بالأمثلة التالية : اعتبر مثلاً فنجاناً من القهوة الساخنة المتروك في جو الغرفة البارد فماذا يحدث؟ نتوقع أن يبرد الفنجان بعد فترة زمنية. هذه العملية تحقق القانون الأول للديناميكا الحرارية حيث إن الحرارة المفقودة من الفنجان تساوي الحرارة المكتسبة بواسطة هواء الغرفة. وإذا اعتبرنا الآن العملية العكسية لمزيد من تسخين فنجان القهوة الساخن والموضوع في جو الغرفة البارد. هذه العملية مستحيلة الحدوث لأن ما نعرفه أن الحرارة تنتقل من الجسم الساخن إلى الجسم البارد برغم أن حدوثها يحقق القانون الأول للديناميكا الحرارية. نأخذ مثلاً آخر هو إمرار التيار الكهربائي في أسلاك المدفأة الكهربائية لتسخين هواء غرفة، نجد أن الطاقة الكهربائية المغذاة للمقاومة يجب أن تساوي الطاقة الحرارية المنقولة للهواء وهذا يتوافق مع القانون الأول للديناميكا الحرارية . ولكن مستحيل أن نحصل على تيار كهربائي بإمرار حرارة في أسلاك المدفأة برغم أن هذا يحقق القانون الأول للديناميكا الحرارية. ويدل المثالان المذكوران على أن جميع العمليات الحقيقية تحدث في اتجاه واحد فقط كما أن هذه العمليات تكون مصحوبة دائماً بهدر في الطاقة (تذكر سريان الموائع الذي يصاحبه دائماً قدر من الاحتكاك) وتشكل هذه المبادئ القانون الثاني للديناميكا الحرارية ويلزم لحدوث أي عملية حقيقية تحقق القانونين الأول والثاني للديناميكا الحرارية. وحسب القانون الثاني للديناميكا الحرارية فإنه يمكن تحويل كل الشغل إلى حرارة ولكن لا يمكن تحويل كل الحرارة إلى شغل نافع و يتحول فقط جزء من الحرارة إلى شغل ويهدر الباقي كما في حالة دورة توليد القدرة من البخار. بالتالي يمكن حساب كفاءة تحويل الحرارة إلى شغل لهذه الدورة.

دورة توليد القدرة من البخار

تتكون هذه الدورة من أربع وحدات كما هو موضح في شكل (١١) . يتم حرق الوقود والاستفادة من الحرارة الناتجة في إنتاج بخار ماء من الغلاية. ثم يدخل بخار الماء إلى التربينه حيث يتمدد مسبباً تولد

شغل بعمود الإدارة المتصل بالآلة ويمكن الاستفادة من فكرة هذه الدورة في توليد القدرة الكهربائية من محطات تحلية المياه بالطرق الحرارية حيث ينتج بخار ماء يستخدم بعض منه في هذه الدورة.



شكل ١١ : دورة توليد القدرة من البخار

كما يلاحظ فان عمل هذه الدورة يستلزم انتقال مقدار من الحرارة Q_{in} إلى الغلاية وهدر جزء منها في المكثف Q_{out} لكي تتم الدورة. وتعمل الدورة ككل كنظام مغلق بينما يعمل كل عنصر من عناصر الدورة كنظام مفتوح. ويمكن تعريف الكفاءة الحرارية للدورة (η) أنها الجزء من الحرارة الداخلة المتحول إلى شغل خارج صافي

$$\eta = \frac{\text{net work output}}{\text{total heat input}}$$

وطبقا للقانون الأول فان $\Delta U = 0$ ويكون $\text{net work output} = Q_{in} - Q_{out}$ وبالتالي

$$\eta = 1 - \frac{Q_{out}}{Q_{in}}$$

تمارين متنوعة (٣)

إرشادات لحل التمارين:

- حدد أولا نوع النظام في التمرين (مغلق أم مفتوح)
- إذا كان النظام مغلق فحدد إذا كان ذو حدود ثابتة أم متحركة
- إذا كان النظام مغلق ذو حدود ثابتة فان شغل الحدود المتحركة = صفر
- إذا كان النظام مفتوح فإنه لا يوجد شغل الحدود المتحركة وإنما شغل عمود الإدارة فقط
- حدد نوع المائع الشغال إذا كان غاز مثالي (يلزم استخدام معادلة الغاز المثالي) أما إذا كان ماء (يلزم استخدام جداول البخار) وقد تعطى حالة الماء مباشرة أو يتعين تحديد حالة الماء أولا قبل الشروع في حل

التمرين

- حدد الحالة الابتدائية والنهائية للنظام المغلق
- حدد نوع العملية للنظام المغلق
- حدد حالة المدخل والمخرج للنظام المفتوح
- احسب المطلوبات باستخدام المعادلات المدروسة مراعيًا إشارات الشغل والحرارة

تمرين (١)

ينضغط النيتروجين في أسطوانة بها مكبس حسب العلاقة $PV^{1.4} = \text{const}$ ، فإذا كانت كتلة النيتروجين ٢kg وكان ضغط النيتروجين في البداية ١٠٠kPa ودرجة حرارته ٣٠٠K وبعد الانضغاط أصبحت درجة الحرارة ٧٠٠K ، باعتبار النيتروجين غازا مثاليا

احسب:

١. الشغل المبذول أثناء العملية
٢. التغير في الطاقة الداخلية للنيتروجين إذا علمت أن C_v للنيتروجين هي ٢٠,٨٠٤ kJ/ kmol K
٣. الحرارة المنقولة

الحل :

المعطيات:

- النظام مغلق ذو حدود متحركة : أسطوانة ومكبس
- يوجد شغل حدود والعملية المسببة له عملية عامة $n = 1,4$ (n لا تساوي ١ ولا تساوي صفر)

$$W_b = \frac{P_2 V_2 - P_1 V_1}{1 - n} = \frac{m R (T_2 - T_1)}{1 - n} \quad ١$$

m عدد مولات النيتروجين : كتلة النيتروجين / الكتلة الجزيئية للنيتروجين = $2/28 = 0,0714 \text{ k mol}$

$$R = 8,314 \text{ kJ/mol K}, T_2 = 700 \text{ K}, T_1 = 300 \text{ K}$$

بالتعويض ينتج أن $W_b = 593,62 \text{ J}$ ونلاحظ أن إشارة الشغل سالبة نظرا لأن النيتروجين ينضغط فالشغل مبدول عليه من المكبس

٢. للغاز المثالي يحسب التغير في الطاقة الداخلية للنيتروجين ΔU ، باستخدام المعادلة

$$\Delta U = \int_{T_1}^{T_2} C_v dT$$

$$\Delta U = C_v (T_2 - T_1)$$

بالتعويض عن $C_v = 20,804 \text{ kJ/mol K}$

$$\Delta U = 20,804 (700 - 300) = 8321,6 \text{ kJ/kmol} \times 0,0714 \text{ kmol} = 594,16 \text{ KJ}$$

٣. تحسب الحرارة المنقولة باستخدام القانون الأول للديناميكا الحرارية

$$\Delta U = Q - W, \quad Q = \Delta U + W = 594,16 - 593,62 = 0,54 \text{ kJ}$$

تمرين (٢)

تحتوي أسطوانة ومكبس على ٨ kg من بخار الماء المحمص عند ٥٠٠ kPa و ٣٠٠ °C، فإذا تم تبريد الأسطوانة عند ضغط ثابت حتى يتكثف ٧٠٪ من كتلة البخار.

احسب

١. الشغل المبذول خلال هذه العملية

٢. التغير في الطاقة الداخلية

٣. التغير في الانتالبي

٤. الحرارة المنقولة

الحل:

المعطيات:

- نظام مغلق ذو حدود متحركة كالمثال السابق
- المائع هو الماء
- الحالة الابتدائية : بخار ماء محمص
- الحالة النهائية : خليط مشبع من بخار الماء والماء السائل المشبع (لأنه حدث تكثف للبخار المحمص بنسبة ٧٠٪ وفي هذه الحالة يتواجد البخار المشبع مع الماء السائل نتيجة التكثيف)
- عملية التكثيف تتم عند ضغط ثابت

١. العملية تتم عند ضغط ثابت

$$W_b = P (V_r - V_1)$$

يجب أولاً الحصول على قيمة V_1 من جداول البخار المحمص وقيمة V_r من جداول البخار المشبع كالاتي:

الحجم النوعي مباشرة v_1 عند ٥٠٠ kPa و ٣٠٠ °C يساوي ٠,٥٢٢٦ m^٣/kg وبالتالي

$$V_1 = ٠,٥٢٢٦ \text{ m}^٣/\text{kg} \times ٨ \text{ kg} = ٤,١٨ \text{ m}^٣$$

ثم تحسب V_r بتطبيق العلاقة:

$$V_r = (1-X) V_f + X V_g$$

حيث أن حالة التشبع تحدد بخاصية واحدة فقط فيمكن إيجاد قيمة V_f و V_g عند الضغط المعطى (لأن

الضغط ثابت) من جداول البخار المشبع. أما X فتسمى النوعية وهي النسبة بين كتلة البخار في الخليط

إلى كتلة الخليط ككل

عند $P = 0,4758$ ($\sim 0,5$ MPa) ، $v_f = 0,001091$ m³/kg و $v_g = 0,3928$ m³/kg و $x = 0,3$

وبالتعويض ينتج أن : $v_r = 0,12$ m³/kg

$$V_r = 0,12 \times 8 = 0,96 \text{ m}^3$$

$$\therefore W_b = 500 \text{ kPa} \times (0,96 - 4,18) = \square 1610 \text{ kJ}$$

ويلاحظ أن إشارة الشغل سالبة لأنه قد تم تبريد الأسطوانة فانضغط بخار الماء

$$2. \Delta U = U_r - U_1 \text{ التغيير في الطاقة الداخلية}$$

بنفس طريقة حساب الحجم V_1 يمكن حساب U_1 من جداول البخار المحمص

$$U_1 = 2802,9 \times 8 = 22423,2 \text{ kJ}$$

وأيضاً بنفس طريقة حساب الحجم V_r يمكن حساب U_r من جداول البخار المشبع

$$u_r = (1-x) u_f + x u_g = 0,7 \times 631,68 + 0,3 \times 2059,05 = 1216,3 \text{ kJ/kg}$$

$$U_r = 1216,3 \times 8 = 9730,7 \text{ kJ}$$

$$\Delta U = 9730,7 - 22423,2 = \square 12692 \text{ kJ}$$

يترك حساب التغيير في الانثالي والحرارة المنقولة كتمرين للطلاب

تمرين (٣)

يدخل الماء إلى ترينة بمعدل 25000 kg/hr عند 8 MPa و 450°C ويخرج عند 30 kPa كبخار مشبع ،

فإذا كانت القدرة المنتجة من الترينة 4 MW ، عين الحرارة المفقودة من البخار بإهمال التغيير في طاقة

الوضع و طاقة الحركة

الحل:

المعطيات:

نظام مفتوح ، و التغيير في طاقة الوضع وطاقة الحركة ومهمل ، إذاً تطبق المعادلة

$$\dot{Q} - \dot{W} = \dot{m} (h_2 - h_1)$$

يتم تحديد h_1 و h_2 من جداول البخار ولكن حالة الماء نفسها عند المدخل (الحالة ١) غير معروفة

ولابد من تحديد حالة الماء أولاً إذا كان الماء مشبعاً أم بخاراً محمصاً باستخدام الجدول المشروح سابقاً في

الجزء النظري. عند الضغط المعطى 8 MPa نجد أن درجة حرارة التشبع المناظرة لهذا الضغط هي

295°C (من جداول البخار المشبع) وهي أقل من درجة الحرارة المعطاة وبذلك تكون حالة الماء الابتدائية

بخار محمص.

من جداول البخار المحمص عند ظروف المدخل ($P=8$ MPa, 450°C) $h_1 = 3272,0$ kJ/kg

ومن جداول البخار المشبع عند ظروف المخرج ($P = 30 \text{ kPa}$) $h_v = h_g = 2626.8 \text{ kJ/kg}$ و قدرة التبريد \dot{W} 4 MW و معدل السريان الكتلي \dot{m} 25000 kg/hr وبالتعويض في المعادلة مع مراعاة ضبط الوحدات وكذلك أن إشارة قدرة التبريد موجبة نجد أن

$$\dot{Q} = \dot{W} + \dot{m} (h_2 - h_1)$$

$$\dot{Q} = 4 \times 10^3 + \frac{25000}{360} (2626.8 - 3272) = -40805 \text{ kW}$$

ويلاحظ هنا أن إشارة معدل الحرارة المنقولة سالبة مما يدل على أنها مفقودة من البخار

امتحان ذاتي (٣)

اختر الإجابة الصحيحة

١. السعة الحرارية عند ضغط ثابت
 - دالة مسار
 - دالة حالة
 - تقل مع ارتفاع درجة الحرارة
٢. الانثالبي للغاز المثالي
 - يتأثر بدرجة الحرارة فقط
 - يتأثر بدرجة الحرارة والضغط
 - يتأثر بدرجة الحرارة أو الضغط
٣. المضخة
 - هي نظام مفتوح ذو حدود متحركة
 - هي نظام مغلق ذو حدود متحركة
 - هي نظام مفتوح
٤. يتواجد الماء عند الضغط الجوي $101,3 \text{ kPa}$ ودرجة حرارة 120°C
 - كبخار محمص
 - كبخار مشبع
 - خليط من سائل وبخار
٥. شغل الحدود
 - يكون سالبا في حالة تغير حجم النظام
 - يكون موجبا في حالة نقصان حجم النظام
 - يكون موجبا في حالة زيادة حجم النظام

إجابة امتحان ذاتي (٣)

اختر الإجابة الصحيحة

١. السعة الحرارية عند ضغط ثابت
 - دالة مسار
 - دالة حالة
 - تقل مع ارتفاع درجة الحرارة
٢. الانثاليبي للغاز المثالي
 - يتأثر بدرجة الحرارة فقط
 - يتأثر بدرجة الحرارة والضغط
 - يتأثر بدرجة الحرارة أو الضغط
٣. المضخة
 - هي نظام مفتوح ذو حدود متحركة
 - هي نظام مغلق ذو حدود متحركة
 - هي نظام مفتوح
٤. يتواجد الماء عند الضغط الجوي $101,3 \text{ kPa}$ ودرجة حرارة 120°C
 - كبخار محمص
 - كبخار مشبع
 - خليط من سائل وبخار
٥. شغل الحدود
 - يكون سالبا في حالة تغير حجم النظام
 - يكون موجبا في حالة نقصان حجم النظام
 - يكون موجبا في حالة زيادة حجم النظام



أساسيات الحرارية والموائع

انتقال الحرارة

الجدارة: إجراء الحسابات الخاصة بانتقال الحرارة في المفاعلات والمبادلات الحرارية

الأهداف :

عند الانتهاء من هذه الوحدة تكون قادراً على

- تحديد طريقة انتقال الحرارة في جهاز صناعي
- تحديد تأثير التغير في سمك المواد ونوعها على معدل انتقال الحرارة بالتوصيل حسابياً
- تحديد تأثير سرعة المائع وخواصه الفيزيائية على معدل انتقال الحرارة بالحمل من الأنابيب حسابياً
- تحديد أداء المبادلات الحرارية حسابياً

الوقت المتوقع للتدريب:

١٥ ساعة اتصال

الوسائل المساعدة:

استخدام المخططات البيانية

متطلبات الجدارة:

❖ اجتياز مقرر أسس الهندسة الكيميائية

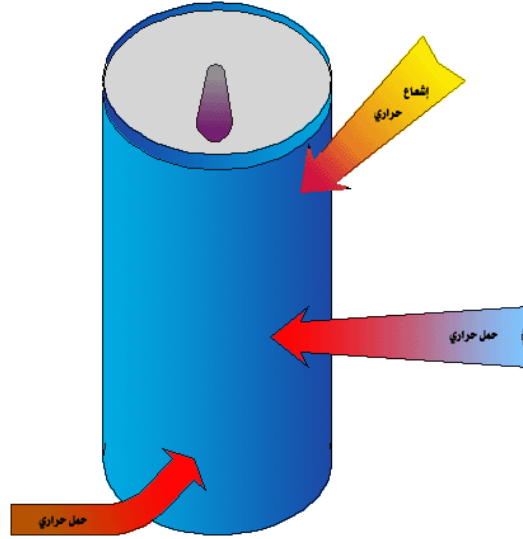
مقدمة : الحرارة

تعرف الحرارة Heat بأنها ذلك الشكل من أشكال الطاقة Energy الذي ينتقل بين الأجسام ذات درجات الحرارة Temperature المختلفة . وتأخذ الطاقة أشكالاً عدة ، كالحركة ، و الطاقة الحركية المتواجدة بسبب حركة المادة ، و الطاقة الكامنة في المادة عند وجودها في مجال جاذبية ، و الكهرباء ، و الطاقة الداخلية المختزنة في ذرات المادة (التمثلة في الحركات المختلفة للجزيء و الذرة و أجزاء الذرة) ، و الطاقة الكيميائية (التمثلة في الروابط بين الذرات في الجزيء) ، و الطاقة الذرية (التمثلة في الروابط بين الأجزاء الداخلية في نواة الذرة) ، و الطاقة الشمسية ، و طاقة الرياح ، و طاقة تدفق السوائل (الطاقة الهيدروديناميكية) ، و الطاقة المغناطيسية ، و غيرها .

و الطاقة بمختلف أشكالها إما أن تكون مختزنة في المادة ، أو منتقلة منها أو إليها . فالطاقة تختزن في المادة على شكل طاقة داخلية أو حركية أو كامنة أو كهربائية أو مغناطيسية أو كيميائية أو ذرية ، و مجموع هذه الطاقات يسمى الطاقة الكلية للمادة . ينتقل جزء من هذه الطاقة الكلية المختزنة في المادة إلى خارجها (أو العكس من الطاقات خارج المادة إلى داخلها) عند وجود دافع لأحد أشكالها المختزنة للانتقال . فالطاقة الداخلية مثلاً تنتقل كحرارة إلى خارج المادة عندما تكون درجة حرارة المادة أعلى من درجة حرارة الأجسام المحيطة . و كذلك الشغل الميكانيكي فهو طاقةً داخليةً تنتقل بسبب الفرق في القوى أو الضغوط المجانبية للأجزاء الميكانيكية المتحركة . بالمثل ؛ فإن الطاقة الهيدروديناميكية تنتقل عند وجود فرق في ضغط السوائل ، و الطاقة الكهربائية تنتقل بسبب الفرق في الجهد الكهربائي ، و هكذا .

يرجعنا هذا إلى التعريف الأول و هو أن الحرارة هي طاقة منتقلة بسبب وجود فرق في درجات الحرارة . هذا الانتقال للحرارة Heat Transfer يتم بثلاث طرق مختلفة (الشكل ١) ، و هي انتقال الحرارة بواسطة التوصيل (التوصيل الحراري Heat Conduction) و انتقال الحرارة بواسطة الحمل (الحمل الحراري Heat Convection) و انتقال الحرارة بواسطة الإشعاع (الإشعاع الحراري Heat Radiation) . التوصيل الحراري Heat Conduction هو انتقال الطاقة الحرارية بين الأجسام الصلبة المتلاصقة ، أو بين جسمٍ صلبٍ و بين مائعٍ (سائلٍ أو غازٍ) ثابتٍ ملاصقٍ له . أما الحمل الحراري Heat Convection فهو انتقال الحرارة بين جسمٍ ثابتٍ و بين مائعٍ متحركٍ يلامسه . و الإشعاع Heat Radiation هو انتقال الحرارة بين جسمين - درجتا حرارتهما مختلفة - على شكل إشعاع حراري (مثل انتقال

الحرارة بين الشمس و الأرض بشكل أشعة شمسية حرارية ضوئية مرئية و غير مرئية) . في ما يلي من هذه الوحدة سنتناول كل طريقة من طرق انتقال الحرارة بالتفصيل .

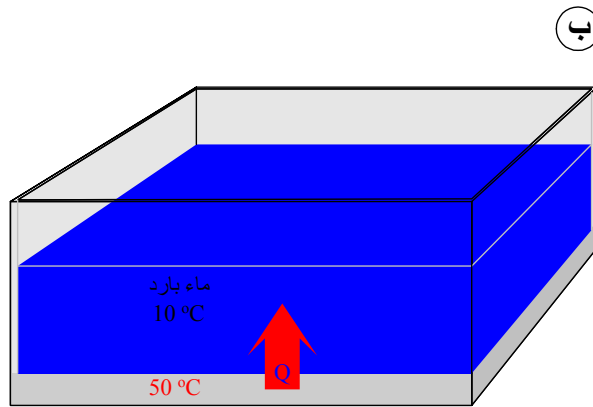
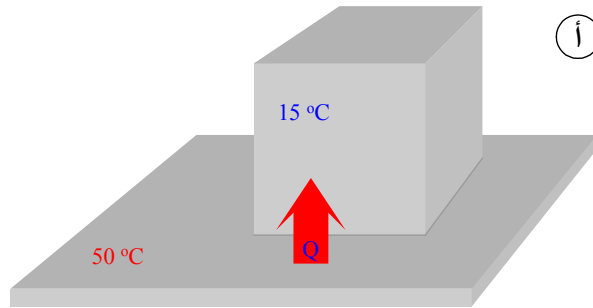


الشكل ١ : أمثلة طرق انتقال الحرارة المختلفة ، علبة مشروبات باردة تنتقل إليها الحرارة بالطرق الثلاث

الفصل الأول

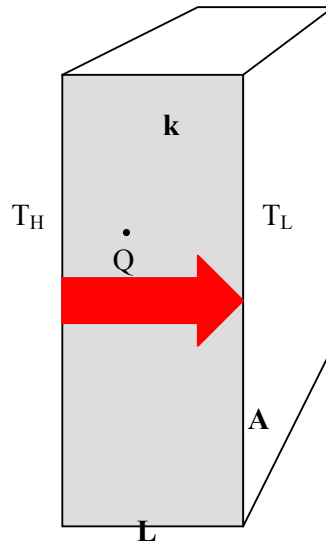
التوصيل الحراري

إذا تلامس جسمان صلبان درجتا حرارتهما مختلفتان (الشكل ٢أ) فإن جزءاً من الطاقة الداخلية للجسم الحار لا بد أن يسري كطاقة حرارية عبر نقاط التلامس إلى الجسم البارد لتخزن هذه الحرارة فيه زائداً بذلك طاقته الداخلية . انتقال الحرارة بسبب هذا الاتصال هو ما يسمى بالتوصيل الحراري . مع نقص الطاقة الداخلية للجسم الحار تنقص درجة حرارته و مع زيادة الطاقة الداخلية للجسم البارد تزيد درجة حرارته . يستمر انسياب الطاقة من الجسم الحار إلى الجسم البارد حتى تتساوى درجتا حرارتهما فيتوقف التدفق الحراري بسبب فقدان الدافع .



الشكل ٢ : أ - التوصيل الحراري بين جسمين صلبين ، ب - التوصيل الحراري بين جسم صلب و مائع ثابت

التوصيل الحراري وارد مع الأجسام غير الصلبة أيضاً ، ففي الشكل ٢ ب تنتقل الحرارة من الجسم الصلب الحار إلى السائل البارد الملاصق له بواسطة التوصيل ما دام السائل ثابتاً فوقه بغير حراك (عند ملامسة سائلٍ متدفق للجسم الصلب فإن الحرارة ستنتقل بينهما بواسطة الحمل الحراري) . أما في الشكل ٣ فإن التوصيل الحراري مطبقٌ على انتقال الحرارة بين سطحين مختلفين للوحٍ صلب درجتا حرارتهما مختلفة . يرمز لدرجة حرارة السطح الحار بالرمز T_H ، و أما درجة حرارة السطح البارد فرمزها T_L . تنتقل الحرارة - ورمزها \dot{Q} - بالتوصيل الحراري بين السطحين بسبب الفرق بين T_L و T_H عبر المادة الصلبة للوح . المسافة التي تقطعها الحرارة بين السطحين يرمز لها بالحرف L ، و المساحة التي تمر عبرها هذه الحرارة (مساحة المقطع الطولي للوح) هي المساحة العمودية على اتجاه انتقال الحرارة ورمزها A . أما الرمز k في الشكل فهو يرمز لقدرة المادة على توصيل الحرارة (هل فكرت يوماً لماذا تصنع أكواب القهوة من الخزف و ليس من الحديد ؟) و تسمى بالموصلية الحرارية و هي خاصية للمادة تبعاً لتركيبها الكيميائي و ترتيبها الجزيئي .



الشكل ٣ : التوصيل الحراري بين سطحي لوحٍ صلب

أظهرت الدراسات و التجارب التي أجراها العالم الفرنسي فورييه أن الحرارة المنتقلة بالتوصيل بين السطحين تزيد كلما زاد الفرق بين درجتا حرارة السطحين ΔT (الرمز Δ يعني الفرق ، حيث $\Delta T = T_H - T_L$) . كما أنها تزيد كلما كبرت مساحة الانتقال A . و لا شك أن الحرارة المنتقلة ستكون

أكبر كلما كانت الموصلية الحرارية k للمادة أكبر. ولكن كلما كانت المسافة التي تقطعها الحرارة بين السطحين أطول فإن الحرارة المنتقلة ستكون أقل. تجتمع هذه المؤثرات المختلفة في ما يسمى بقانون فورييه لحساب معدل انتقال الحرارة بالتوصيل

$$(1) \quad \dot{Q} = \frac{k A}{L} \Delta T$$

وحدة الحرارة Q هي نفس وحدة الطاقة (لماذا؟) وهي الجول Joule ورمزها J . أما معدل انتقال الحرارة \dot{Q} المحسوبة في المعادلة فهي تعبر عن كمية الحرارة المنتقلة بطريقة التوصيل الحراري خلال ثانية واحدة، و عليه فوحدتها هي وحدة الحرارة لكل ثانية أي جول في الثانية $\frac{J}{s}$. المعادلة ليست سوى تعبير رياضي لما يحصل أثناء انتقال الحرارة بالتوصيل، فما ترمز إليه المعادلة هو أن الطاقة تنتقل بالتوصيل الحراري \dot{Q} إذا وجد الدافع ΔT لهذه الطاقة للانتقال مع الأخذ في الاعتبار جميع المؤثرات في هذا الانتقال $\frac{k A}{L}$. و عليه فإن معدل انتقال الحرارة يساوي الدافع في المؤثرات، وهذا السياق لحساب انتقال الحرارة هو نفسه الذي سيطبق لحساب انتقال الحرارة بالطرق الأخرى مع اختلاف المؤثرات. مجموعة المؤثرات $(\frac{k A}{L})$ تسمى أيضاً قدرة التوصيل ووحدتها $\frac{W}{C}$ حيث تمثل مقدار الحرارة التي يمكن للمادة توصيلها بسبب كل درجة حرارة من الفرق بين السطح الحار و البارد. بخلاف الموصلية الحرارية k ، قدرة التوصيل ليست خاصية للمادة بل إنها تتغير بتغير شكل المادة الناقلة و موصليتها.

مثال ١: احسب معدل انتقال الحرارة بين جنبي لوح حديدي (الشكل ٤) سماكته 2 cm و طوله 1 m و ارتفاعه $0,5 \text{ m}$ إذا كانت درجة حرارة أحد السطحين 10°C و الجنب الآخر 40°C (موصلية الحديد النقي: $k = 80 \frac{W}{m^\circ \text{C}}$).

الحل: الحرارة تنتقل بين سطحي اللوح الحديدي بسبب الفرق في درجتي الحرارة بينهما

$$\begin{aligned} \Delta T &= T_H - T_L \\ &= 40^\circ \text{C} - 10^\circ \text{C} \\ &= (40 - 10)^\circ \text{C} \\ &= 30^\circ \text{C} \end{aligned}$$

و تسري الحرارة بين السطحين خلال مادة الحديد الصلبة - فطريقة الانتقال إذاً هي التوصيل الحراري - قاطعةً مسافة قدرها

$$L = 2 \text{ cm} = \frac{2 \text{ cm}}{100 \frac{\text{cm}}{\text{m}}} = 0.02 \text{ m}$$

أما المساحة التي تنتقل عبرها هذه الحرارة فهي المساحة العمودية على اتجاه الانتقال وهي مساحة مقطع اللوح العمودية

$$\begin{aligned} A &= \text{الارتفاع} \times \text{الطول} \\ &= 1 \text{ m} \times 0.5 \text{ m} \\ &= 0.5 \text{ m}^2 \end{aligned}$$

و عليه فإن معدل انتقال الحرارة بين السطحين يحسب من معادلة فورييه لحساب معدل انتقال الحرارة بالتوصيل الحراري (المعادلة ١)

$$\dot{Q} = \frac{k A}{L} \Delta T$$

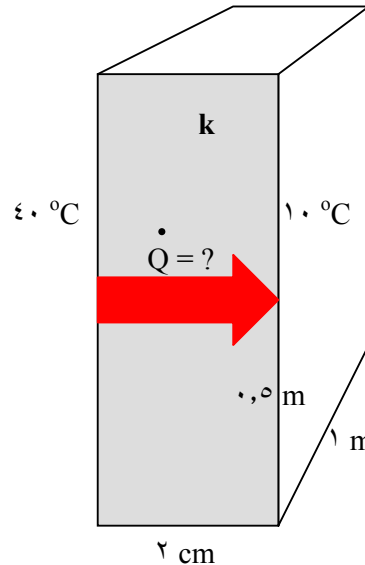
$$= \frac{80 \frac{\text{W}}{\text{m}^\circ\text{C}} \times 0.5 \text{ m}^2}{0.02 \text{ m}} \times 30^\circ\text{C}$$

$$= 60000 \text{ W}$$

$$= 60 \text{ KW}$$

$$= 0.06 \text{ MW}$$

$$= 0.06 \frac{\text{MJ}}{\text{s}}$$



الشكل ٤

عند رغبة حساب الكمية الكلية من الحرارة (رمزها Q و وحدتها الجول J) المنتقلة خلال فترة زمنية معينة (رمز الزمن time هو t و وحدته هي الثانية s) فإن معدل انتقال الحرارة يضرب في عدد الثواني خلال هذه الفترة الزمنية

$$(٢) \quad Q = \dot{Q} t$$

مثال ٢: احسب كمية انتقال الحرارة المنتقلة في اللوح الحديدي في المثال السابق إذا استمر الانتقال لمدة ساعتين .

الحل: الفترة الزمنية التي تم خلالها الانتقال الحراري هي ساعتان و هي بالثواني كالآتي

$$t = 2 \text{ hr} = 2 \text{ hr} \times 60 \frac{\text{min}}{\text{hr}} \times 60 \frac{\text{s}}{\text{min}} = 7200 \text{ s}$$

حيث hr ترمز للساعة و min ترمز للدقيقة . و حيث إن معدل انتقال الحرارة لكل ثانية محسوب من المثال السابق هو 60000 J/s فيمكن حساب كمية انتقال الحرارة خلال هذه الفترة كالتالي

$$\begin{aligned} Q &= \dot{Q} t \\ &= 60000 \frac{\text{J}}{\text{s}} \times 7200 \text{ s} \\ &= 432000000 \text{ J} \\ &= 432 \text{ MJ} \end{aligned}$$

من المناسب أحياناً حساب معدل انتقال الحرارة المتدفقة من خلال كل متر مربع من مساحة التوصيل . يكون ذلك مفيداً عند رغبة المقارنة بين مواد توصيل مختلفة دون النظر لمساحة المقطع ، وكذلك عندما تكون مساحة المقطع غير معروفة أو غير معطاة في المسألة . يسمى معدل انتقال الحرارة من خلال كل متر مربع من مساحة التوصيل بـ "معدل انتقال الحرارة من وحدة المساحة" و كذلك بـ

$$\text{"التدفق الحراري Heat Flux"} \text{ و يرمز له بالرمز } \dot{q} \text{ و وحدته } \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$$

$$\begin{aligned} \dot{q} &= \frac{\dot{Q}}{A} \\ &= \frac{k A \Delta T}{L} \\ &= \frac{k}{L} \Delta T \end{aligned}$$

(٣)

مثال ٣: احسب التدفق الحراري heat flux خلال اللوح الحديدي في المثال ١ .

الحل : التدفق الحراري هو معدل انتقال الحرارة عبر كل متر مربع

$$\begin{aligned} \dot{q} &= \frac{k}{L} \Delta T \\ &= \frac{80 \frac{W}{m \cdot ^\circ C}}{0.02 m} \times 30 \text{ } ^\circ C \\ &= 120000 \frac{W}{m^2} \end{aligned}$$

ومن الممكن الوصول لنفس النتيجة بقسمة معدل انتقال الحرارة المحسوب في المثال ١ على

المساحة الكلية للوح

$$\begin{aligned} \dot{q} &= \frac{\dot{Q}}{A} \\ &= \frac{60000 W}{0.5 m^2} \\ &= 120000 \frac{W}{m^2} \end{aligned}$$

قدرة التوصيل ومقاومة التوصيل :

المجموعة $\frac{k A}{L}$ في المعادلة ١ تمثل مجموعة المؤثرات في التوصيل الحراري وهي تجمع بين تأثير الموصلية الحرارية k (وهي خاصية للمادة تبعاً لتركيبها الكيميائي و ترتيبها الجزيئي) و بين تأثير مساحة التوصيل A و بين تأثير مسافة التوصيل L ، و عليه تسمى هذه المجموعة بقدرة المادة على التوصيل الحراري أو قدرة التوصيل اختصاراً . قدرة التوصيل الحراري ليست خاصية للمادة مثل الموصلية الحرارية

، ولكنها مواصفة خاصة لنظام توصيل حراري محدد تبعاً لموصليته و لمساحته و لمسافة التوصيل . و عليه فهي متغيرة تبعاً لتغير الكميات المؤثرة في التوصيل الحراري ، فهي تزيد بزيادة الموصلية الحرارية و بزيادة مساحة التوصيل و تقل كلما كانت مسافة التوصيل أطول .

مثال ٤: أي القطع التالية أكثر موصلية و أيها أكثر توصيلاً حرارياً :

أ - قطعة فضة ($k = 420 \frac{W}{m^{\circ}C}$) مساحة مقطعها 100 cm^2 و سمكها 10 cm

ب - قطعة حديد ($k = 80 \frac{W}{m^{\circ}C}$) مساحة مقطعها 1 m^2 و سمكها 5 cm

ج - جدار طوب حراري ($k = 0.5 \frac{W}{m^{\circ}C}$) مساحة مقطعه 10 m^2 و سمكها 5 cm

الحل: لا شك أن الفضة لها خاصية توصيل (موصلية k) أكبر من الحديد و الطوب ، و يأتي الحديد في المرتبة الثانية

$$k_{\text{طوب}} > k_{\text{حديد}} > k_{\text{فضة}}$$

و لكن قدرة التوصيل - من جهة أخرى - يدخل فيها مساحة التوصيل A و مسافته L مع

خاصية التوصيل k

$$\frac{kA}{L}$$

و عليه فإن قدرة قطعة الفضة الموصوفة في السؤال على التوصيل الحراري = $0.42 \frac{W}{^{\circ}C}$

أما قطعة الحديد فقدرتها على التوصيل الحراري = $4 \frac{W}{^{\circ}C}$

و قدرة جدار الطوب على التوصيل الحراري = $4.95 \frac{W}{^{\circ}C}$

كما ورد في المثال السابق ليست بالضرورة كل مادة ذات موصلية حرارية k كبيرة ستكون موصلاً حرارياً جيداً ، بل يجب أن تؤخذ مساحة التوصيل و مسافة الانتقال بالحسبان . فالفضة و هي أفضل موصل حراري كانت ذات قدرة توصيل أقل من الطوب - و هو عازل حراري - لأن أبعادها لا تسمح بانتقال الحرارة بقدر أكبر .

لاحظ في المثال ٤ أن مقلوب قدرة التوصيل الحراري سيكون أكبر في حالة قطعة الفضة

$$2.38 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{W}} = \text{مقلوب قدرة التوصيل الحراري لقطعة الفضة الموصوفة في المثال ٤}$$

$$0.25 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{W}} = \text{أما قطعة الحديد فمقلوب قدرتها على التوصيل الحراري}$$

$$0.2 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{W}} = \text{و مقلوب قدرة جدار الطوب على التوصيل الحراري}$$

هذا المقلوب لقدرة التوصيل يسمى المقاومة الحرارية و هو تعبير مفضل عند دراسة أو عرض مواد العزل الحراري التي تتميز بأكبر مقاومتها لانتقال الحرارة (أي صغر قدرتها على التوصيل) . يرمز للمقاومة الحرارية بالرمز R و يعرض القانون ٢ بوجود المقاومة كالتالي

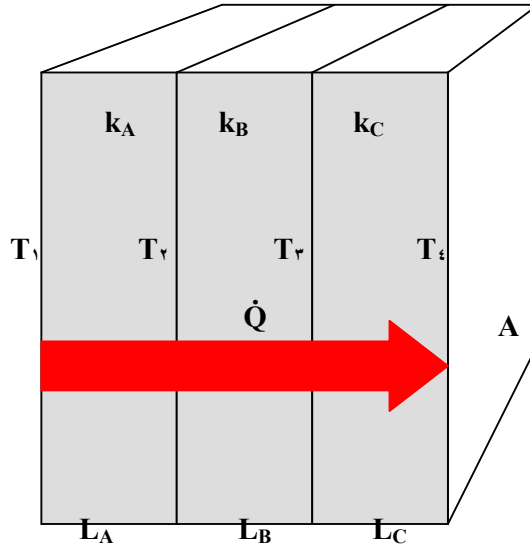
$$(٤) \quad \dot{Q} = \frac{\Delta T}{R}$$

حيث أن R هي المقاومة الحرارية و هي مقلوب قدرة التوصيل $(\frac{kA}{L})$

$$(٥) \quad R = \frac{1}{\frac{kA}{L}} = \frac{L}{kA}$$

انتقال الحرارة عبر المواد المجمعّة :

عادة ما يكون الوسط الصلب الناقل مكوّن من أكثر من طبقة كل منها مصنوع من مادة مختلفة . على سبيل المثال ، تنتقل الحرارة بالتوصيل خلال الجدار الموضح في الشكل ٥ عبر ثلاثة من الأسطح المتلاصقة ذات المواد المختلفة . المادة المكونة من عدة طبقات جزئية مكونة من مواد مختلفة تسمى مادة مجمّعة composite material حيث تأثر الخواص الحرارية و الأبعاد لكل طبقة في المقاومة الكلية للمادة مجمّعة .



الشكل ٥ : انتقال الحرارة بالتوصيل خلال مادة مجمعة على التوالي

كما هو موضح في الشكل ٥ فإن فرق درجات الحرارة بين سطحي كل طبقة هو الدافع لانتقال الحرارة بالتوصيل عبر هذه الطبقة . كما أن فرق درجات الحرارة بين السطحين الخارجيين هو الدافع لانتقال الحرارة عبر المادة مجمعة ككل . بما أن الحرارة المنتقلة عبر الطبقات هي واحدة فيمكن حسابها من القانون ٤ باعتبار مواصفات كل طبقة

$$\dot{Q} = \frac{\Delta T}{R} = \frac{T_H - T_1}{R_1} = \frac{T_1 - T_2}{R_2} = \frac{T_2 - T_L}{R_3}$$

حيث أن مقاومة كل طبقة هي

$$R_1 = \frac{L_1}{k_1 A_1} , R_2 = \frac{L_2}{k_2 A_2} , R_3 = \frac{L_3}{k_3 A_3}$$

مع العلم أنه للمثال في الشكل ٥ فإن مساحة الانتقال متساوية بين الطبقات $A_1 = A_2 = A_3$ حيث إن التجميع على التوالي .

يمكن أيضاً حساب الحرارة المنتقلة عبر الجدار المجمع و الوصول لنفس النتيجة السابقة باعتبار فرق درجات الحرارة بين السطحين الخارجيين للمادة المجمعّة (حيث أنه هو السبب الحقيقي لاختلاف درجات الحرارة بين الطبقات و تدفق الحرارة عبرها) ، و ذلك باعتبار المقاومة الكلية للمادة المجمعّة

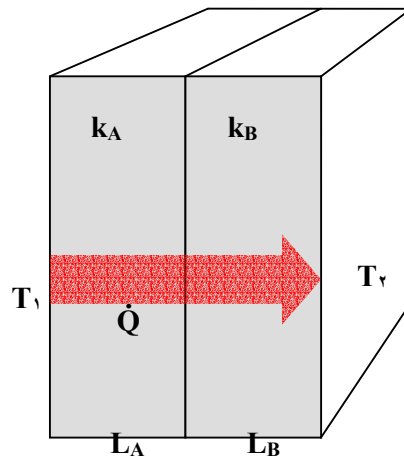
$$(٦) \quad \dot{Q} = \frac{\Delta T}{R_{\text{Total}}}$$

حيث أن R_{Total} هي المقاومة الكلية للمادة المجمعّة و يمكن حسابها من المقاومات الجزئية لكل طبقة بواسطة معادلة حساب المقاومات المتوالية (المشابهة لحساب المقاومات الكهربائية في علم انتقال الكهرباء)

$$(٧) \quad R_{\text{Total}} = R_1 + R_2 + R_3$$

مثال ٥: أحسب معدل انتقال الحرارة عبر الجدار الموضح أدناه ، حيث أن

$$\begin{array}{lll} T_1 = 100^\circ \text{C} & k_A = 80 \frac{\text{W}}{\text{m}^\circ \text{C}} & L_A = L_B = 0.05 \text{ m} \\ T_2 = 50^\circ \text{C} & k_B = 100 \frac{\text{W}}{\text{m}^\circ \text{C}} & A_A = A_B = 1 \text{ m}^2 \end{array}$$



الحل : فرق درجات الحرارة الكلي هو

$$\Delta T = T_1 - T_2 = 100 - 50 = 50 \text{ }^\circ\text{C}$$

أما المقاومة الكلية للمادة المجمعّة فتساوي مجموع المقاومات الجزئية لطبقاتها المتوالية

$$\begin{aligned} R_{\text{Total}} &= R_A + R_B \\ &= \frac{L_A}{k_A A_A} + \frac{L_B}{k_B A_B} \\ &= \frac{0.05}{80} + \frac{0.05}{100} \\ &= 0.001125 \frac{^\circ\text{C}}{\text{W}} \end{aligned}$$

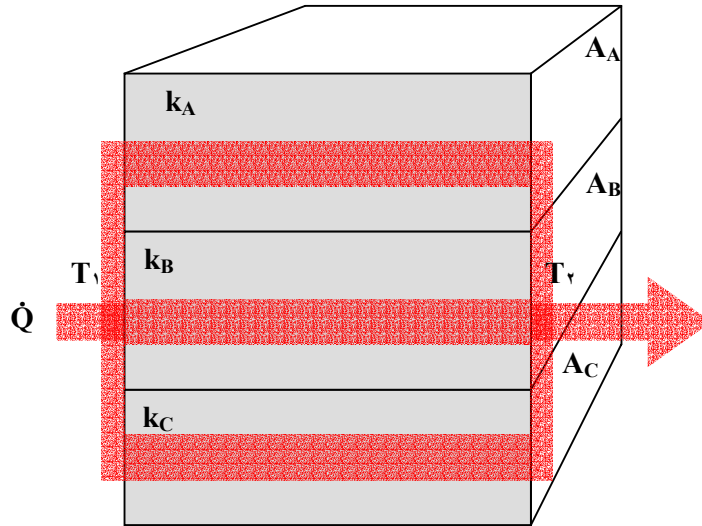
و عليه فإن معدل انتقال الحرارة عبر هذا الجدار هو

$$\dot{Q} = \frac{\Delta T}{R_{\text{Total}}} = \frac{50}{0.001125} = 44444.4 \text{ W}$$

في بعض التطبيقات يكون جميع الطبقات متوازياً لا متوالياً (الشكل ٦) . يتم حساب معدل انتقال الحرارة في هذه الحالة بنفس الطريقة السابقة (معادلة ٦) إلا أن المقاومات الحرارية للطبقات المتوازية تُجمع في مقاومة كلية عبر مقلوب جمع مقلوبات المقاومات الجزئية المتوازية

$$\frac{1}{R_{\text{Total}}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}$$

$$(A) \quad \Rightarrow \quad R_{\text{Total}} = \frac{R_1 R_2 R_3}{R_1 R_2 + R_2 R_3 + R_3 R_1}$$

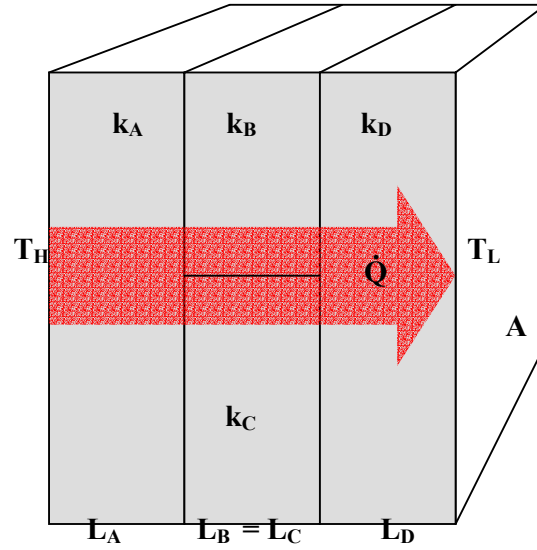


الشكل (٦) : انتقال الحرارة بالتوصيل خلال مادة مجمعة على التوازي

أما حين توجد طبقات متوازية و أخرى متوالية في مادة مجمعة واحدة فإن المقاومة الكلية للمادة المجمعة تحسب بحساب مقاومة الطبقات المتوازية أولاً (من معادلة ٨) ثم جمع المقاومة الموحدة للطبقات المتوازية مع باقي الطبقات المتوالية (معادلة ٧) ، و ذلك لأن الطبقة المكونة من الطبقات المتوازية هي طبقة موائية لباقي الطبقات .

مثال ٦: احسب معدل انتقال الحرارة عبر الجدار المجمع الموضح أدناه ، حيث أن

$$\begin{array}{l}
 k_A = 80 \frac{W}{m \cdot ^\circ C} \\
 k_B = 58 \frac{W}{m \cdot ^\circ C} \\
 k_C = 45 \frac{W}{m \cdot ^\circ C} \\
 k_D = 30 \frac{W}{m \cdot ^\circ C} \\
 T_H = 100^\circ C \\
 T_L = 50^\circ C
 \end{array}
 \qquad
 \begin{array}{l}
 L_A = 0.05 \text{ m} \\
 L_B = L_C = 0.1 \text{ m} \\
 L_D = 0.05 \text{ m} \\
 A = 1 \text{ m}^2
 \end{array}$$



الحل : فرق درجات الحرارة الكلي هو

$$\Delta T = T_H - T_L = 100 - 50 = 50 \text{ } ^\circ\text{C}$$

و المقاومات الحرارية لكل من الطبقات الأربع هي

$$R_A = \frac{L_A}{k_A A} = 0.00063 \frac{^\circ\text{C}}{\text{W}}$$

$$R_B = \frac{L_B}{k_B A} = 0.0017 \frac{^\circ\text{C}}{\text{W}}$$

$$R_C = \frac{L_C}{k_C A} = 0.0022 \frac{^\circ\text{C}}{\text{W}}$$

$$R_D = \frac{L_D}{k_D A} = 0.0017 \frac{^\circ\text{C}}{\text{W}}$$

أما المقاومة الكلية للمادة المجمعّة فتساوي مجموع المقاومات الجزئية لطبقاتها المتوالية

$$\begin{aligned}
 R_{\text{Total}} &= R_A + R_{BC} + R_D \\
 &= R_A + \frac{R_B R_C}{R_B + R_C} + R_D \\
 &= 0.00063 + \frac{0.0017 \times 0.0022}{0.0017 + 0.0022} + 0.0017 \\
 &= 0.0033 \frac{^\circ\text{C}}{\text{W}}
 \end{aligned}$$

و عليه فإن معدل انتقال الحرارة عبر هذا الجدار هو

$$\dot{Q} = \frac{\Delta T}{R_{\text{Total}}} = \frac{50}{0.0033} = 15151.5 \text{ W}$$

التوصيل الحراري عبر الأنابيب :

للأنابيب أهمية خاصة في التطبيقات الكيميائية الصناعية حيث تتكون المبادلات الحرارية Heat Exchangers . في المبادلات الحرارية (الشكل ٧) يتم تبادل الحرارة بين مائع متدفق داخل الأنابيب و آخر يتدفق خارجها .



الشكل ٧ : مبادل حراري

تنتقل الحرارة بالتوصيل الحراري عبر جدار الأنبوب تماماً كما في الألواح المستوية إلا أن مساحة الانتقال A متغيرة في حالة الأنابيب حيث تكبر مساحة الانتقال كلما ابتعدت الحرارة عن مركز الأنبوب و تصغر مساحة الانتقال كلما اتجهنا نحو المركز ، بينما في الأسطح المستوية تبقى مساحة الانتقال ثابتة

. يمكن تضمين هذا التغير في مساحة الانتقال في قانون فورييه للتوصيل الحراري (معادلة ١ - ١)
بالتكامل الرياضي للمساحة و مسافة الانتقال (الفرق بين القطرين الداخلي و الخارجي للأنبوب ، $d(r)$)
و نتيجة هذا التكامل هو معادلة التوصيل الحراري عبر جدران الأنابيب

$$(٩) \quad \dot{Q} = \frac{2 \pi k l}{\ln \frac{r_o}{r_i}} \Delta T$$

حيث π هي ثابت الدائرة ٣,١٤٢

k هي الموصلية الحرارية لمادة جدار الأنبوب بالـ $\frac{W}{m^{\circ}C}$

l هي طول الأنبوب بالـ m

r_o هو نصف القطر الخارجي للأنبوب بالـ m

r_i هو نصف القطر الداخلي للأنبوب m

\ln هي الدالة اللوغارتمية الطبيعية (و يمكن إيجادها مباشرةً بالآلات الحاسبة)

و أخيراً ΔT هي فرق درجات الحرارة بين السطح الحار للأنبوب و السطح البارد بالدرجة المئوية $^{\circ}C$

بمقارنة بسيطة بين معادلة ١ و المعادلة الأخيرة يتبين أن $\frac{2 \pi k l}{\ln \frac{r_o}{r_i}}$ هي مجموعة المؤثرات في انتقال الحرارة

بالتوصيل و المسماة القدرة على التوصيل ، و مقلوب هذه المجموعة هو المقاومة الحرارية لجدار الأنبوب .

مثال ٧: أنبوب من النحاس ($k = 380 \frac{W}{m^{\circ}C}$) قطره الداخلي ٢٠ mm و قطره الخارجي ٣٠ mm

و طوله ٥ m ، يتدفق خلاله ماء درجة حرارته $50^{\circ}C$ يتبادل الحرارة مع خارج الأنبوب درجة

حرارته $25^{\circ}C$. كم معدل التدفق الحراري عبر جدار الأنبوب ؟ (افترض أن درجة حرارة سطحها

الأنبوب الداخلي و الخارجي مساوية لدرجة حرارة الماء الملامس لكل منهما) .

الحل : فرق درجات الحرارة الكلي هو

$$\Delta T = T_H - T_L = 50 - 25 = 25^{\circ}C$$

و المقاومة الحرارية لجدار الأنبوب

$$\begin{aligned} R &= \frac{\ln \frac{r_o}{r_i}}{2 \pi k l} \\ &= \frac{\ln \frac{30}{20}}{2 \times \pi \times 380 \times 5} \\ &= 0.000034 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{W}} \end{aligned}$$

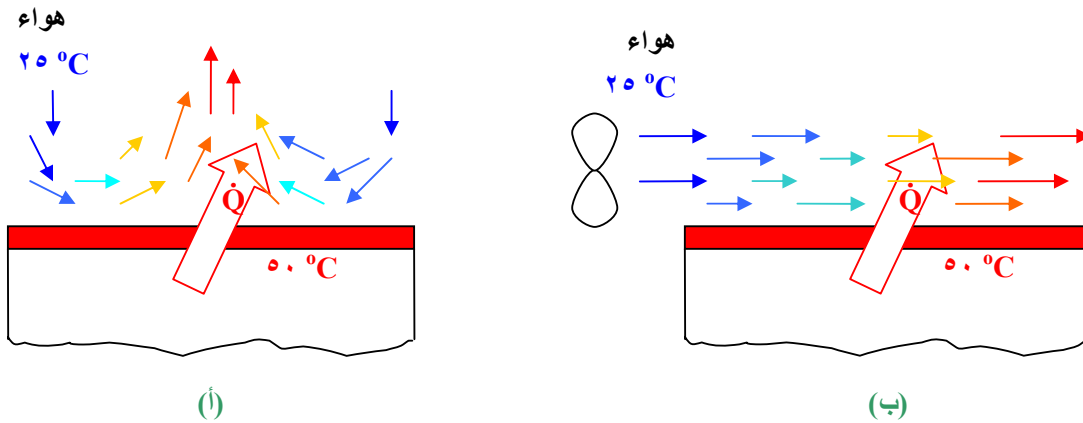
و عليه فإن معدل تدفق الحرارة عبر جدار الأنبوب

$$\dot{Q} = \frac{\Delta T}{R} = \frac{25}{0.000034} = 736071.48 \text{ W} = 736.07 \text{ kW}$$

الفصل الثاني

الحمل الحراري

إذا لامس مائع (سائل أو غاز) بارد متدفق جسمًا صلبًا حارًا (الشكل ٨) فإن جزءاً من الطاقة الداخلية في المادة الصلبة لا بد أن تسري كطاقة حرارية إلى المائع البارد لتزيد بذلك طاقته الداخلية سعياً للوصول إلى التوازن الحراري بين الجسمين . بسبب حركة المائع فإن كمية المائع التي امتصت الحرارة ستبتعد عن السطح الصلب حاملة معها الحرارة المنتقلة من السطح الصلب لتأتي كمية أخرى من المائع لحمل نصيبها من حرارة السطح الحار ثم تبتعد لتأتي كمية باردة أخرى وهكذا دواليك . هذا الحمل المتتابع و المستمر للحرارة من قبل المائع المتدفق هو الفارق الرئيسي بين انتقال الحرارة بالتوصيل الحراري و انتقال الحرارة بالحمل الحراري ، و هذا الفارق هو الذي يعطي هذا الشكل من طرق انتقال الحرارة اسمه المميز ... الحمل الحراري Heat Convection .



الشكل ٨ : الحمل الحراري الطبيعي (أ) ، و القسري (ب)

يمكن أن يكون الحمل الحراري طبيعياً أو قسرياً . الحمل الحراري الطبيعي (الشكل ٨أ) هو ذلك الذي تكون فيه حركة المائع حركةً طبيعيةً ناتجةً عن تسخين المائع حيث يرتفع المائع الحار للأعلى حاملاً معه الحرارة التي امتصها من السطح الحار و يهبط المائع البارد بدلاً منه فيمتص الحرارة من السطح الحار وهكذا . أما في الحمل القسري (الشكل ٨ب) فإن حركة المائع ناتجة عن عامل

خارجي مثل مروحة أو مضخة . في كلا الحالتين فإن انتقال الحرارة بالحمل مشابه للتوصيل الحراري من حيث إن كمية الحرارة المنتقلة تتأثر بالدافع (و هو فرق درجات الحرارة) و بالمؤثرات الأخرى و هي في مجموعها تسمى بالقدرة على نقل الحرارة ، ففي التوصيل الحراري

$$\dot{Q}_{\text{توصيل}} = \frac{k A}{L} \Delta T$$

أما في الحمل الحراري فإن معدل انتقال الحرارة هو

$$(١٠) \quad \dot{Q}_{\text{حمل}} = h A \Delta T$$

تسمى المعادلة ١٠ بقانون نيوتن للحمل الحراري ، و يتضح التشابه بين المعادلتين إلا أن مجموعة المؤثرات في النقل الحراري اختلفت في الحمل (h A) عنها في حالة التوصيل $(\frac{k A}{L})$ و ذلك باختفاء الموصلية الحرارية k و مسافة الانتقال L من مؤثرات الحمل الحراري و ظهور رمز جديد هو h . أما اختفاء مسافة الانتقال L من معادلة الحمل الحراري فذلك لأن انتقال الحرارة بين السطح الصلب و السائل المتدفق يتم مباشرة دون قطع أي مسافة بسبب الالتصاق و عدم وجود أي مسافة أصلاً بين الجسمين المتبادلين للحرارة . أما الموصلية الحرارية فاختلفت كرمز فقط و بقي أثرها حاضراً ضمناً في الرمز الجديد h و الذي يرمز لـ "معامل الحمل الحراري" و هو معامل يمثل قدرة النظام الحراري ككل على نقل الحرارة بالحمل الحراري متضمناً أثر الموصلية الحرارية و سرعة تدفق المائع و خواص المائع المتدفق الحرارية و الفيزيائية الأخرى و مسافة الالتقاء بين السطح و المائع و كذلك شكل السطح الصلب . معامل الحمل الحراري h (و وحدته $\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}$) يتغير بتغير هذه المؤثرات و هو ليس خاصية لمادة كيميائية بعينها (بخلاف الموصلية الحرارية التي هي خاصية لكل مادة تبعاً لتركيبها الكيميائي بغض النظر عن شكلها الهندسي أو المؤثرات الأخرى) . عليه فإن كل نظام تنتقل فيه الحرارة بالحمل الحراري له معامل حمل حراري h خاص به بحسب خواص المواد الناقلة للحرارة فيه و سرعة تدفق المائع فيه و شكل الأسطح الصلبة و طول سطح الالتقاء بين المائع المتدفق و السطح الصلب .

كما في التوصيل الحراري فإن مقاومة النقل الحراري في حالة الحمل هي معكوس قدرة النظام على النقل الحراري

$$(11) \quad R_{\text{حمل}} = \frac{1}{h A}$$

و بذلك يمكن إعادة كتابة معادلة الحمل الحراري (معادلة ١ - ١١) بصيغة المقاومة الحرارية

$$(12) \quad \dot{Q}_{\text{حمل}} = \frac{\Delta T}{R_{\text{حمل}}}$$

مثال ٨: هواء درجة حرارته 30°C يتدفق فوق سطح صلب مستو درجة حرارته 250°C و طوله ٥٠ cm و عرضه ٣٠ cm . إذا كان معامل الحمل الحراري h لهذا النظام هو $30 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{C}}$ فاحسب معدل انتقال الحرارة بالحمل من السطح الصلب إلى الهواء المتدفق .

الحل : فرق درجات الحرارة الكلي هو

$$\Delta T = T_{\text{السطح}} - T_{\text{الهواء}} = 250 - 30 = 220^{\circ}\text{C}$$

و مقاومة الحمل الحراري هي

$$R_{\text{حمل}} = \frac{1}{h A} = \frac{1}{30 \times 0.5 \times 0.3} = 0.222 \frac{\text{C}}{\text{W}}$$

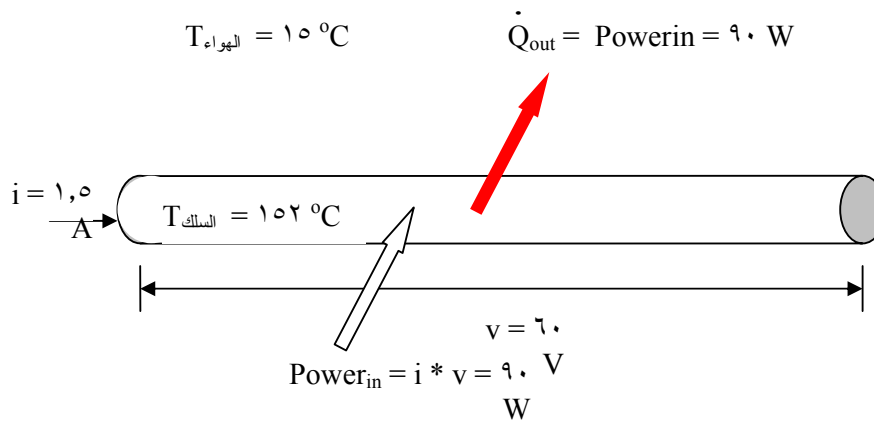
و عليه فإن معدل الحمل الحراري هو

$$\dot{Q}_{\text{حمل}} = \frac{\Delta T}{R_{\text{حمل}}} = \frac{220}{0.222} = 990 \text{ W}$$

حساب معامل الحمل الحراري h :

بما أن معامل الحمل الحراري h ليس خاصية و لكنه انطباع لكل حالة بعينها فعليه يجب حسابه لكل حالة حتى يتسنى استعماله لحساب كمية الحرارة المنتقلة بالحمل الحراري في كل حالة . يمكن حساب معامل النقل الحراري بطريقتين ؛ بالتجريب و بالاستنتاج الرياضي . بالتجريب يمكن للباحث تمثيل النظام الناقل للحرارة في المختبر و حساب معامل الحمل الحراري عن طريق قياس درجات الحرارة و قياس كمية الحرارة المنتقلة و من ثم استنتاج معامل الحمل الحراري h من معادلة الحمل الحراري (المعادلة ١٠) .

مثال ٩: احسب معامل الحمل الحراري h لانتقال الحرارة بواسطة الحمل الحر من السلك الكهربائي الساخن إلى الهواء في الشكل إذا كانت القدرة الكهربائية المبذولة في السلك ٩٠ W و درجة حرارة الهواء ١٥ °C و درجة حرارة السلك ١٥٢ °C و قطره ٣ mm و طوله ٢ m .



الحل : فرق درجات الحرارة الكلي هو

$$\Delta T = T_{\text{السلك}} - T_{\text{الهواء}} = 152 - 15 = 137^{\circ}\text{C}$$

و مساحة الالتقاء بين الهواء و السلك هي مساحة السطح الخارجي للسلك

$$A = \pi d l = \pi \times 0.003 \times 2 = 0.188 \text{ m}^2$$

حيث أن l هي طول السلك بالمترو d هو القطر ، أما كمية الحرارة المنتقلة للهواء فهي تساوي كمية القدرة الكهربائية المبذولة في السلك عند مرور التيار الكهربائي خلاله

$$\dot{Q} = 90 \text{ W}$$

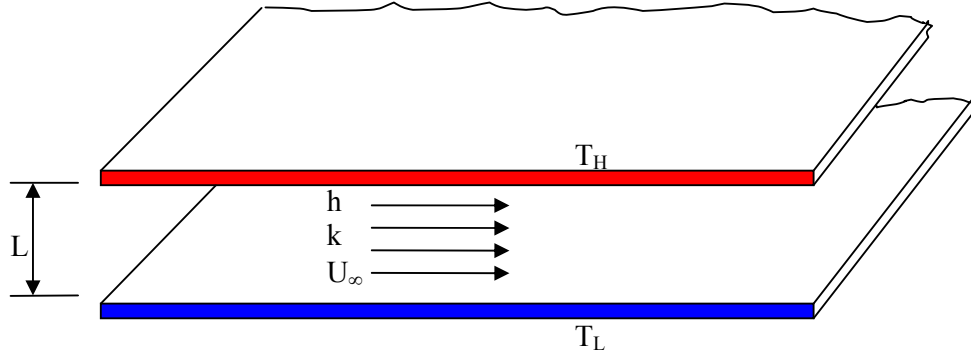
و عليه فإن معامل الحمل الحراري

$$h = \frac{\dot{Q}}{A \Delta T} = \frac{90}{0.188 \times 137} = 34.9 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{C}}$$

لا يمكن دائماً تمثيل نظام معين في المختبر ، كما أن تمثيل كل حالة سيكون مكلفاً جداً في الوقت و الجهد و المال ، لذلك في أغلب الأحيان يتجه المتخصص إلى الاستنتاج الرياضي لإيجاد معامل الحمل الحراري h . لحساب معامل انتقال الحرارة بواسطة الحمل h لا بد من معرفة أمور ثلاثة . الأول هو مستوى التحسين في النقل الحراري بالحمل (عند تدفق المائع فوق السطح الناقل) نسبةً إلى انتقال الحرارة بواسطة التوصيل (عندما يكون المائع ملاصقاً للسطح الناقل بدون حركة) . و الثاني هو العلاقة بين تغير درجة حرارة المائع أثناء مروره فوق السطح الناقل و بين تغير سرعة تدفقه بسبب احتكاكه بهذا السطح حيث إن كلا التغيران يؤثران على قيمة معامل الحمل الحراري h . و الثالث هو شكل التدفق أثناء مرور المائع على السطح لما في ذلك من تأثير مباشر على قيمة h . فيما يلي سيتم تناول كل عامل من هذه العوامل و مساهمته في حساب معامل الحمل الحراري .

أولاً : مستوى التحسين في انتقال الحرارة بواسطة الحمل الحراري :

يمكن حساب مستوى التحسين في انتقال الحرارة عند توظيف الحمل الحراري عن طريق مقارنته بانتقال الحرارة بواسطة التوصيل عند ثبات المائع . لتطبيق هذه المقارنة يمثل الشكل ٩ مائع ثابت محصور بين سطحين مستويين مختلفين في درجة الحرارة و المسافة بينهما تمثل مسافة انتقال الحرارة بالتوصيل L



شكل ٩ : تدفق محصور بين سطحين مستويين

لهذه الحالة فإن معدل انتقال الحرارة بالتوصيل خلال المائع يمكن حسابه عبر قانون فورييه للتوصيل الحراري

$$\dot{Q}_{\text{توصيل}} = \frac{k A}{L} \Delta T$$

و حين يبدأ المائع بين السطحين بالحركة فإن معدل انتقال الحرارة بينهما يزداد و يمكن حسابه من قانون نيوتن للحمل الحراري

$$\dot{Q}_{\text{حمل}} = h A \Delta T$$

و لحساب نسبة التحسين في انتقال الحرارة بسبب حركة المائع يقسم معدل انتقال الحرارة بالحمل على معدل انتقال الحرارة بالتوصيل للحصول على

$$\frac{\dot{Q}_{\text{حمل}}}{\dot{Q}_{\text{توصيل}}} = \frac{h A \Delta T}{\frac{k A}{L} \Delta T} = \frac{h L}{k}$$

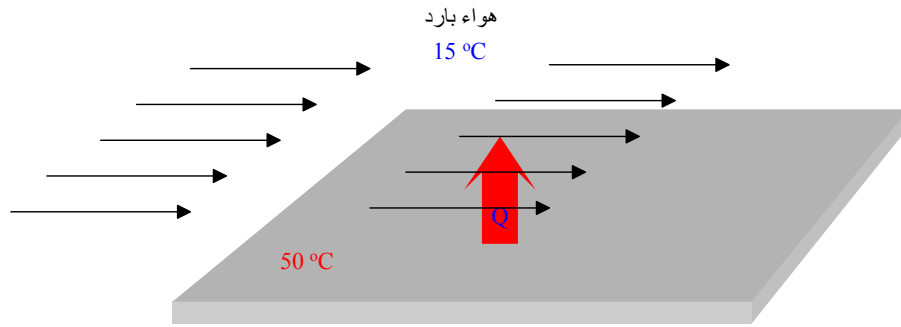
تمثل هذه المجموعة ($\frac{hL}{k}$) مقياساً لمستوى التحسين في النقل الحراري عند توظيف الحمل الحراري ، و هي مجموعة لا بعدية (تلتغي وحدتا h و L مع وحدة k فتكون المجموعة بلا أبعاد ، أي بدون وحدة) و تسمى رقم نسلت Nu

$$(١٢) \quad Nu = \frac{hL}{k}$$

كلما زاد رقم نسلت Nu عن الواحد زاد معدل انتقال الحرارة بسبب الحمل الحراري ، أما عندما يكون $Nu = 1$ فهذا يعني أنه ليس هناك أي تحسين بسبب الحمل (أي أن المائع متوقف) و أن انتقال الحرارة يتم عن طريق التوصيل الحراري فقط .

ثانياً : العلاقة بين تغير درجة حرارة المائع بسبب ملامسته للسطح الصلب و بين تغير سرعة تدفقه بسبب الاحتكاك مع هذا السطح و تأثير هذه العلاقة على معامل الحمل الحراري h :

عند التقاء السائل المتدفق بالسطح الذي سيتبادل معه الحرارة يؤثر السطح على سرعة المائع (بسبب الاحتكاك) و على درجة حرارته (بسبب التلامس) . عند التقاء المائع مع السطح الصلب فإنه ينقسم إلى طبقات ينزلق بعضها فوق بعض بسبب تأثير أجزاء السائل القريبة من السطح الصلب بحرارته و بالاحتكاك أكثر من أجزاء السائل البعيدة عنه . كمثال على ذلك تكون طبقة المائع الملامسة للسطح الساخن في شكل ١٠ أسخن من الطبقة التي تعلوها و أقل سرعة بسبب الاحتكاك المباشر مع السطح (على العموم تعتبر الطبقة الملاصقة للسطح ذات سرعة تساوي الصفر و يسمى هذا بظرف عدم الانزلاق) . يستمر الانخفاض في درجة حرارة طبقات المائع صعوداً حتى تصل إلى طبقة من المائع ما زالت عند درجة حرارة المائع الأصلية T_{∞} ، و تكون هذه الطبقة هي الحد الفاصل بين طبقات المائع المتأثرة بدرجة الحرارة الساخن و بين باقي المائع الذي ما زال عند نفس درجة حرارته قبل الالتقاء بالسطح . تسمى هذه الطبقة بالطبقة الحدودية الحرارية Thermal Boundary Layer . بالمقابل تتزايد سرعة طبقات المائع من الصفر في أسفل الطبقة الملاصقة للسطح الصلب صعوداً إلى طبقة من المائع ما زالت عند نفس سرعة المائع قبل الالتقاء مع السطح الصلب U_{∞} ، و تكون هذه الطبقة هي الحد الفاصل بين طبقات المائع المتأثرة بالاحتكاك مع السطح الصلب و بين باقي المائع الذي ما زال عند نفس سرعته قبل الالتقاء بالسطح . تسمى هذه الطبقة بالطبقة الحدودية التدفقية Velocity Boundary Layer .

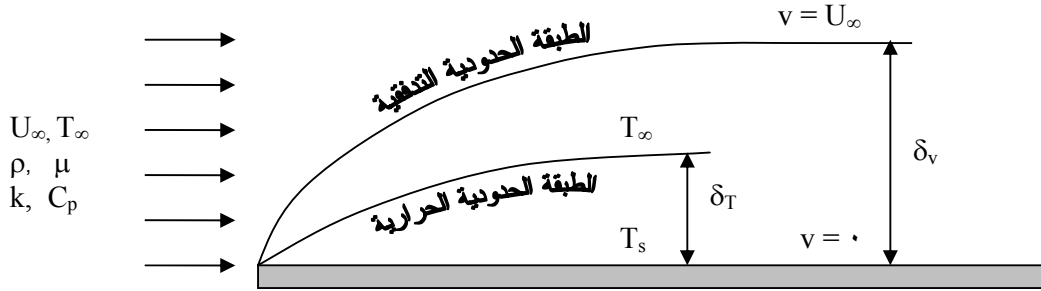


شكل ١٠ : مائع يتدفق فوق سطح مستوي ذو درجة حرارة ثابتة أعلى من درجة حرارة المائع

يختلف ارتفاع الطبقتين الحدوديتين الحرارية و التدفقية بحسب خصائص المائع ، مثل لزوجة المائع μ و موصلية الحرارية k و حرارته النوعية C_p . فكلما كانت خصائص المائع تساعده على انتشار الحرارة في طبقاته بسرعة كان ارتفاع الطبقة الحدودية الحرارية (و يرمز له بـ δ_t) كبيراً . بالمقابل كلما كانت خصائصه التدفقية (مثل اللزوجة) تساعده على انتشار أثر الاحتكاك في طبقاته بسرعة كان ارتفاع طبقة الحدودية التدفقية (و يرمز له بـ δ_v) كبيراً . في الشكل ١١ مقارنةً بين نوعين من الموائع المتدفقة فوق سطح مستوي ذي حرارة سطح ثابتة . في الزيوت تكون الطبقة الحدودية الحرارية أصغر بكثير من الطبقة الحدودية التدفقية (نسبة سمك الطبقة الحدودية التدفقية إلى الطبقة الحرارية أكبر كثيراً من الواحد ، $\frac{\delta_v}{\delta_t} \gg 1$) حيث إن الحرارة تنتشر ببطء في طبقات الزيت بينما يؤثر الاحتكاك على طبقاته بشدة . أما في المعادن المنصهرة فإن انتشار الحرارة في طبقاتها يكون أسرع بكثير من تأثير الاحتكاك و عليه فإن نسبة ارتفاع الطبقة الحرارية إلى ارتفاع الطبقة التدفقية أقل بكثير من الواحد ، $\frac{\delta_v}{\delta_t} \gg 1$. إن هذه العلاقة بين الطبقتين الحدوديتين (ممثلةً في نسبة ارتفاع الطبقة التدفقية إلى نظيرتها الحرارية) لمثل جيد مدى انتقال الحرارة بين السطح و المائع ، و عليه فإن هذه النسبة مؤثرٌ مباشر في معامل الحمل الحراري h . يمكن وصف نسبة ارتفاع الطبقتين عن طريق خصائص المائع الحرارية و التدفقية (اللزوجة μ و الموصلية الحرارية k و الحرارة النوعية C_p) و تسمى هذه المجموعة برقم برانتل Pr

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

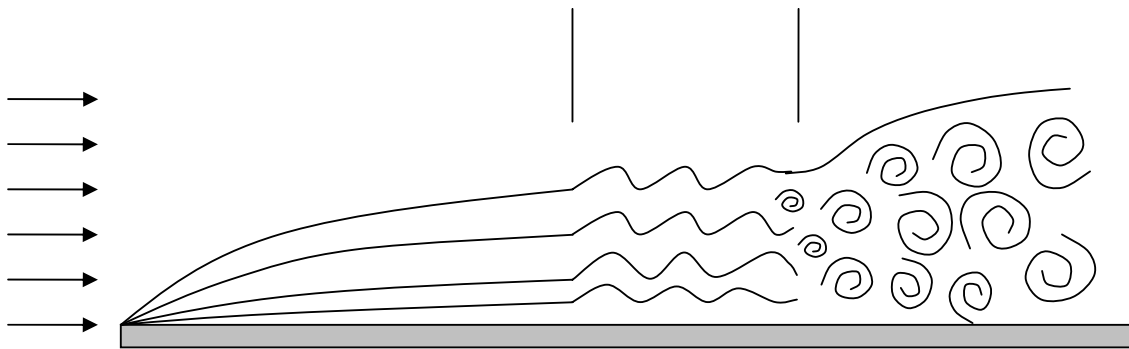
ومن الواضح من الشكل ١١ أن $Pr \gg 1$ للزيوت ، أما للمعادن المنصهرة فإن $Pr \ll 1$. للهواء فإن الطبقة الحرارية و الطبقة التدفقية متقاربتين في الارتفاع حيث $Pr = 0.7$ للهواء .



شكل ١١ : نسبة ارتفاع الطبقة الحدودية التدفقية إلى ارتفاع الطبقة الحدودية الحرارية في الزيوت و المعادن المنصهرة

ثالثاً : شكل التدفق :

عند مرور المائع فوق سطح صلب (شكل ١٢) فإن طبقات المائع المتأثرة بالتلامس مع هذا السطح إما أن تتدفق بشكلٍ سلس حيث تنزلق طبقات المائع بعضها فوق بعض و بشكلٍ متواز و يسمى هذا بالتدفق الطبقي Laminar Flow ، أو أن تكون تدفقاً طبقياً في حالة انتقالية حيث تبقى الطبقات مناسبةً و لكنها تبدأ بالتموج و يسمى التدفق في هذه الحالة تدفقاً طبقياً انتقالياً Transitional Laminar Flow ، أو أن تختفي الطبقات بالكلية و يكون التدفق مضطرباً يختلط فيه المائع بشكلٍ مستمر و عنيف و يسمى التدفق في هذه الحالة بالتدفق الاضطرابي Turbulent Flow .



شكل ١٢ : التدفق الطبقي و التدفق الاضطرابي

إن الخصائص المؤثرة في شكل التدفق هي كثافة المائع ρ و سرعة تدفقه قبل الاحتكاك بالسطح الصلب U_{∞} و لزوجه μ و طول مسافة التقاء المائع بالسطح الصلب l (الشكل ١٢). يُجمع تأثير هذه الخواص معاً في علاقة رياضية تسمى برقم رينولدز Re

$$(١٤) \quad Re = \frac{\rho U_{\infty} l}{\mu}$$

يعتبر رقم رينولدز Re (و هو رقم لا بعدي) مقياس جيد لتحول التدفق من طبقي إلى مضطرب . على سبيل المثال ، في حالة التدفق فوق سطح مستو ذي درجة حرارة ثابتة فإن التدفق يتحول من طبقي إلى مضطرب عندما يتعدى رقم رينولدز حد $500,000$ ($Re \geq 5 \times 10^5$).

ما علاقة العوامل الثلاثة (الممثلة في رقم نسلت Nu و رقم برانتل Pr و رقم Re) بالاستنتاج الرياضي لمعامل الحمل الحراري بالحمل h ؟ الجواب يتم على عدة خطوات . أولاً يمكن إيجاد علاقة لحساب معامل الحمل الحراري h من تعريف رقم نسلت Nu حيث

$$Nu = \frac{h L}{k}$$

مما يمكن إعادة صياغته لحساب معامل الحمل الحراري

$$(١٥) \quad h = \frac{Nu k}{L}$$

فإذا عرفت الموصلية الحرارية للمائع k و بعد التدفق عن نقطة الالتقاء بالسطح الصلب L و إذا أمكننا حساب مقياس مستوى التحسين في النقل الحراري عند توظيف الحمل الحراري Nu فإن معامل الحمل الحراري سيوجد تلقائياً من العلاقة الرياضية أعلاه . أما كيفية حساب Nu فيمكن إيجادها رياضياً عن طريق خواص المائع المتدفق (أو ما يمثل هذه الخواص و هما الرقمان رينولدز Re و برانتل Pr) ، فعلى سبيل المثال وجد رياضياً أنه في حالة التدفق الطبقي ($Re < 5 \times 10^5$) للسطح المستوي ذو درجة الحرارة الثابتة فإن

$$(١٦) \quad Nu = 0,664 Re^{1/2} Pr^{1/3} \quad [Rr \geq 0,6 \text{ يكون رقم رينولدز}]$$

أما في حالة التدفق الاضطرابي ($Re > 5 \times 10^5$) للسطح المستوى ذو درجة الحرارة الثابتة فإن

$$(١٧) \quad Nu = 0,037 Re^{4/5} Pr^{1/3} \quad [0,6 \leq Pr \leq 60, 5 \times 10^5 \leq Re \leq 10^7]$$

أما في حالة التدفق الجامع للحالتين (طبق في البداية و اضطرابي في نهايته) للسطح المستوى ذو درجة الحرارة الثابتة فإن

$$(١٨) \quad Nu = (0,037 Re^{4/5} - 871) Pr^{1/3} \quad [0,6 \leq Pr \leq 60, 5 \times 10^5 \leq Re \leq 10^7]$$

وعليه عند دراسة تدفق ما فيجب أولاً حساب رقم رينولدز Re (من تعريفه بمعادلة ١ - ١٤) لمعرفة ما إذا كان التدفق طبقياً أو اضطرابياً ، ثم حساب رقم برانتل Pr (المعادلة ١٣) ، ثم اختيار الحالة الدقيقة للتدفق من الحالات الثلاث المحددة أعلاه و تعويض كلا الرقمين في العلاقة المحددة لحالة التدفق لحساب رقم نسلت Nu ، ليتم في النهاية حساب معامل الحمل الحراري h بمعرفة رقم نسلت Nu .

مثال ١٠: إذا كان هواء سرعته 8 m/s و درجة حرارته 20°C و ضغطه مساوٍ للضغط الجوي يتدفق فوق سطح مستو عرضه $1,5 \text{ m}$ و طوله 6 m و درجة حرارته 134°C فاحسب معدل انتقال الحرارة من السطح إلى الهواء و كمية الحرارة المنتقلة خلال ساعتين .

الحل: لهواء درجة حرارته 20°C و ضغطه هو الضغط الجوي فإن خواصه من جدول ١ (ملحوظة تؤخذ الخواص من الجدول عند درجة حرارة وسطية بين السطح و درجة حرارة المائع قبل الالتقاء بالسطح الصلب $T_f = (T_\infty + T_s)/2 = 77^\circ \text{C}$) كالتالي

$$\begin{aligned} \rho &= 1,009 \text{ kg/m}^3 & \mu &= 2,08 \times 10^{-4} \text{ kg/m} \\ C_p &= 1008 \text{ J/kg }^\circ\text{C} & k &= 0,0297 \text{ W/m }^\circ\text{C} \\ U_\infty &= 8 \text{ m/s} & L &= 6 \text{ m} \end{aligned}$$

و عليه فإن رقمي رينولدز و برانتل

$$Re = \rho U_{\infty} L / \mu = 2,328,461,5 > 500,000$$

$$Pr = \mu C_p / k = 0,705$$

و عليه فإن التدفق وصل حالة الاضطراب فهو جامع للتدفق الطبقي (في بداية الالتقاء بالسطح الصلب) و اضطرابي بعد ذلك ، و بما أن رقم برانتل له أكبر من ٠,٦ و أصغر من ٦٠ و رقم رينولدز له أكبر من ٥٠٠٠٠٠٠ و أصغر من ١٠^٧ فيمكن استخدام المعادلة ١-١٨ لحساب رقم نسلت Nu و من ثم حساب معامل الحمل الحراري بمعرفة رقم Nu (من المعادلة ١٥) و حساب معدل الحمل الحراري بمعرفة h من قانون الحمل الحراري (المعادلة ١٠)

$$Nu = (0,027 Re^{1/2} - 171) Pr^{1/4} = 3310,375$$

$$h = Nu k / L = 16,386 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\dot{Q} = h A (T_s - T_{\infty}) = 16812,4 \text{ W}$$

و عندما يستمر انتقال الحرارة بهذا المعدل لمدة ساعتين فإن كمية الحرارة المنقولة خلال هذه المادة يساوي

$$Q (\text{لمدة ساعتين}) = \dot{Q} \Delta t = 121049280 \text{ J} = 121,05 \text{ MJ}$$

في كثير من التطبيقات المهمة في التقنية الكيميائية لا يكون السطح الصلب سطحاً مستوياً كما تم شرحه حتى الآن . من أهم الأمثلة على ذلك تناقل الحرارة بواسطة الحمل الحراري القسري في المبادلات الحرارية المستعملة في المفاعلات الكيميائية حيث يتدفق المائع فوق الأسطح الخارجية للأنايب و كذلك داخل الأنايب . طريقة حساب معامل الحراري مطابقة تماماً لما شرح أعلاه عدا أن معادلات حساب رقم Nu (المعادلات ١٦ و ١٧ و ١٨) ستختلف باختلاف شكل السطح الصلب ، و شروط تحديد شكل التدفق المصاحبة لهذه المعادلات ستختلف معها كذلك .

رقم برانتل Pr	اللزوجة μ $(\frac{kg}{m \cdot s}) \times 10^{-5}$	الموصلية الحرارية k $(\frac{W}{m \cdot ^\circ C})$	الحرارة النوعية C_p $(\frac{J}{kg \cdot ^\circ C})$	الكثافة ρ $(\frac{kg}{m^3})$	درجة الحرارة T (K)
٠,٧٤٠	١,٣٤	٠,٠١٨١	١٠٠٣	١,٧٦٦	٢٠٠
٠,٧٢٤	١,٦١	٠,٠٢٢٣	١٠٠٣	١,٤١٣	٢٥٠
٠,٧١٧	١,٧٥	٠,٠٢٤٦	١٠٠٤	١,٢٧١	٢٨٠
٠,٧١٢	١,٨٥	٠,٠٢٦١	١٠٠٥	١,١٧٧	٣٠٠
٠,٧١٠	١,٩٤	٠,٠٢٧٥	١٠٠٦	١,١١٠	٣٢٠
٠,٧٠٦	٢,٠٨	٠,٠٢٩٧	١٠٠٨	١,٠٠٩	٣٥٠
٠,٧٠٣	٢,٢٩	٠,٠٣٣١	١٠١٣	٠,٨٣٣	٤٠٠
٠,٧٠٠	٢,٤٩	٠,٠٣٦٣	١٠٢٠	٠,٧٨٥	٤٥٠
٠,٦٩٩	٢,٦٨	٠,٠٣٩٥	١٠٢٩	٠,٧٠٦	٥٠٠
٠,٦٩٨	٢,٨٦	٠,٠٤٢٦	١٠٣٩	٠,٦٤٢	٥٥٠
٠,٦٩٨	٣,٠٣	٠,٠٤٥٦	١٠٥١	٠,٥٨٩	٦٠٠

جدول ١ : خواص الهواء عند الضغط الجوي و درجات حرارة مختلفة

المقاومة الحرارية العامة R_U ومعامل انتقال الحرارة العام U :

عند دراسة التوصيل الحراري عبر المواد المجمعّة (المكونة من أكثر من طبقة صلبة) كان الهدف هو حساب المقاومة الكلية لنظام التوصيل الحراري . و الآن و بعد دراسة الحمل الحراري يمكن توسيع هذه الأنظمة المجمعّة لتضم انتقال الحرارة بواسطة الحمل من أحد الجانبين للمادة الصلبة المجمعّة أو كلاهما . في الشكل ١٣ نظام مبسط لهواء يتدفق على أحد جانبي لوح صلب و يتزامن مع تدفق على الجانب الآخر لهواء ذي درجة حرارة مختلفة . إن اختلاف درجة الحرارة بين التيارين الهوائيين على جانبي اللوح يمثل الدافع لانتقال الحرارة من الهواء الحار عبر اللوح المجمع و انتهاءً إلى الهواء البارد سعياً إلى أن يصل النظام في نهاية الأمر إلى توازن حراري يكون فيه كلا التيارين و كل طبقات اللوح عند درجة حرارية واحدة . بما أن فارق درجات الحرارة بين طرفي النظام معروف فيكفي إيجاد مقاومة حرارية عامة تمثل مقاومتي الحمل الحراري للهواء المتدفق على جانبي اللوح و مقاومات التوصيل الحراري في كل طبقات اللوح حتى يعوض بهذا الكمية الموحدة في قانون انتقال الحرارة العام

$$(١٩) \quad \dot{Q} = \frac{\Delta T}{R_U}$$

حيث أن R_U تمثل تلك المقاومة الحرارية العامة التي تجمع تأثير كل المقاومات الجزئية المذكورة آنفاً . في النظام الموضح في الشكل ١٣ تساوي هذه المقاومة مجموع مقاومات التوصيل المتوالية مع مقاومتي الحمل الحراري المتوالية معهم أيضاً

$$(٢٠) \quad R_U = R_{\infty 1} + R_1 + R_2 + R_3 + R_{\infty 2}$$

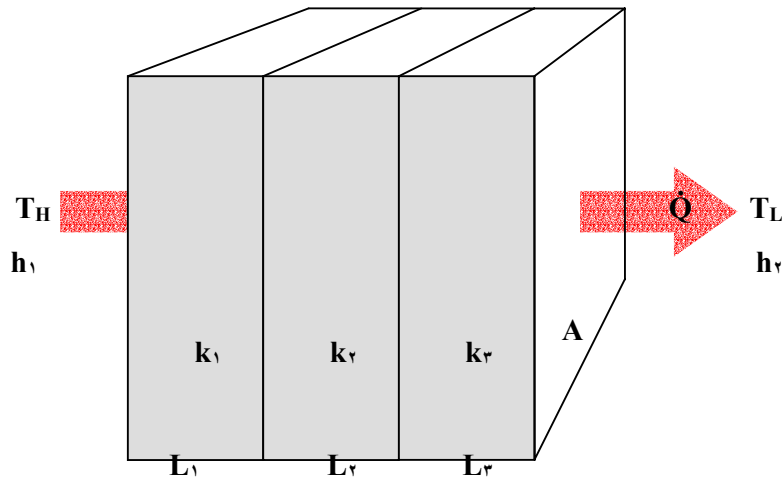
حيث أن $R_{\infty 1}$ تمثل مقاومة الحمل الحراري في تدفق الهواء الأيسر $(\frac{1}{h_1 A})$

R_1 تمثل مقاومة التوصيل الحراري في الطبقة الصلبة الأولى $(\frac{L_1}{k_1 A})$

R_2 تمثل مقاومة التوصيل الحراري في الطبقة الصلبة الثانية $(\frac{L_2}{k_2 A})$

R_3 تمثل مقاومة التوصيل الحراري في الطبقة الصلبة الثالثة $(\frac{L_3}{k_3 A})$

$R_{\infty 2}$ تمثل مقاومة الحمل الحراري في تدفق الهواء الأيمن $(\frac{1}{h_2 A})$



شكل ١٣ : نظام يضم الحمل الحراري و التوصيل الحراري على التوالي

إذا كانت المساحات مختلفة من طبقة لأخرى فيجب مراعاة ذلك في حساب كل مقاومة جزئية . أما إذا وجدت طبقات مجمعة على التوازي فيجب إيجاد مقاومتها الموحدة ثم جمعها مع باقي المقاومات للطبقات و التدفقات الموائية لها .

معامل انتقال الحرارة العام U هو معكوس المقاومة الحرارية العامة R_U و يمثل مجموع قدرات الطبقات المختلفة على النقل الحراري (التوصيل و الحمل) و عادة يحتسب هذا المعامل لكل وحدة مساحة (لكل متر مربع) حتى يسهل استعماله مع المساحات المختلفة بمجرد ضربه بها

$$(٢١) \quad \dot{Q} = U A \Delta T$$

على سبيل المثال ، في الشكل ١٧ يمكن حساب معامل انتقال الحرارة العام U كالتالي

$$(٢٢) \quad U = h_1 + \frac{k_1}{L_1} + \frac{k_2}{L_2} + \frac{k_3}{L_3} + h_2$$

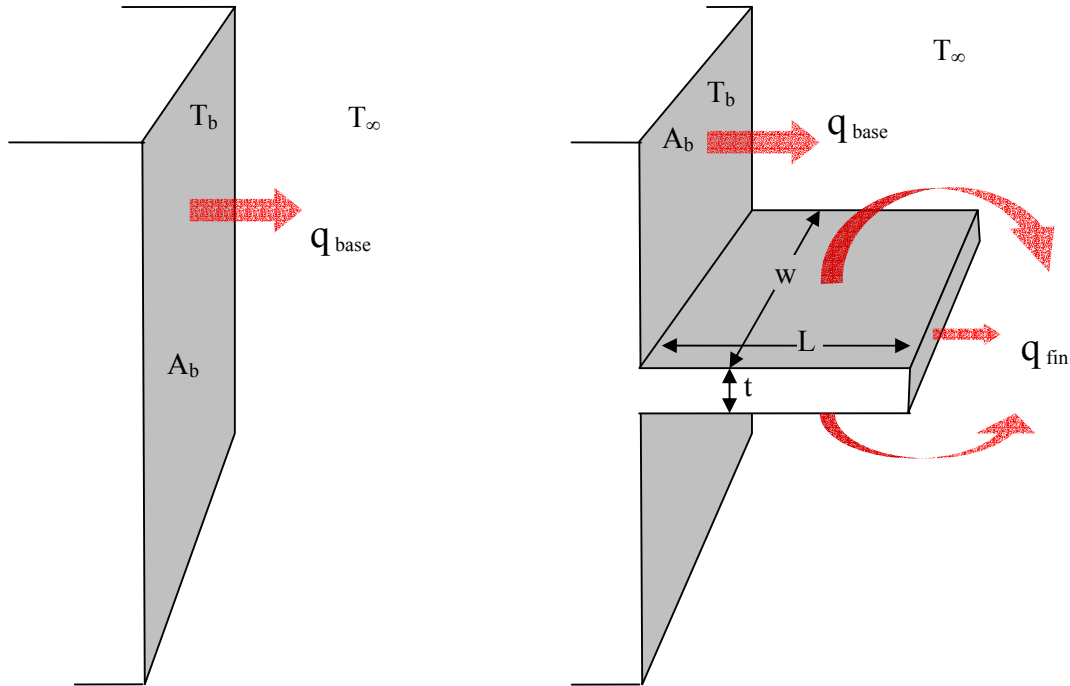
و لا توجد مساحة في هذه العلاقة لاستعمالها في القانون الأساسي (المعادلة ١٢) . و عليه فإن العلاقة بين المقاومة الحرارية العامة (المتضمنة لأثر المساحة) و معامل انتقال الحرارة العام (المعرّف لكل وحدة مساحة) هي

$$(٢٣) \quad U A = \frac{1}{R_U}$$

الأسطح الممتدة (الزعانف الحرارية):

هل لاحظت يوماً تلك الشرائح المعدنية المتراسة حول أنابيب المبادلات الحرارية (لاحظ المبادل الحراري لتبريد محرك سيارتك!) ؟ توضع هذه الشرائح الممتدة من أنابيب المبادل الحراري لتحسين انتقال الحرارة بالحمل الحراري من الأنابيب إلى الهواء المتدفق عليها . لفهم

كيف يحدث هذا التحسين انظر الشكل ١٤ للمقارنة بين الحمل الحراري من سطح مجرد و سطح موصول به زعنفة ممتدة في مجرى الهواء المتدفق ثم تأمل أي الكميات في قانون الحمل الحراري ستتأثر بهذا الامتداد و كيف ستؤثر على معدل الحمل الحراري ، $\dot{Q} = h A \Delta T$



شكل ١٤ : تحسين الحمل الحراري بإضافة الزعانف

الكمية المتأثرة بإضافة الزعنفة لنظام التبريد هي مساحة الانتقال حيث تكبر بشكل واضح ، و مع إضافة العديد من هذه الشرائح سيتحسن الحمل الحراري بشكل مطرد . يمكن حساب معدل الحمل الحراري المحسن بإضافة الحرارة المنتقلة عبر الزعنفة لتلك التي تنتقل عبر السطح المجرد

$$(٢٤) \quad \dot{Q}_{\text{المحسنة}} = \dot{Q}_{\text{القاعدة}} + \dot{Q}_{\text{الزعنفة}}$$

تختلف المعادلة النهائية للحمل الحراري المحسّن باختلاف شكل و طول و عدد الزعانف المضافة . على سبيل المثال في الزعانف الحرارية المستطيلة والطولية و الطولية جداً (كما في الشكل

(١٤) فإن المعادلة النهائية للتحسين هي

$$(٢٥) \quad \dot{Q}_{\text{المحسنة}} = \sqrt{h k P A_c} (T_b - T_\infty)$$

حيث أن P هي محيط الزعنفة ($P = 2(w+t)$)

A_c هي مساحة سطح الزعنفة ($A_c = 2(w+t)L$)

T_b درجة حرارة السطح المجرد

T_∞ درجة حرارة الهواء

مثال ١١: احسب معدل انتقال الحرارة بالحمل من سطح درجة حرارته 100°C و مساحته 2 m^2

إذا كانت درجة حرارة الهواء المتدفق عليه 25°C و معامل الحمل الحراري بينهما $50 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}}$ ،

ثم احسب مدى التحسين في الحمل الحراري إذا لحم بهذا السطح زعنفة طولية و مستطيلة

المقطع و طولية و مصنوعة من النحاس ($k = 372 \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot ^\circ\text{C}}$) إذا كان طول الزعنفة $L = 20 \text{ cm}$ و

عرضها بعرض السطح و يساوي $w = 10 \text{ cm}$ و سمكها $t = 0,5 \text{ cm}$.

الحل: معدل انتقال الحرارة بالحمل من السطح المجرد (قبل التحسين) هو

$$\begin{aligned} \dot{Q} &= h A \Delta T \\ &= 372 \times 2 \times 75 \\ &= 7500 \text{ W} \\ &= 7.5 \text{ kW} \end{aligned}$$

أما بعد التحسين بزيادة مساحة تبادل الحرارة بواسطة إضافة الزعانف للسطح ، و حيث إن هذه

الزعانف وصفت في السؤال بأنها طولية (أي تغطي كل عرض السطح المجرد) و مستطيلة المقطع

و طولية فيمكن استعمال معادلة ١ - ٢٥ لإيجاد مدى التحسين في الحمل الحراري

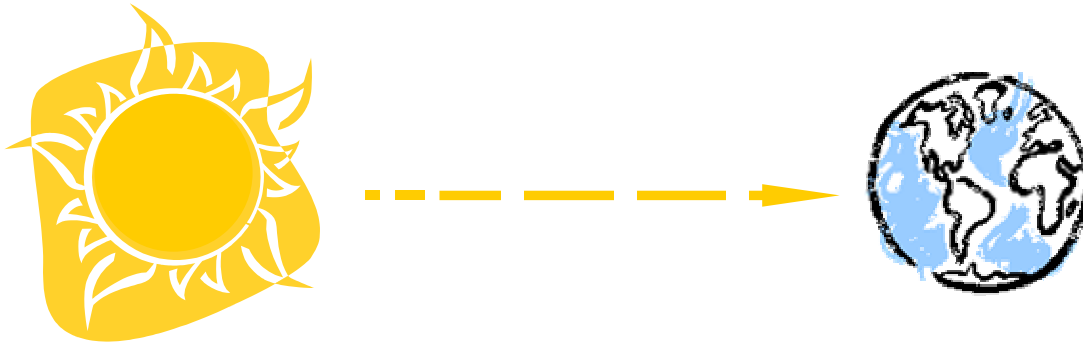
$$\begin{aligned} \dot{Q}_{\text{المحسنة}} &= \sqrt{h k P A_c} (T_b - T_\infty) \\ &= \sqrt{50 \times 273 \times [2(0.005 + 0.1)] \times [2(0.005 + 0.1) \times 0.2]} (100 - 25) \\ &= 9.61 \text{ kW} \end{aligned}$$

الفصل الثالث

انتقال الحرارة بواسطة الإشعاع

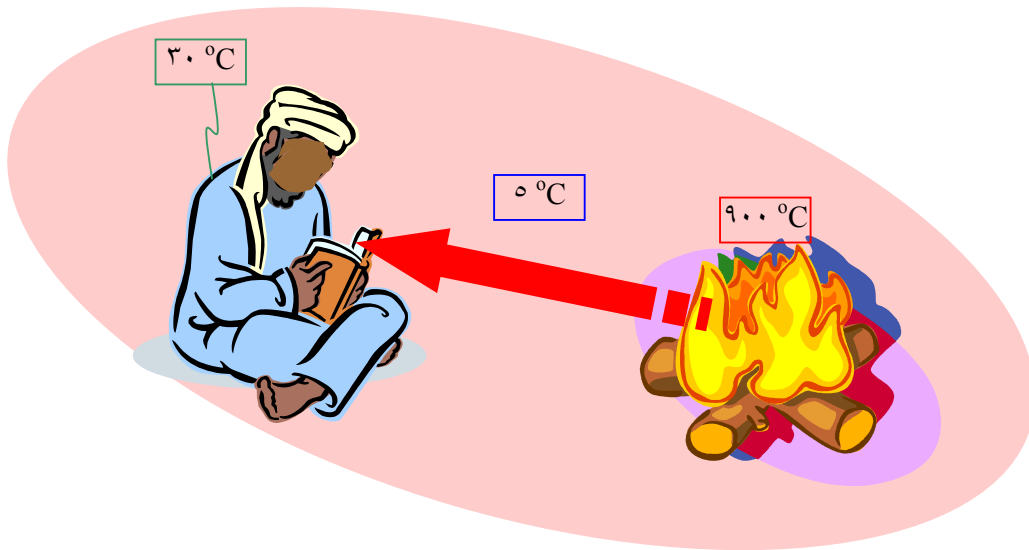
الإشعاع Radiation هو انتقال الطاقة من المادة على شكل موجات كهرومغناطيسية (و تسمى أيضاً فوتونات) بسبب تغير ترتيب الإلكترونات في ذرات المادة . إذا صدر الإشعاع من المادة بسبب درجة حرارتها فهذا هو الإشعاع الحراري الذي يمثل الطريقة الثالثة من طرق انتقال الحرارة . بذلك يختلف الإشعاع الحراري عن أنواع الإشعاع الأخرى ذات المسببات المختلفة كأشعة إكس و أشعة جاما و موجات البث الإذاعي و موجات البث المرئي (التلفزيوني) و التي لا علاقة لها بدرجة حرارة المادة الصادر منها الإشعاع .

يختلف الإشعاع الحراري عن التوصيل الحراري و الحمل الحراري ثلاثة اختلافات رئيسية . الأول أن الإشعاع لا يحتاج إلى وسط ناقل (الشكل ١٥) - كما في الطريقتين الأخرين - حتى أنه لا يتأثر بوجود فراغ تام بين الجسم المشع و الجسم المستقبل ، و أفضل مثال على ذلك انتقال حرارة الشمس إلى الأرض عبر عشرات الملايين من الكيلومترات من الفراغ .



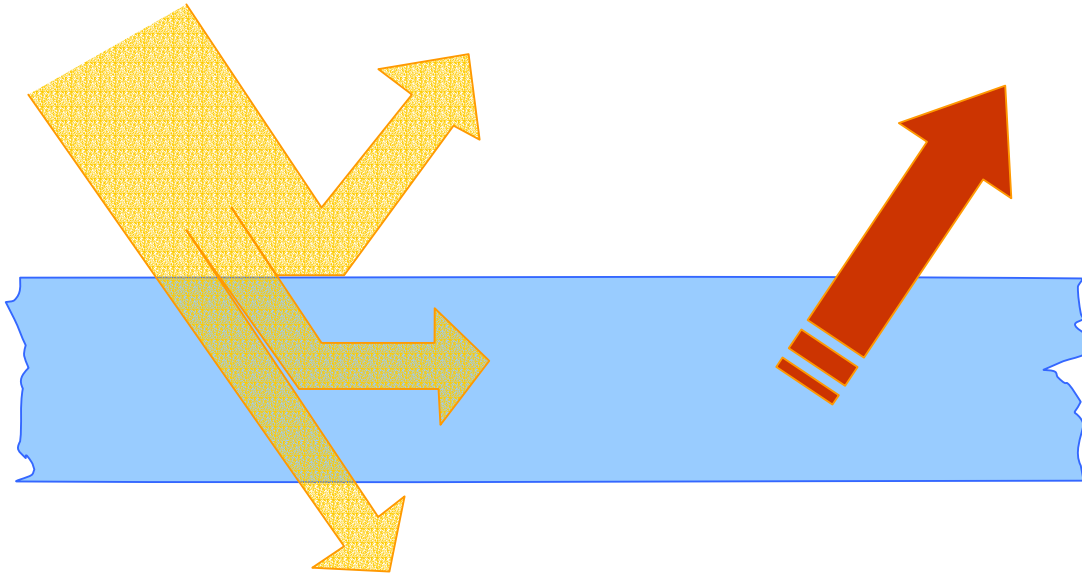
شكل ١٥ : الإشعاع لا يحتاج إلى وسط ناقل

و الفرق الآخر بين الإشعاع الحراري وطرق انتقال الحرارة الأخرى هو أن الحرارة يمكن أن تنتقل بالإشعاع بين سطحين حتى لو كان الوسط بينهما عند درجة حرارة أقل من كلا السطحين (الشكل ١٦) . و أما الفارق الرئيسي الثالث فهو السرعة الهائلة لانتقال الحرارة بالإشعاع و المساوية لسرعة الضوء (٣٠٠,٠٠٠ km/h) .



شكل ١٦ : الإشعاع الحراري ينتقل بين سطحين بغض النظر عن درجة حرارة الوسط

هناك أربع خواص للمادة تحكم الإشعاع الحراري : الانبعاث emissivity و الامتصاص absorptivity و الانعكاس reflection و التمرير transmittion . الانبعاثية emissivity هي خاصية بعث الأجسام جزء من طاقتها الداخلية على شكل أشعة حرارية و هي خاصية متواجدة و دائمة الحدوث من جميع الأجسام بما فيها أجسامنا . و على ذلك فجميع الأجسام معرضة لموجات الإشعاع الحراري المنبعثة من الأجسام الأخرى . في هذه الحالة فإن جزءاً من الأشعة الحرارية المستقبلة ستمتص في الجسم المستقبل و تخزن كطاقة داخلية بحسب قدرته على الامتصاص absorptivity ، و جزء من تلك الطاقة الحرارية الإشعاعية سيمرر (خاصية التمرير transmittion) عبر الجسم (في الأجسام الشفافة و شبه الشفافة) ليكمل انتقاله في نفس اتجاه حركته الأصلية من الجهة الأخرى ، و الجزء الأخير ينعكس (خاصية الانعكاس reflection) على السطح المستقبل و يرتد في اتجاه معاكس لحركته الأصلية (الشكل ١٧) . يجب أن لا يكون هناك خلط بين خاصية الانبعاث و خاصية الانعكاس ، فالانبعاث هو تحول جزء من الطاقة الداخلية للمادة إلى طاقة حرارية إشعاعية (بسبب التغيرات الحادثة في ترتيب الإلكترونات في المدارات الخارجية للذرة) لتشع إلى الخارج ، و الامتصاص هو عكس ذلك تماماً (فهو يزيد الطاقة الداخلية للمادة) . أما الانعكاس فهو عدم استقبال السطح الخارجي للمادة للأشعة الساقطة أو جزء منها و ردها في الاتجاه المعاكس بدون أي تغيير في مستوى الطاقة الداخلية للمادة . و التمرير كذلك لا يؤثر على طاقة المادة لا بالزيادة و لا بالنقص .



شكل ١٧ : خواص الانبعاث و الامتصاص و التمرير و الانعكاس

إذاً الخواص المؤثرة في قدرة المادة على الإشعاع هي الإنبعاث emissivity و الإمتصاص absorptivity. عليه يعرف معدل انتقال الحرارة بالإشعاع الحراري لجسم ما بالفرق بين معدل الطاقة الإشعاعية المنبعثة من سطحه مخصوصاً منه معدل الطاقة الممتصة فيه . فإن كانت الطاقة المنبعثة منه أكبر من الممتصة فيه فإن الجسم يخسر طاقة (جسم مشع) ، و إن كانت الطاقة الممتصة أكبر من المنبعثة فالطاقة الداخلية لهذا الجسم في ازدياد (جسم ممتص) .

فرض المقارنة ؛ يهتم المختصون بمعرفة الطاقة القصوى التي يمكن لجسم ما بعثها إلى الخارج .

تعرف الطاقة القصوى الممكن انبعاثها من الجسم بطاقة الجسم المثالي (و تسمى أيضاً بطاقة الجسم الأسود ، و هو رمزاً لجسم تخيلي ذو قدرة قصوى في بعث الطاقة و قدرة قصوى في امتصاص الطاقة) و تحسب من قانون ستيفن -بولتزمان :

$$(٢٦) \quad \dot{Q}_{\max} = \alpha A T_s^4$$

حيث أن \dot{Q}_{\max} هي أكبر كمية طاقة ممكن انبعاثها (و المسماة بطاقة الجسم الأسود total emissive energy)

α هي رقم ثابت يسمى ثابت ستيفن - بولتزمان و يساوي $5.67 \times 10^{-8} \frac{W}{m^2 K^4}$

A مساحة السطح الخارجي للجسم المثالي

T_s هي درجة حرارة السطح الخارجي للجسم المثالي (و يجب أن تكون بالكلفن K و ليس بالمتوي

(°C)

الانبعاثية	المادة
٠,٠٧	رقائق الألمنيوم (قصدير الطبخ)
٠,٠٣	نحاس ملمع
٠,٠٣	ذهب ملمع
٠,٩٨	طلاء أسود
٠,٩	طلاء أبيض
٠,٩٢ - ٠,٩٧	ورق أبيض
٠,٨٥ - ٠,٩٣	أسفلت معبّد
٠,٩٣ - ٠,٩٦	طوب أحمر
٠,٩٥	جلد الانسان
٠,٨٢ - ٠,٩٢	الخشب
٠,٩٣ - ٠,٦	التربة
٠,٩٦	ماء

جدول ٢ : انبعاثية (ϵ) بعض المواد عند درجة حرارة K ٣٠٠

هذه هي طاقة الجسم الأسود - أي طاقة الجسم المتخيل أنه المثالي - أما الأجسام الحقيقية فالطاقة المنبعثة منها لا بد أن تكون أقل من تلك الكمية المحسوبة بالقانون ٢٤ و يمكن حسابها بمعرفة مدى اقتراب هذا الجسم الحقيقي من المثالية ثم ضرب نسبة القرب هذه في أعلى كمية طاقة المحسوبة من المعادلة ٢٤ . نسبة الاقتراب من المثالية تسمى بالانبعاثية ϵ (و هي النسبة بين القدرة الانبعاثية الكلية للجسم الحقيقي و القدرة الانبعاثية الكلية للجسم الأسود ، الجدول ٢) و منها فإن الطاقة الانبعاثية للأجسام الحقيقية تساوي

$$(٢٧) \quad \dot{Q} = \varepsilon \alpha A T_s^4$$

مثال ١٢: كم معدل الحرارة التي يشعها جسم انسان جالس في وسط غرفة أثناء الشتاء حيث درجة حرارة جدران الغرفة 10°C و درجة حرارة جلد الإنسان 30°C و مساحة السطح الخارجي المكشوف من جسمه 1.4 m^2 و انبعاثية جلد الانسان 0.95 .

الحل: أولاً يجب تحويل درجات الحرارة المئوية إلى درجات حرارة مطلقة (أي بالكلفن K)

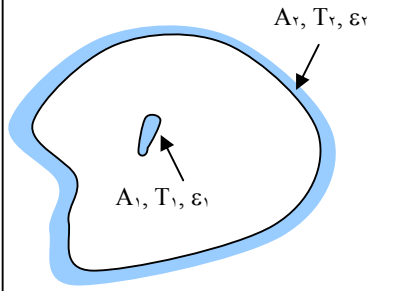
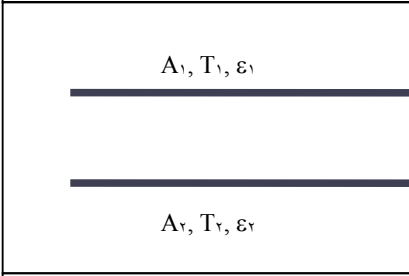
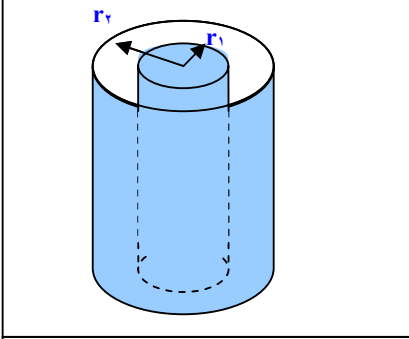
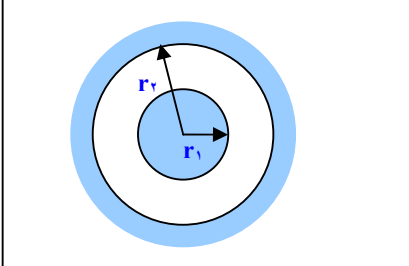
$$T_s = 30 + 273 = 303 \text{ K}$$

$$T_\infty = 10 + 273 = 283 \text{ K}$$

و بالتعويض في المعادلة ٢٦ نحصل على كمية الحرارة التي يفقدها جسم هذا الإنسان بالإشعاع في كل ثانية يبقى فيها داخل هذه الغرفة

$$\begin{aligned} \dot{Q} &= \varepsilon \alpha A (T_s^4 - T_\infty^4) \\ &= 0.95 \times 5.67 \times 10^{-8} \times 1.4 \times (303^4 - 283^4) \\ &= 152 \text{ W} \end{aligned}$$

في حالات أخرى كثيرة يكون الجسمان المشعان المتقابلان متقاربان في مساحة السطح ، حين ذاك يجب أن تؤخذ انبعاثية كلا الجسمين بالحسبان . في الجدول ٣ يوجد معادلات معدل الإشعاع في الحالات الأبسط و الأكثر شيوعاً .

	$\frac{A_1}{A_2} \approx 0$	$\dot{Q}_{12} = A_1 \sigma \varepsilon_1 (T_1^4 - T_2^4)$
	$A_1 = A_2$	$\dot{Q}_{12} = \frac{A_1 \sigma (T_1^4 - T_2^4)}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1}$
	$\frac{A_1}{A_2} = \frac{r_1}{r_2}$	$\dot{Q}_{12} = \frac{A_1 \sigma (T_1^4 - T_2^4)}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1 - \varepsilon_2}{\varepsilon_2} \left(\frac{r_1}{r_2} \right)}$
	$\frac{A_1}{A_2} = \left(\frac{r_1}{r_2} \right)^2$	$\dot{Q}_{12} = \frac{A_1 \sigma (T_1^4 - T_2^4)}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1 - \varepsilon_2}{\varepsilon_2} \left(\frac{r_1}{r_2} \right)^2}$

جدول ٣ : أمثلة مختلفة على الإشعاع الحراري بين جسمين مع معادلاتها

تمارين متنوعة

- س١) علق بصح (✓) أو خطأ (x) على الجمل الآتية : -
- أ - يمكن للحرارة أن تنتقل بأربع طرق مختلفة ()
- ب - التوصيل الحراري هو انتقال الحرارة بين المواد الساكنة ذات درجات الحرارة المتساوية ()
- ج - الحمل الحراري هو انتقال الحرارة بين سطح صلب ومائع متحرك ()
- د - الإشعاع الحراري لا يحتاج لوسط ناقل ()
- هـ - الانعكاس هو رد الأشعة الساقطة إلى الخارج ، و الانبعاث هو طرد جزء من طاقة الجسم على شكل طاقة إشعاعية إلى الخارج ()

س٢) اختر الإجابة الصحيحة : -

أ - الحرارة هي طاقة متنقلة بسبب الفرق في :

١) الضغط (٢) درجات الحرارة (٣) الحجم

ب - الموصلية الحرارية k خاصية للمادة أما معامل التوصيل الحراري فهو :

١) خاصية أيضاً (٢) يتغير بتغير ظروف التدفق (٣) رقم لا بعدي

ج - عند حساب أحمال التكييف لمبنى فإن :

١. الحمل الحراري هو الأهم وباقي الطرق يمكن إهمالها

٢. الإشعاع الحراري هو الأهم وباقي الطرق يمكن إهمالها

٣. التوصيل الحراري هو الأهم وباقي الطرق يمكن إهمالها

٤. جميع طرق انتقال الحرارة مهمة ويجب أخذها بالحسبان

د - في معادلة حساب الإشعاع الحراري يجب أن تكون درجة الحرارة :

أ) بالكلفن K (ب) بالمئوي °C (ج) أي من الوحدتين ولا فرق

هـ - مقاومة التوصيل الحراري هي $\frac{L}{kA}$ ، أما مقاومة الحمل الحراري فهي :

أ) $\frac{L}{hA}$ (ب) $\frac{1}{hA}$ (ج) $\frac{\Delta T}{L}$

س٣) احسب معدل انتقال الحرارة عبر الجدار الموضح في الشكل :

$$A = 1 \text{ m}^2$$

$$T_{\infty 1} = 45 \text{ } ^\circ\text{C} \quad h_1 = 50 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}}$$

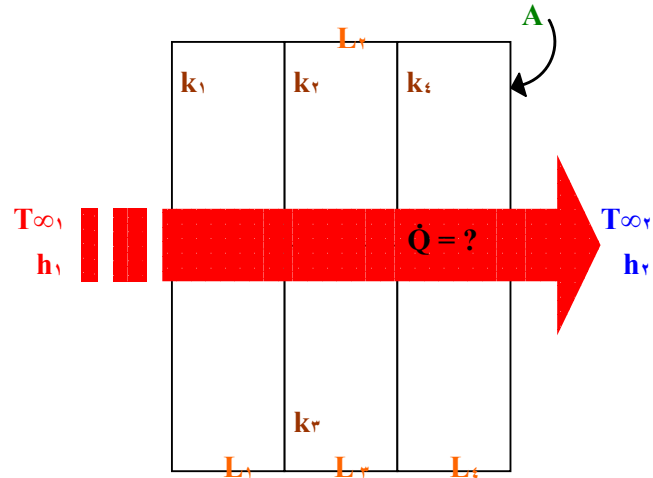
$$L_1 = 5 \text{ cm} \quad k_1 = 0,1 \frac{\text{W}}{\text{m } ^\circ\text{C}}$$

$$L_2 = 15 \text{ cm} \quad k_2 = 0,6 \frac{\text{W}}{\text{m } ^\circ\text{C}}$$

$$L_3 = L_4 \quad k_3 = 0,8 \frac{\text{W}}{\text{m } ^\circ\text{C}}$$

$$L_5 = 10 \text{ cm} \quad k_5 = 0,5 \frac{\text{W}}{\text{m } ^\circ\text{C}}$$

$$T_{\infty 2} = 25 \text{ } ^\circ\text{C} \quad h_2 = 50 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}}$$



س٤) زيت محركات درجة حرارته $60 \text{ } ^\circ\text{C}$ يتدفق فوق سطح أفقي مستوٍ طوله 5 m درجة حرارته $20 \text{ } ^\circ\text{C}$ بسرعة 2 m/s احسب معدل انتقال الحرارة بين المائع والسطح .

س٥) رجل جالس في وسط غرفة كبيرة . إذا كان درجة حرارة الرجل الخارجية $30 \text{ } ^\circ\text{C}$ ودرجة حرارة جدران الغرفة $10 \text{ } ^\circ\text{C}$ وسطح جسم الرجل الخارجي $1,75 \text{ m}^2$ وانبعاثية جلد الإنسان $0,95$ ، فكم معدل انتقال الحرارة بالإشعاع من جسم هذا الرجل؟

ملحق (١)

طريقة إيجاد لزوجة سائل أو غاز عند درجة حرارة معطاة

. تحدد أولاً الإحداثيات (X, Y) المناظرة للسائل أو الغاز من الجداول المرفقة بالمخطط البياني

. توقع هذه الإحداثيات على المخطط البياني

. توصل النقطة البيانية الناتجة بخط مستقيم مع قيمة درجة الحرارة المعطاة والموقعة على تدرج درجة

الحرارة

. يمد الخط المستقيم من الناحية المواجهة لتدرج اللزوجة حتى يقطع التدرج ونقطة التقاطع هي قيمة

لللزوجة بوحدات cp (تنطق سنتيبواز)

مثال:

باتباع الخطوات السابقة حدد لزوجة كل من الهواء والماء عند ٤٠°C و ١atm

لزوجة الهواء: $٠,٠١٧\text{cp}$

لزوجة الماء: $٠,٧\text{cp}$

ملحق (٢)

طريقة إيجاد معامل الاحتكاك لسائل داخل أنبوبة دائرية

١. يحدد أولاً رقم رينولدز لسريان السائل
٢. في حالة السريان الدوامي فقط، تحدد درجة خشونة الأنبوبة النسبية حسب المادة المصنوع منها الأنبوبة ويفرض أن الأنبوبة ملساء إذا لم تعرف المادة المصنوعة منها الأنبوبة
٣. يتم تحديد قيمة معامل الاحتكاك حسب رقم رينولدز فقط إذا كان السريان طبقياً، أو حسب رقم رينولدز ودرجة الخشونة النسبية إذا كان السريان دوامياً

مثال:

باتباع الخطوات السابقة ، حدد قيمة معامل الاحتكاك إذا كان $Re = 125000$ لأنبوبة مصنوعة من

الصلب التجاري وقطرها الداخلي 1 cm

السريان دوامي $\rightarrow Re = 1,3 \times 10^5$

$$\varepsilon/D = (4,6 \times 10^{-5} / 0,01) \sim 5 \times 10^{-3} \rightarrow f = 0,009$$

ملحق (٣)

الثوابت الهامة ومعاملات التحويل

الطول

$$1 \text{ in} = 2,54 \text{ cm}$$

$$1 \text{ m} = 3,2808 \text{ ft}$$

الحجم

$$1 \text{ L} = 1000 \text{ cm}^3$$

$$1 \text{ m}^3 = 1000 \text{ L}$$

$$1 \text{ ft}^3 = 28,317 \text{ L}$$

معامل التحويل للنيوتن

$$1 \text{ g}_c = 980,6 \text{ g cm/dyn s}^2 = 32,174 \text{ lb}_m \cdot \text{ft/lb}_f \cdot \text{s}^2 = 1 \text{ kg m/N s}^2$$

الضغط

$$1 \text{ atm} = 14,7 \text{ psia} = 101,3 \text{ kPa} = 760 \text{ mmHg}$$

اللزوجة

$$1 \text{ cp} = 10^{-2} \text{ g/cm.s (poise)} = 10^{-2} \text{ Pa.s} = 10^{-2} \text{ kg/m.s} = 10^{-2} \text{ N.s/m}^2$$

القدرة

$$1 \text{ hp} = 0,745 \text{ kW}, 1 \text{ J/s} = 1 \text{ W}$$

المراجع

١. Cengel, Y.A and Boles, M.A., "Thermodynamics, An Engineering Approach", ٢nd edition, McGraw –Hill Inc, ١٩٩٤
٢. Coulson, J.M. and Richardson, J.F, "Coulson Chemical Engineering Series", ٤th edition, volume ١, Pergamon Press, ١٩٩١
٣. Geankoplis, C., "Transport Processes and Unit Operations", ٣rd edition, McGraw-Hill Inc, USA, ١٩٩٣
٤. McCabe, W., Smith, J., Harriot, P., "Unit Operations of Chemical Engineering", ٤th edition, McGraw–Hill Inc, USA, ١٩٨٥
٥. Smith, J.M., and Van Ness, J.F., "Introduction to Chemical Engineering Thermodynamics", McGraw-Hill Inc, USA, ١٩٨٧
٦. Yunus A. Gengel, "Heat Transfer, a Practical Approach", McGraw –Hill Inc, ١٩٩٨
٧. Yunus A. Gengel, Robert H Turner, "Fundamentals of Thermal-Fluid Sciences", McGraw-Hill Inc, ٢٠٠١

المحتويات

الوحدة الأولى

١	الموائع
٢	سكون الموائع
٢	طبيعة المائع
٢	مفهوم الضغط
٣	مبدأ التوازن الهيدروستاتيكي
٤	وحدات الضغط
٥	الضغط الجوي والضغط المقاس والضغط المطلق
٥	أجهزة قياس الضغط
٥	عداد بوردون
٦	المانومتريات
١٠	تمارين متنوعة ١
١٥	الفصل الثاني : اللزوجة
١٥	إجهاد القص
١٥	قانون نيوتن للزوجة
١٦	وحدات اللزوجة الديناميكية
١٦	تأثير درجة الحرارة والضغط على اللزوجة الديناميكية
١٧	الفصل الثالث : حركة الموائع
١٧	تجربة رينولدز
١٧	رقم رينولدز
١٨	تحليل حركة المائع
٢٠	الفصل الرابع : معادلات التوازن الكلية
٢٠	معادلة الاستمرارية
٢١	معادلة توازن الطاقة الميكانيكية
٢١	تطبيقات معادلة برنولي
٢٣	تصحيح معادلة برنولي لتأثير الاحتكاك

٢٣	الاحتكاك السطحي
٢٥	الاحتكاك البنائي
٢٦	فقد الضغط والاحتكاك
٢٧	الفصل الخامس : الصمامات والمضخات
٢٧	أنواع الصمامات
٢٨	المضخات
٢٨	المضخات الازاحية الموجبة
٢٩	المضخة الطاردة المركزية
٣٠	ظاهرة التكيف في المضخة الطاردة المركزية
٣١	تمارين متنوعة ٢
٤٠	امتحان ذاتي ١
٤١	إجابة امتحان ذاتي ١
٤٢	امتحان ذاتي ٢
٤٣	إجابة امتحان ذاتي ٢

الوحدة الثانية

٤٥	الفصل الأول : المفاهيم الأساسية في علم الديناميكا الحرارية
٥١	الفصل الثاني : تصنيف الطاقة في الديناميكا الحرارية
٥٢	الشغل الميكانيكي
٥٥	أنواع الموائع الشغالة
٥٥	الغاز المثالي
٥٦	الماء وأطواره المختلفة
٥٧	تحديد حالة الماء الطورية
٥٩	الفصل الثالث : القانون الأول للديناميكا الحرارية
٥٩	الأنظمة المغلقة
٥٩	الانتالبي
٦١	السعة الحرارية

٦١	حساب التغير في الانثالي والبطاقة الداخلية للغازات المثالية
٦٢	القانون الأول للديناميكا الحرارية للأنظمة المفتوحة
٦٣	الفصل الرابع : مقدمة في القانون الثاني للديناميكا الحرارية
٦٣	دورة توليد القدرة من البخار
٦٥	تمارين متنوعة ٣
٧٠	امتحان ذاتي ٣
٧١	إجابة امتحان ذاتي ٣

الوحدة الثالثة

٧٣	مقدمة : الحرارة
٧٥	الفصل الأول : التوصيل الحراري
٨٠	قدرة التوصيل و مقاومة التوصيل
٨٢	انتقال الحرارة عبر المواد المجمعّة
٨٨	التوصيل الحراري عبر الأنابيب
٩١	الفصل الثاني : الحمل الحراري
٩٤	حساب معامل الحمل الحراري
١٠٣	المقاومة الحرارية العامة R_U و معامل انتقال الحرارة العام U
١٠٥	الأسطح الممتدة (الزعانف الحرارية)
١٠٨	الفصل الثالث : الإشعاع الحراري
١١٤	تمارين متنوعة ٤
١١٦	ملحق ١ : طريقة إيجاد لزوجة سائل أو غاز عند درجة حرارة معطاة
١١٧	ملحق ٢ : طريقة إيجاد معامل الاحتكاك لسائل داخل أنبوبة دائرية
١١٨	ملحق ٣ : الثوابت الهامة ومعاملات التحويل
١١٩	المراجع

تقدر المؤسسة العامة للتعليم الفني والتدريب المهني الدعم

المالي المقدم من شركة بي آيه إي سيستمز (العمليات) المحدودة

GOTEVOT appreciates the financial support provided by BAE SYSTEMS

BAE SYSTEMS