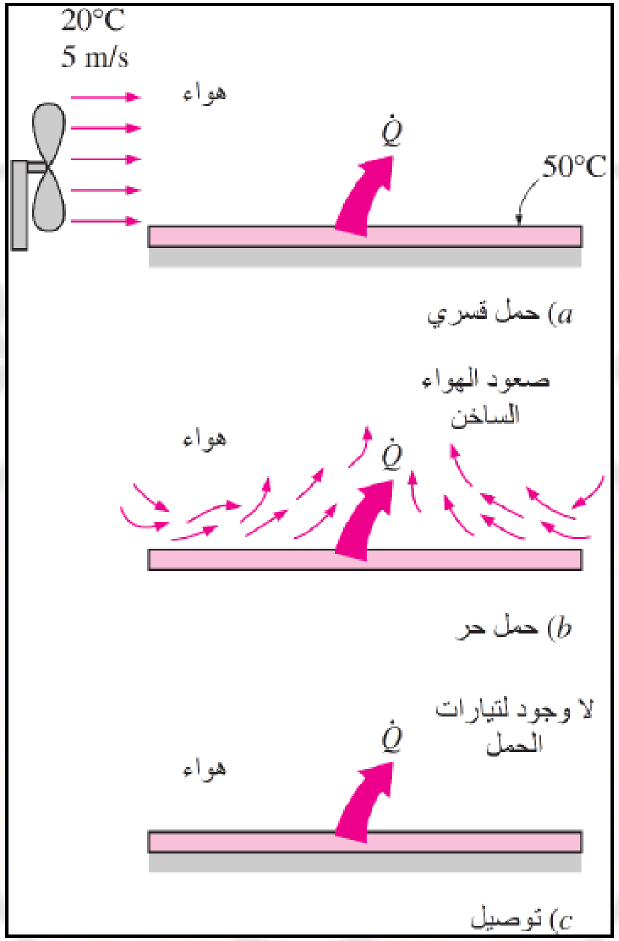
المحاضرة ٥

انتقال الحرارة
الكلية التطبيقية
السنة الثانية – تدفئة وتكييف وتبريد

أسس الحمل الحراري

م. مرح تامر
18 /11 /2025

الفصل الرابع
أسس الحمل الحراري
Fundamentals of Convection



الشكل (4 – 1) انتقال الحرارة من سطح ساخن إلى سائل مجاور.

$$\dot{q}_{conv} = \alpha\left(T_s - T_\infty\right) \qquad \left[\mathrm{W/m^2}\right] \qquad \textbf{(1 – 4)}$$

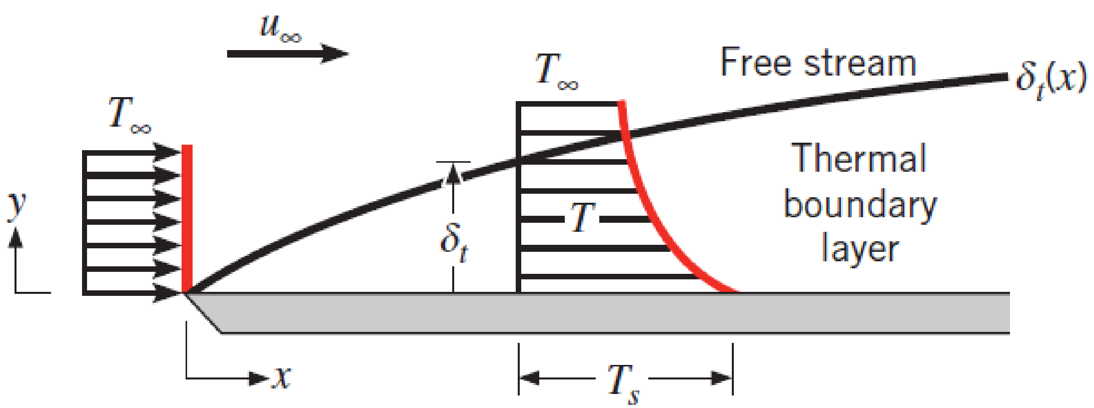
$$\dot{Q}_{conv} = \alpha A_s\left(T_s - T_\infty\right) \qquad \left[\mathrm{W}\right] \qquad \textbf{(2 – 4)}$$

α: معامل انتقال الحرارة بالحمل. $\left[\mathrm{W/m^2\,.^\circ C}\right]$

A_s: مساحة سطح التبادل الحراري. $\left[\mathrm{m^2}\right]$

T_s: درجة حرارة السطح. $\left[{}^\circ\mathrm{C}\right]$

T_∞: درجة حرارة التيار الحر للسائل. $\left[{}^\circ\mathrm{C}\right]$



$$T = T_s \qquad at \quad y = 0$$
$$T = T_\infty \qquad at \quad y = \delta_t$$

$$\dot{q}_{conv} = \alpha\left(T_s - T_\infty\right) \qquad \left[\mathrm{W/m^2}\right]$$

$$\dot{q}_{cond} = -\lambda_{fluid} \left.\frac{\partial T}{\partial y}\right|_{y=0} \qquad \left[\mathrm{W/m^2}\right]$$

$$\dot{q}_{conv} = \dot{q}_{cond}$$

$$\alpha = \frac{-\lambda_{fluid}\left(\partial T/\partial y\right)_{y=0}}{T_s - T_\infty}$$

والتي تستخدم في تحديد معامل انتقال الحرارة بالحمل في حال كان توزع درجة الحرارة ضمن السائل معروفاً.

في الحالة العامة، فإن معامل انتقال الحرارة بالحمل يتغير على طول الجريان، وبالتالي فإن معامل الحمل الوسطي في هذه الحالة يؤخذ كمتوسط حسابي لمعاملات الحمل الموضعية على كامل السطح.

$$\alpha = \frac{1}{L}\int_0^L \alpha_x\,dx \qquad \dot{Q} = \alpha A_s\left(T_s - T_\infty\right)$$

مبادئ انتقال الحرارة بالحمل

في أثناء دراسة انتقال الحرارة بالحمل فإننا عادةً ما نقوم بتحويل المعادلات الناظمة إلى الشكل اللابعدي، وذلك باستخدام الأعداد اللابعدية، بهدف التقليل من عدد المتحولات في أثناء الدراسة. وبشكل مشابه فإننا نقوم بتحويل معامل انتقال الحرارة بالحمل إلى شكل لا بعدي عن طريق عدد نوسلت، والذي يعرف بالعلاقة:

1 عدد نوسلت *Nusselt Number*:

يمثل نسبة السيالة الحرارية بالحمل إلى السيالة المنتقلة بالتوصيل

$$Nu = \frac{q_{conv}}{q_{cond}} = \frac{\Delta T}{\frac{\lambda \Delta T}{L}} = \frac{\alpha L}{\lambda}$$

$$Nu = \frac{\alpha L_c}{\lambda} \qquad (5-4)$$

λ : الموصلية الحرارية للسائل.

L_c : الطول المميز characteristic length.

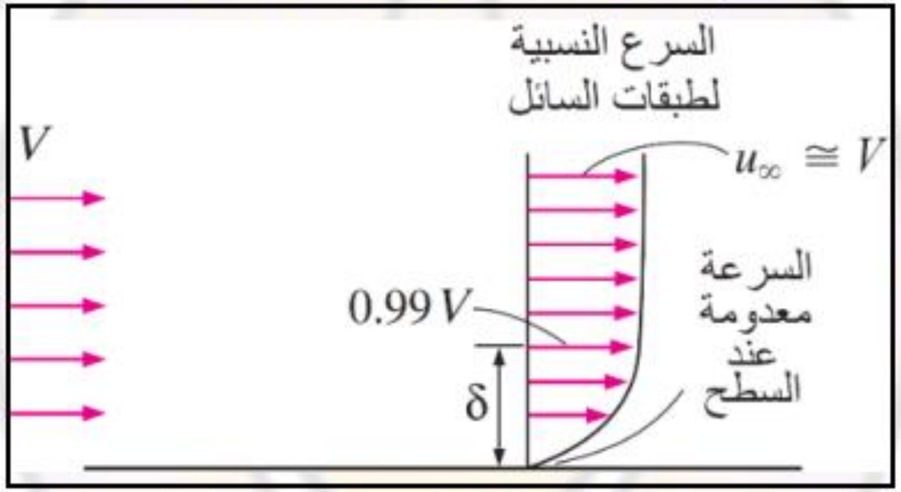
2 عدد براندل *Prandel Number*:

يعطي عدد براندل التوصيف الأفضل للعلاقة بين سماكة الطبقة الحدية الحركية والطبقة الحدية الحرارية، وهو عدد لا بعدي يوصف بالعلاقة:

$$\mathrm{Pr} = \frac{\text{الانتشارية الحركية للجزئيات}}{\text{الانتشارية الحرارية في الجزئيات}} = \frac{\nu}{a} = \frac{\mu c_p}{\lambda} \qquad (9-4)$$

الانتشارية الحركية : يعبر عنها باللزوجة الحركية ν

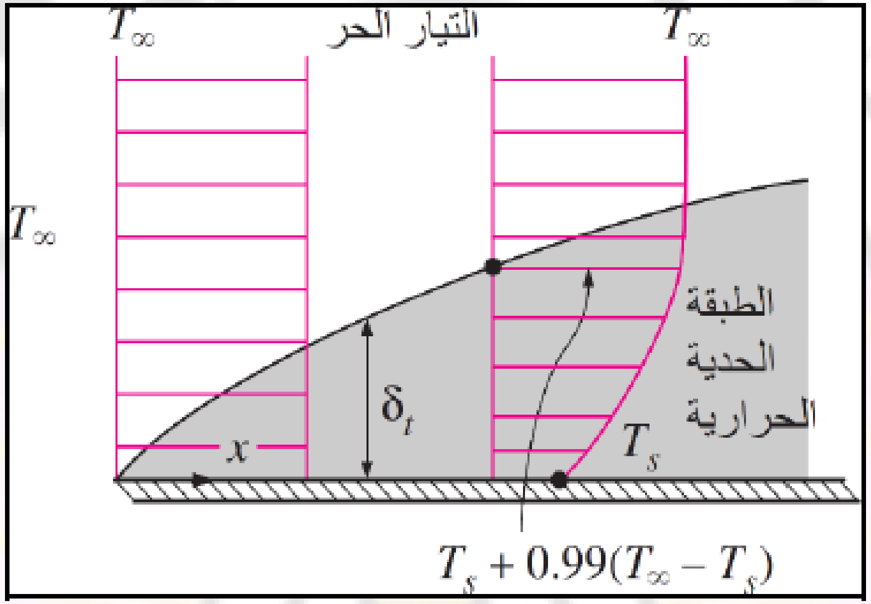
الانتشارية الحرارية: يعبر عنها بمعامل الانتشارية a



الشكل (4 – 7) تطور الطبقة الحدية على سطح مستوٍ بتأثير عدم الانزلاق.

الجدول (4 – 1) قيم عدد براندل لبعض السوائل.

السائل	عدد براندل Pr
معادن سائلة	0.004 – 0.03
غازات	0.7 – 1
ماء	1.7 – 13.7
سوائل عضوية خفيفة	5 – 50
زيوت	50 – 100,000
غليسيرين	2000 – 100,000



الشكل (4 – 9) الطبقة الحدية الحرارية على صفيحة مستوية.

الجريانات الصفائحية والمضطربة *Laminar and Turbulent Flows*:

3 عدد رينولدز *Reynolds Number*:

هو عدد لا بعدي يصف جريان المائع هل هو صفحي أم مضطرب

$$\mathbf{Re} = \frac{\text{قوى العطالة}}{\text{قوة للزوجة}} \Rightarrow Re = \frac{V.L_c}{\nu} = \frac{\rho.V.L_c}{\mu}$$

V: السرعة المنتظمة للمنبع،

L_c: الطول المميز للشكل.

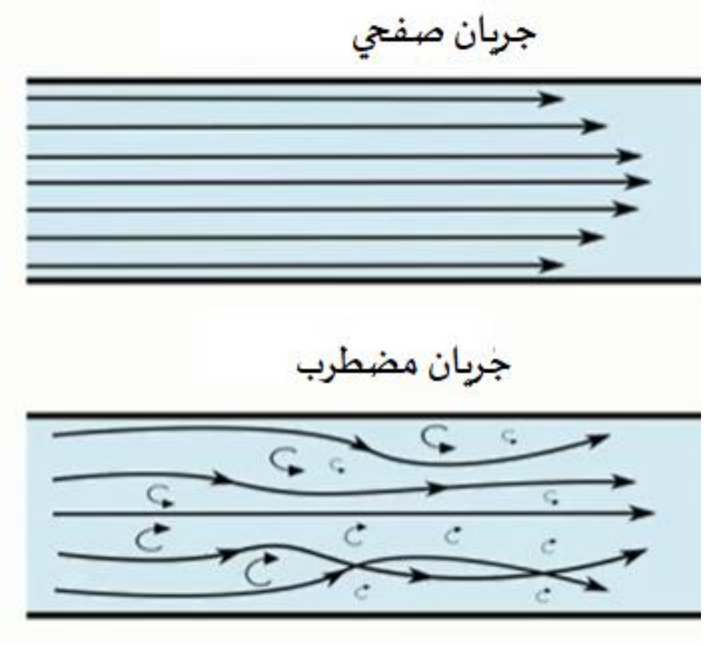
ν: اللزوجة الحركية للسائل.

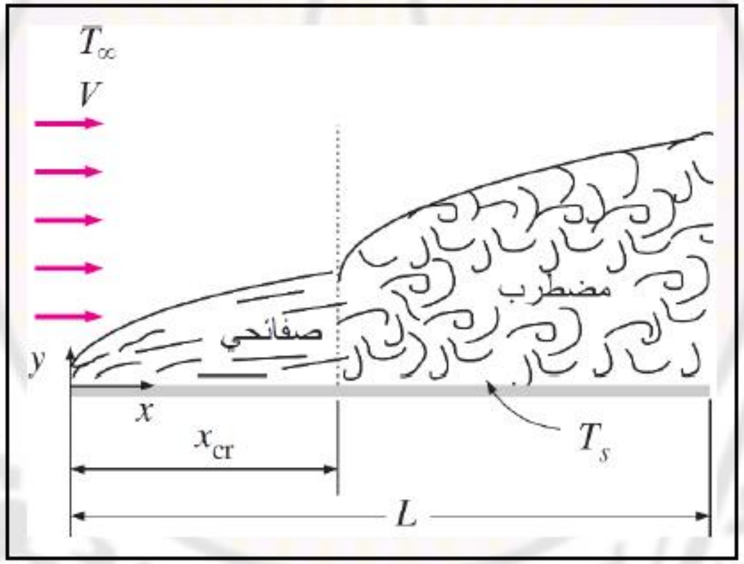
تعرف القيمة الحرجة لعدد رينولدز critical Reynolds number بأنها القيمة التي يتحول عندها الجريان من صفائحي إلى مضطرب.

تختلف القيمة الحرجة لعدد رينولدز باختلاف الشكل الهندسي،

فمن أجل جريان على صفيحة مستوية:

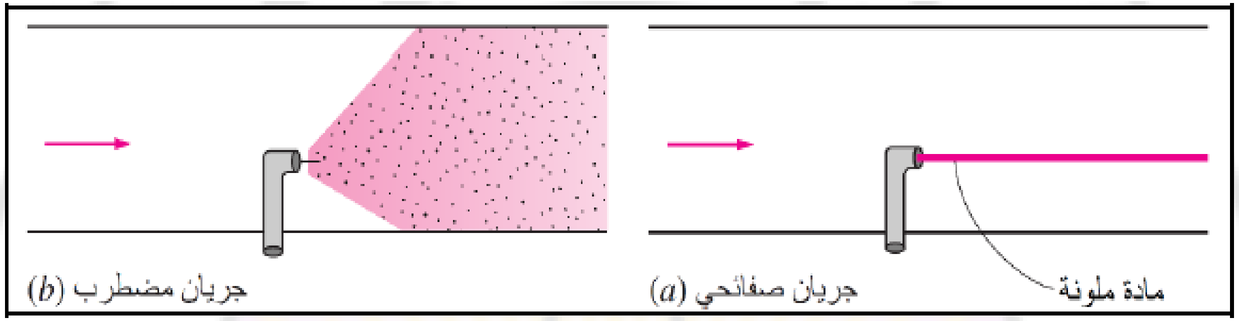
$$\mathrm{Re}_{cr} = \frac{Vx_{cr}}{\nu} = \frac{u_{\infty}x_{cr}}{\nu} = 5.10^5$$





الشكل (4 – 14) المنطقتان الصفائحية والمضطربة ضمن الطبقة الحدية لجريان على صفيحة مستوية.

الجريانات الصفائحية والمضطربة *Laminar and Turbulent Flows*:

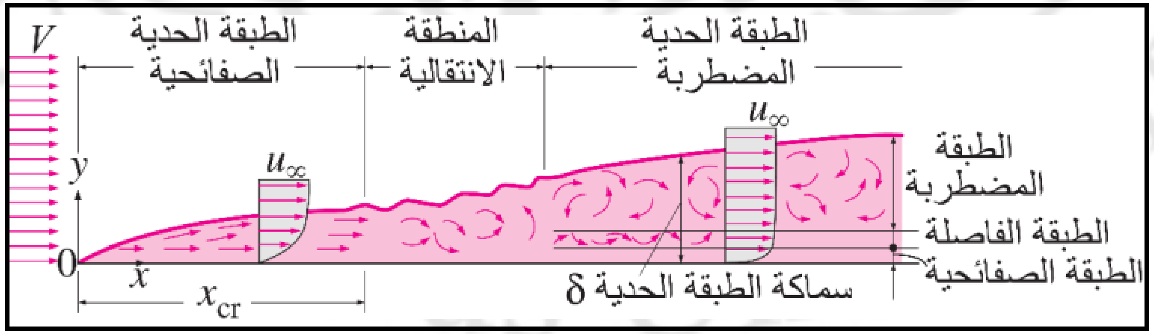


الشكل (4 – 10) مراقبة سلوك سائل أثناء الجريان باستخدام مادة ملونة.

– في الحالة الأولى حيث سرعة السائل منخفضة، تكون خطوط التيار قليلة التموج، وتكون حركة السائل منتظمة بشكل كبير، ويكون نظام الجريان في هذه الحالة صفائحياً laminar.

– في الحالة الثانية نلاحظ حدوث تموجات في السرعة، واضطرابات شديدة في حركة السائل، ويكون نظام الجريان مضطرباً turbulent.

– لا يحدث الانتقال من النظام الصفائحي إلى المضطرب بشكل مفاجئ، وإنما يحدث في منطقة يتقلب فيها الجريان بين الصفائحي والمضطرب، قبل أن يصبح مضطرباً بشكل كامل، ويسمى نظام الجريان في هذه الحالة بالنظام الانتقالي transition regime.



الشكل (4 – 6) تطور الطبقة الحدية لجريان سائل على صفيحة، والمناطق المختلفة للجريان.

– تتضمن الطبقة الحدية المضطربة ثلاث طبقات

- طبقة رقيقة جداً بالقرب من السطح، حيث يكون تأثير اللزوجة كبيراً، وتسمى بالطبقة الصفائحية
- الطبقة الفاصلة وفي هذه الطبقة يكون تاثير الاضطراب واضحاً ولكن ليس له التأثير الغالب على الانتشار.
- الطبقة المضطربة حيث يكون تأثير الاضطراب هو السائد.

إن الخلط الشديد لجزيئات السائل في الجريان المضطرب يعزز من انتقال الحرارة وكمية الحركة بين جزيئات السائل ، مما يزيد من قوة الاحتكاك على السطح.

ونلاحظ أن كلاً من انتقال الحرارة ومعامل الاحتكاك يأخذ قيمة أعظمية عندما يصبح الجريان مضطرباً بشكل كامل.

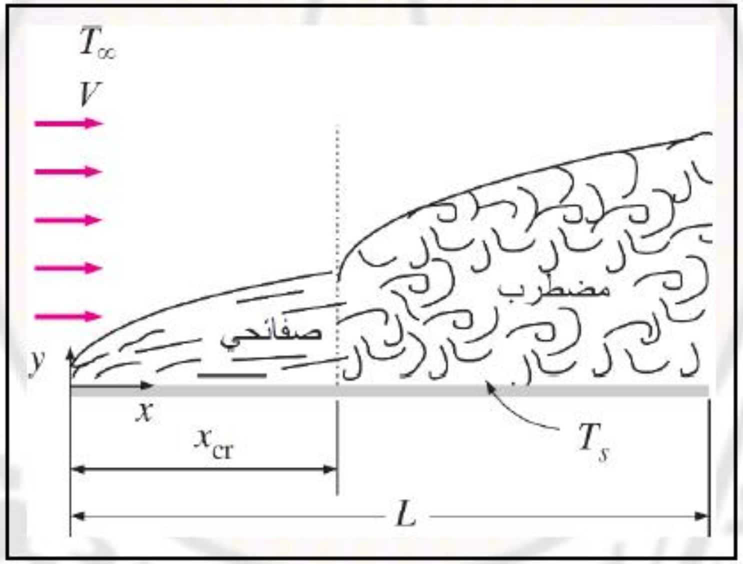
الجريانات الصفائحية والمضطربة *Laminar and Turbulent Flows*:

4 - 10 - الجريان الموازي على صفيحة مستوية

بفرض أن سائلاً ما يجري بشكلٍ موازٍ على صفيحة مستوية طولها L، يقترب السائل من الصفيحة بسرعة منبع V، ودرجة حرارة T_∞. في البداية يكون الجريان ضمن الطبقة الحدية الحركية صفائحياً، ولكن في حال كانت الصفيحة طويلة بما فيه الكفاية، فإن الجريان ضمن الطبقة الحدية يتحول إلى جريان مضطرب عند مسافة x_{cr}، حيث يبلغ عدد رينولدز قيمة حرجة.

$$\mathrm{Re}_x = \frac{\rho V x}{\mu} = \frac{Vx}{\nu}$$

حيث إن قيمة عدد رينولدز تتغير على طول الصفيحة لتصبح عند نهاية الصفيحة $\mathrm{Re}_L = VL/\nu$.



الشكل (4 – 14) المنطقتان الصفائحية والمضطربة ضمن الطبقة الحدية لجريان على صفيحة مستوية.

في حالة الجريان على صفيحة مستوية، فإن تحول الجريان من صفائحي إلى مضطرب يحدث عادةً عند قيمة حدية لعدد رينولدز مساوية إلى:

$$\mathrm{Re}_{cr} = \frac{\rho V x_{cr}}{\mu} = 5.10^5$$

➢ الجريان الموازي على صفيحة مستوية

يعطى عدد نوسلت الموضعي لجريان موازٍ على صفيحة مستوية بالعلاقة:

جريان صفائحي:

$$Nu_x = \frac{\alpha_x x}{\lambda} = 0.332\,Re_x^{0.5} Pe^{1/3} \quad ;Pr > 0.6$$

جريان مضطرب:

$$Nu_x = \frac{\alpha_x x}{\lambda} = 0.0296\,Re_x^{0.8} Pr^{1/3} \qquad \begin{matrix} 0.6 \le Pr \le 60 \\ 5.10^5 \le Re_x \le 10^7 \end{matrix}$$

معامل انتقال الحرارة الوسطي لكامل الصفيحة **(عدد نوسلت على كامل الصفيحة)**

جريان صفائحي:

$$Nu = \frac{\alpha L}{\lambda} = 0.664\,Re_L^{0.5} Pr^{1/3} \quad ;Re_L < 5.10^5$$

جريان مضطرب:

$$Nu = \frac{\alpha L}{\lambda} = 0.037\,Re_L^{0.8} Pr^{1/3} \qquad \begin{matrix} 0.6 \le Pr \le 60 \\ 5.10^5 \le Re_L \le 10^7 \end{matrix}$$

في حال كان الجريان على الصفيحة مؤلفاً من منطقتين صفائحية ومضطربة

$$Nu = \frac{\alpha L}{\lambda} = \left(0.037\,Re_L^{0.8} - 871\right) Pr^{1/3} \qquad \begin{matrix} 0.6 \le Pr \le 60 \\ 5.10^5 \le Re_L \le 10^7 \end{matrix}$$

مسألة (5–1):

زيت محرك درجة حرارته $60\ ^\circ\mathrm{C}$ يجري بسرعة $2\,\mathrm{m/s}$ على السطح العلوي لصفيحة مستوية، على طول $5\,\mathrm{m}$، ودرجة حرارة السطح $20\ ^\circ\mathrm{C}$. معدل انتقال الحرارة من أجل واحدة العرض لكامل الصفيحة.

الخواص:

$$\rho = 876\,\mathrm{kg/m^3} \qquad \mathrm{Pr} = 2870$$

$$\lambda = 0.144\,\mathrm{W/m.K} \qquad \nu = 242\times10^{-6}\,\mathrm{m^2/s}$$

الافتراضات:

1. الجريان مستقر وغير قابل للانضغاط.
2. القيمة الحرجة لعدد رينولدز $\mathrm{Re}_{cr} = 5\times10^5$.

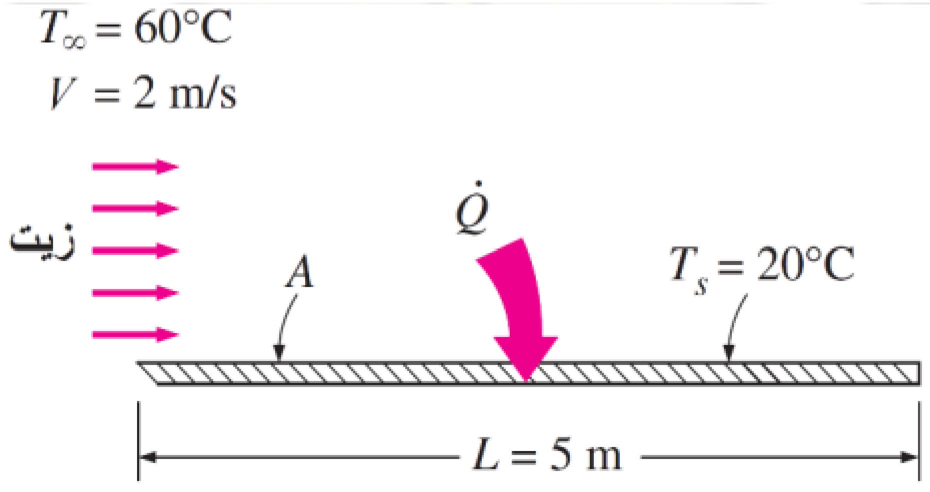
الحل:

نحسب رقم رينولدز لتحديد نوع الجريان على كامل الصفيحة المستوية

بما أن طول الصفيحة هو $L = 5\,\mathrm{m}$، فإن عدد رينولدز عند نهاية الصفيحة هو:

$$\mathrm{Re}_L = \frac{VL}{\nu} = \frac{2\,\mathrm{m/s}\times5\,\mathrm{m}}{0.242\times10^{-5}\,\mathrm{m^2/s}} = 4.13\times10^4 < 5\times10^5$$

بالتالي، فإن الجريان صفائحي على كامل الصفيحة



نحسب عدد نوسلت من العلاقة التالية:

جريان صفائحي:

$$\mathrm{Nu} = \frac{\alpha L}{\lambda} = 0.664\,\mathrm{Re}_L^{0.5}\mathrm{Pr}^{1/3} \quad ;\mathrm{Re}_L < 5.10^5$$

$$\mathrm{Nu} = 0.664\times\left(4.13\times10^4\right)^{0.5}\times2870^{1/3} = 1918$$

ومنه:

$$\alpha = \frac{\lambda}{L}\mathrm{Nu} = \frac{0.144\,\mathrm{W/m.K}}{5\,\mathrm{m}}(1918) = 55.2\,\mathrm{W/m^2.K}$$

ومن قانون نيوتن في التبريد:

$$\dot{Q} = \alpha A_s\left(T_\infty - T_s\right)$$
$$= 55.2\,\mathrm{W/m^2.K}\times(5\times1)\,\mathrm{m^2}\,(60-20)\,^\circ\mathrm{C}$$
$$= 11,040\,\mathrm{W}$$

مسألة (5-2):

يتدفق هواء بدرجة حرارة $30\,^{\circ}C$ وبسرعة $6\,m/s$ على صفيحة مستوية درجة حرارتها $120\,^{\circ}C$، وأبعادها $2.5\,m\times 8\,m$.

احسب معدل انتقال الحرارة من الصفيحة إذا كان الجريان موازياً لـ

1 – الجانب الذي طوله $8\,m$.

2 – الجانب الذي طوله $2.5\,m$

الافتراضات:

1. شروط الحالة المستقرة.
2. القيمة الحرجة لعدد رينولدز $Re_{cr}=5\times10^{5}$.

الخواص:

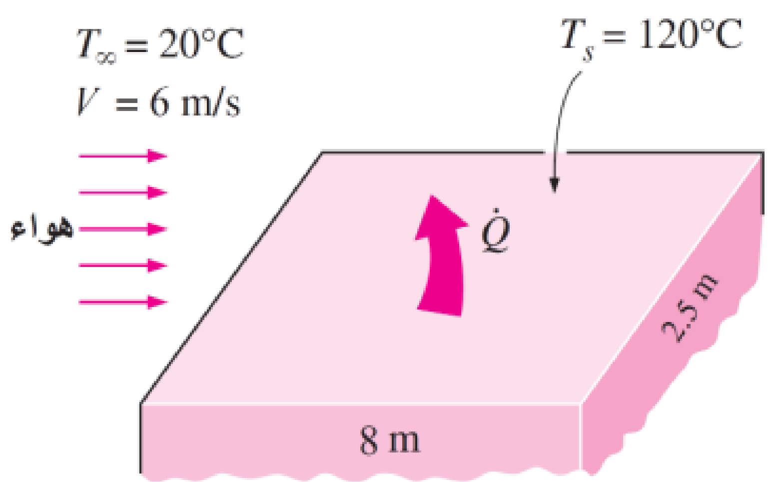
$$\lambda=0.02917\,W/m.K \quad , \quad Pr=0.7166 \quad \nu=2.486\times10^{-5}\,m^2/s$$

الحل:

1. عندما يكون الجريان باتجاه الطول $8\,m$ فإن قيمة عدد رينولدز هي:

$$Re_L=\frac{V_\infty L}{\nu}=\frac{6\,m/s\times 8\,m}{2.486\times10^{-5}\,m^2/s}=1.931\times10^{6}$$

وهي أكبر من القيمة الحرجة لعدد رينولدز، بالتالي لدينا جريان مشترك، صفائحي ومضطرب.



ونحسب معامل الحمل الحراري الوسطي باستخدام العلاقة

$$Nu=\frac{\alpha L}{\lambda}=\left(0.037\,Re_L^{0.8}-871\right)Pr^{1/3}$$

$$=\left[0.037\left(1.931\times10^{6}\right)^{0.8}-871\right]\left(0.7166\right)^{1/3}=2757$$

$$\alpha=\frac{\lambda}{L}Nu$$

$$=\frac{0.02917\,W/m.K}{8\,m}(2757)=10.05\,W/m^2.K$$

من قانون نيوتن للتبريد نحسب معدل انتقال الحرارة بالحمل من الصفيحة:

حيث

$$A_s=WL=2.5\,m\times 8\,m=20\,m^2$$

$$\dot{Q}=\alpha A_s\left(T_\infty-T_s\right)$$

$$=10.05\,W/m^2.K\times 20\,m^2\,(120-30)\,°C=18,096\,W$$

2. إذا كان الجريان باتجاه العرض $2.5\,m$ فإن قيمة عدد رينولدز:

$$Re_L = \frac{V_\infty L}{\nu} = \frac{6\,m/s \times 2.5\,m}{2.486\times10^{-5}\,m^2/s} = 6.034\times10^5$$

وهي أكبر من القيمة الحرجة لعدد رينولدز

وبالتالي لدينا جريان مشترك، صفائحي ومضطرب.

نكرر خطوات الحل التي اتبعناها في الطلب الأول:

$$Nu = \frac{\alpha L}{\lambda} = \left(0.037\,Re_L^{0.8} - 871\right)Pr^{1/3}$$

$$= \left[0.037\left(6.034\times10^5\right)^{0.8} - 871\right]\left(0.7166\right)^{1/3} = 615.1$$

$$\alpha = \frac{\lambda}{L}Nu = \frac{0.029717\,W/m.K}{2.5\,m}(615.1) = 7.177\,W/m^2.K$$

$$\dot{Q} = \alpha A_s\left(T_\infty - T_s\right)$$

$$= 7.177\,W/m^2.K \times 20\,m^2\,(120-30)\,^\circ C = 12{,}919\,W$$

المناقشة:

1. نلاحظ أن لاتجاه الجريان تأثيراً مهماً على انتقال الحرارة بالحمل من أو إلى السطح.

ففي هذا المثال يمكننا زيادة معدل انتقال الحرارة بالحمل من الصفيحة بمقدار 40% بمجرد توجيه الهواء للجريان باتجاه البعد الطويل.

مقدار الزيادة في معدل انتقال الحرارة بالحمل بين الحالتين هي :

$$18096 - 12919 = 5177$$

وهذا يعادل زيادة بنسبة ٤٠% في انتقال الحرارة بالحمل

$$\frac{18096 - 12919}{12919} = 0.4 = 40\%$$