المحاضرة ٤

انتقال الحرارة بالحمل

م. مرح تامر
4 /11 /2025

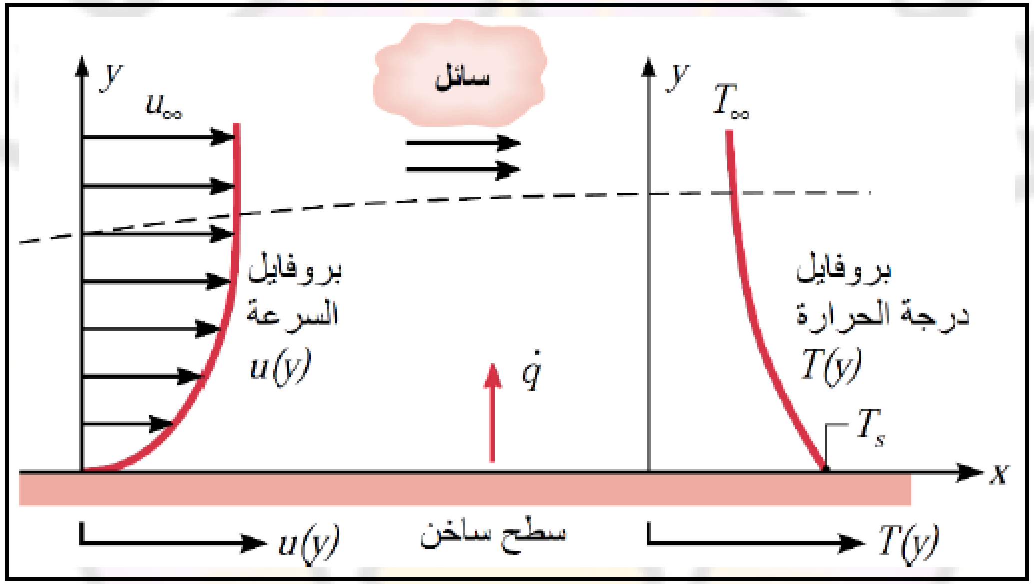
انتقال الحرارة بالحمل

هو انتقال الحرارة بين سطح صلب والمائع الذي يجري فوق ذلك السطح

1 – 2 – 2 – الحمل Convection:

يتضمن الحمل آليتين لانتقال الحرارة؛ فضلاً عن انتقال الحرارة نتيجة الحركة العشوائية للجزيئات، يحدث انتقال الحرارة نتيجة الحركة الكلية للسائل Bulk Motion. ترتبط هذه الحركة مع حقيقة أن جزيئات السائل في كل لحظة تتحرك بشكل جماعي، أو على شكل مجموعات صغيرة. تسهم هذه الحركة، وبوجود تدرج في درجة الحرارة، في عملية انتقال الحرارة. نتيجة احتفاظ الجزيئات المتحركة في مجموعات بحركتها العشوائية، فإن الانتقال الكلي للحرارة يكون محصلة انتقال الحرارة الناتج عن الحركة العشوائية للجزيئات، والحركة الكلية للسائل.

لنأخذ سائلاً يجري فوق سطح ساخن، كما هو مبين في الشكل (1 – 4). نتيجة التفاعلات بين السطح الساخن والسائل، تنشأ طبقة ضمن السائل تتغير فيها سرعة السائل من الصفر عند السطح وحتى u_∞، والتي هي سرعة التيار الحر للجريان، وتسمى هذه الطبقة بالطبقة الحدية الهيدروديناميكية. بشكل مشابه، في حال كانت درجتا حرارة السطح والسائل مختلفتين، فسوف تتشكل طبقة ضمن السائل تتغير فيها درجة حرارته من T_s عند السطح وحتى T_∞ خارج هذه الطبقة، وتسمى هذه الطبقة بالطبقة الحدية الحرارية، ويمكن لهذه الطبقة أن تكون أكبر أو أصغر أو تساوي الطبقة الحدية الهيدروديناميكية. عندما $T_s > T_\infty$ فإن انتقال الحرارة بالحمل يحدث من السطح إلى السائل.



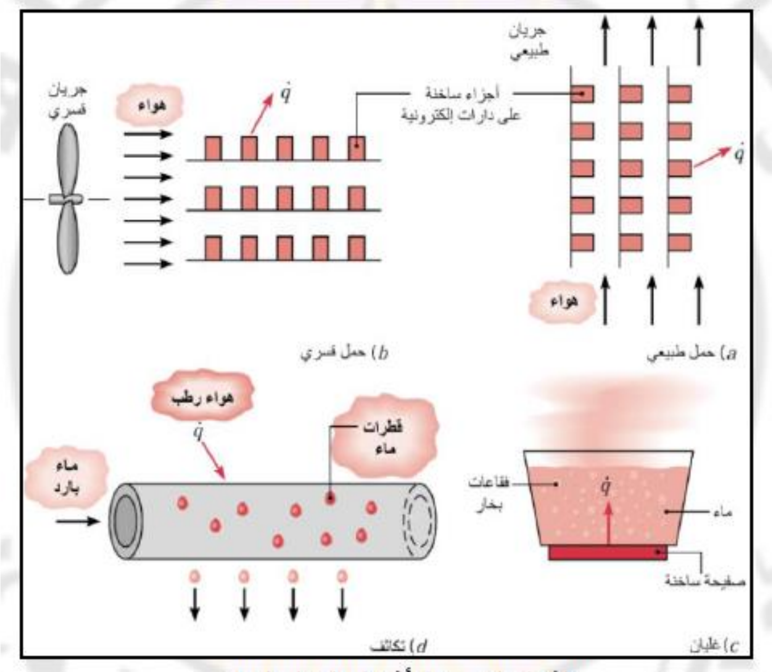
الشكل (1 – 4) تطورالطبقة الحدية في انتقال الحرارةبالحمل.

أشكال انتقال الحرارة بالحمل حسب طبيعة الجريان:

* **انتقال الحرارة بالحمل الطبيعي (الحر):** تحدث حركة السائل بتأثير قوى الطفو الناتجة عن فرق الكثافات، والذي ينتج بدوره عن فرق درجات الحرارة ضمن السائل، كما يبين الشكل (1 - 5 a).

* **انتقال الحرارة بالحمل القسري:** حيث يحدث الجريان بتأثير مروحة او مضخة، كما هو مبين في الشكل (1 - 5 b).

* **انتقال الحرارة بالحمل الناتج عن التحول الطوري:** ويحدث فيه انتقال للطاقة الحرارية الكامنة، وذلك في أثناء عمليتي التكاثف والغليان، ومثال ذلك الشكل (1 - 5 c)، (1 - 5 d).



الشكل (1 - 5) أشكال الحمل الحراري.

تظهر التجارب أن انتقال الحرارة بالحمل الحراري يعتمد بشدة على خصائص السوائل:

- اللزوجة الديناميكية
- التوصيل الحراري
- الكثافة
- الحرارة النوعية
- سرعة السائل.

كما يعتمد على هندسة السطح وخشونته (السطح الصلب) بالإضافة إلى نوع تدفق السوائل (الانسيابي أو المضطرب).

الايصالية الحرارية:

هي قدرة المائع على توصيل الحرارة، نرمز لها α أو h

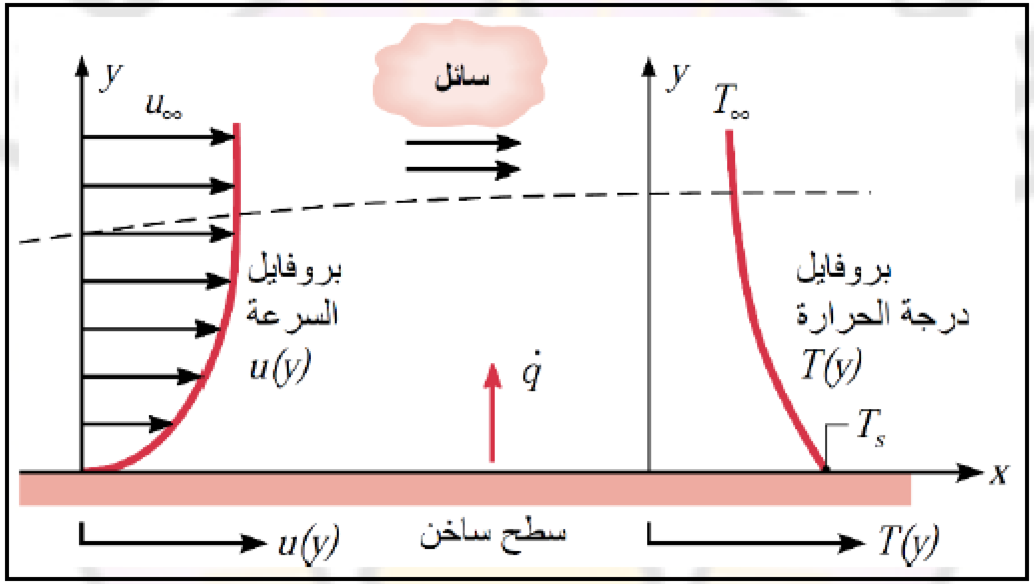
الحرارة النوعية:

هي كمية الحرارة اللازمة لرفع درجة حرارة **1kg** من الماء درجة مئوية واحدة.

ونميز نوعين:

C_P: السعة الحرارية بثبات الضغط.

C_V: السعة الحرارية بثبات الحجم.



الشكل (1 – 4) تطورالطبقة الحدية في انتقال الحرارةبالحمل.

تحسب شدة التدفق الحراري بالحمل بواسطة قانون نيوتن للتبريد:

$$\dot{q} = \alpha (T_\infty - T_s) \qquad \textbf{(1 – 3)}$$

حيث:

$\dot{q}$: شدة التدفق الحراري بالحمل. $[W/m^2]$

α : معامل انتقال الحرارة بالحمل. $[W/m^2.K]$

T_s: درجة حرارة السطح. $[^\circ C]$

T_∞: درجة حرارة السائل أو الوسط. $[^\circ C]$

تعتمد قيمة α على شروط الطبقة الحدية، والتي ترتبط بشكل السطح وطبيعة الجريان والخواص الترموديناميكية للسائل.

ويبين الجدول (1 – 1) قيمة α في حالات الحمل الحراري المختلفة.

الجدول (1 – 1) القيم النموذجية لمعامل انتقال الحرارة بالحمل

الإجراء	$\alpha\,[W/m^2.K]$
حمل حر:	
غازات	$2 - 25$
سوائل	$50 - 1000$
حمل قسري:	
غازات	$25 - 250$
سوائل	$100 - 20,000$
حمل مع عملية تحول طوري:	
غليان أو تكاثف	$2500 - 100,000$

ولحساب معدل انتقال الحرارة بالحمل بين سطح مساحته As و مائع نطبق العلاقة التالية:

$$\dot{Q}_{conv} = \alpha A_s (T_s - T_\infty) \qquad [\,W\,]$$

➢ جدار مؤلف من طبقة واحدة ومائعين

$$Q = \frac{\Delta T}{\sum R}$$

$$Q = \frac{Ti - To}{\frac{1}{\alpha_1 . A} + \frac{\Delta x}{\lambda . A} + \frac{1}{\alpha_2 . A}}$$

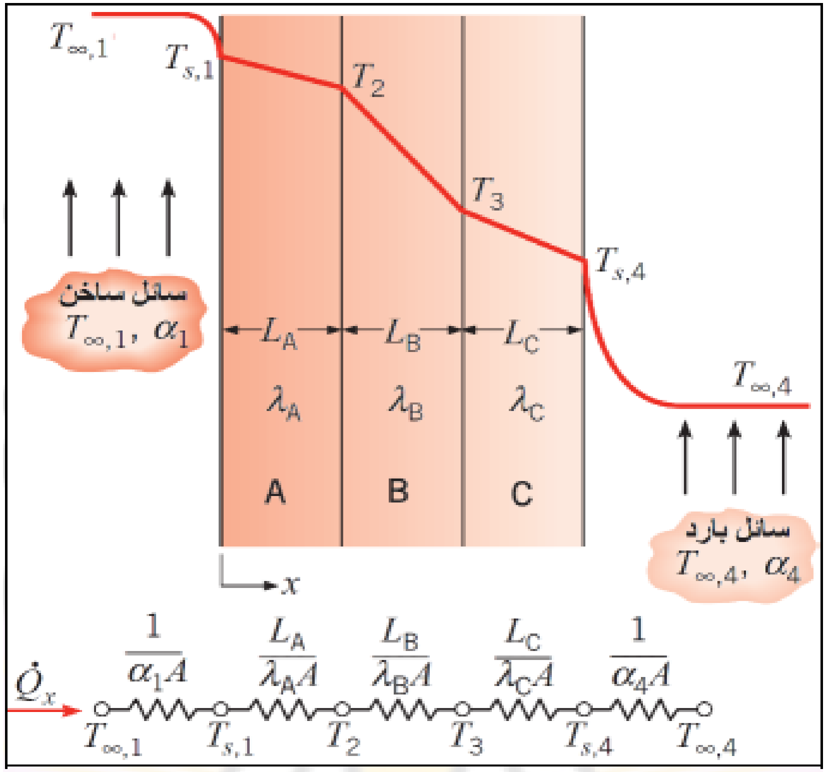
➢ جدار مركب (متعدد الطبقات) ومائعين

$$Q = \frac{\Delta T}{\sum R}$$

$$Q = \frac{Ti - To}{\frac{1}{\alpha_1 . A} + \sum R_{cond} + \frac{1}{\alpha_2 . A}}$$

كمثال على ذلك جدار مكون من ثلاث طبقات ومائعين:

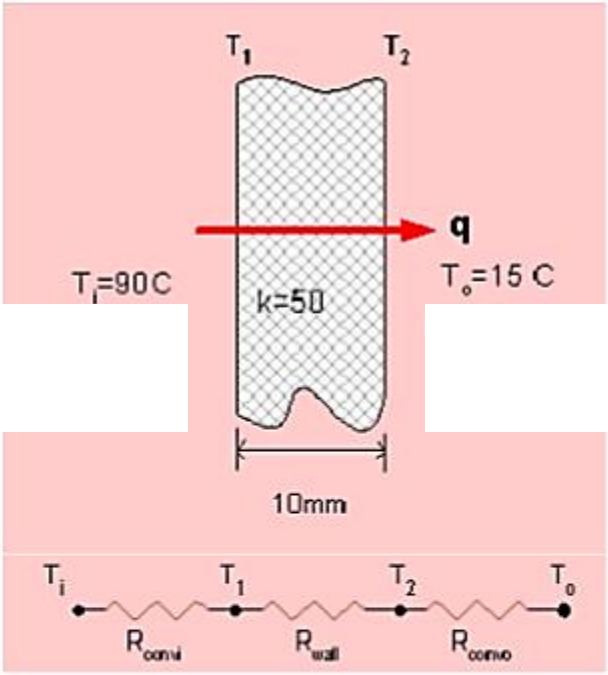
$$Q = \frac{Ti - To}{\frac{1}{\alpha_1 . A} + \frac{\Delta x}{\lambda_1 . A} + \frac{\Delta x}{\lambda_2 . A} + \frac{\Delta x}{\lambda_3 . A} + \frac{1}{\alpha_2 . A}}$$



الشكل (3 – 2) الدارة الحرارية المكافئة لجدار مركب على التسلسل.

مسألة (2−4):

خزان ماء سمك جداره 10 mm وبه ماء درجة حرارته 90 °C . احسب معدل فقدان الحرارة للمتر المربع الواحد من مساحة سطح الجدار إذا كانت درجة حرارة الهواء المحيط 15 °C. خذ معامل التوصيل الحراري لمادة الجدار 50 W/m °C ومعامل الحمل الحراري للماء 2800 W/m² °C ومعامل الحمل الحراري للهواء المحيط 11 W/m² °C.



الحل:

معدل انتقال الحرارة:

$$Q = \frac{Ti - To}{\frac{1}{\alpha_1 . A} + \frac{\Delta x}{\lambda . A} + \frac{1}{\alpha_2 . A}}$$

نحسب مقاومة الحمل الداخلي:

$$R_{1\,conv} = \frac{1}{\alpha_1 . A} = \frac{1}{2800\,X 1} = 3.57\,X 10^{-4}\ °C/W$$

نحسب مقاومة التوصيل لمادة الجدار:

$$R_{cond} = \frac{\Delta x}{\lambda . A} = \frac{10 X 10^{-3}}{50\ X\ 1} = 2 X 10^{-3}\ °C/W$$

نحسب مقاومة الحمل الخارجي:

$$R_{2\,conv} = \frac{1}{\alpha_2 . A} = \frac{1}{11\ X\ 1} = 0.0909\ °C/W$$

فيكون معدل انتقال الحرارة:

$$Q = \frac{90 - 15}{3.57 X 10^{-4} + 2 X 10^{-3} + 0.0909}$$

$$Q = 820\ W$$

3 - 2 - الأنظمة القطرية *Radial Systems*:

3 – 2 – 1 – الأسطوانة *Cylinder*:

تأخذ المعادلة التفاضلية

$$\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(\lambda r\frac{\partial T}{\partial r}\right)+\frac{1}{r^2}\frac{\partial}{\partial \phi}\left(\lambda\frac{\partial T}{\partial \phi}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(\lambda\frac{\partial T}{\partial z}\right)+\dot{g}=\rho c_p\frac{\partial T}{\partial t} \qquad (21-2)$$

$$\frac{d}{dr}\left(r\frac{dT}{dr}\right)=0 \qquad (20-3)$$

نلاحظ من المعادلة (20 – 3) أن مشتق الحد $r\,(dT/dr)$ بالنسبة لنصف القطر r يساوي إلى الصفر، وبالتالي فإن هذا الحد ثابت ولا يتعلق بـ r.

$$\dot{Q}_r=-\lambda A\frac{dT}{dr}=-\lambda\left(2\pi rL\right)\frac{dT}{dr} \qquad (21-3)$$

$$\dot{q}_r=\frac{\dot{Q}_r}{A}=-\lambda\frac{dT}{dr}$$

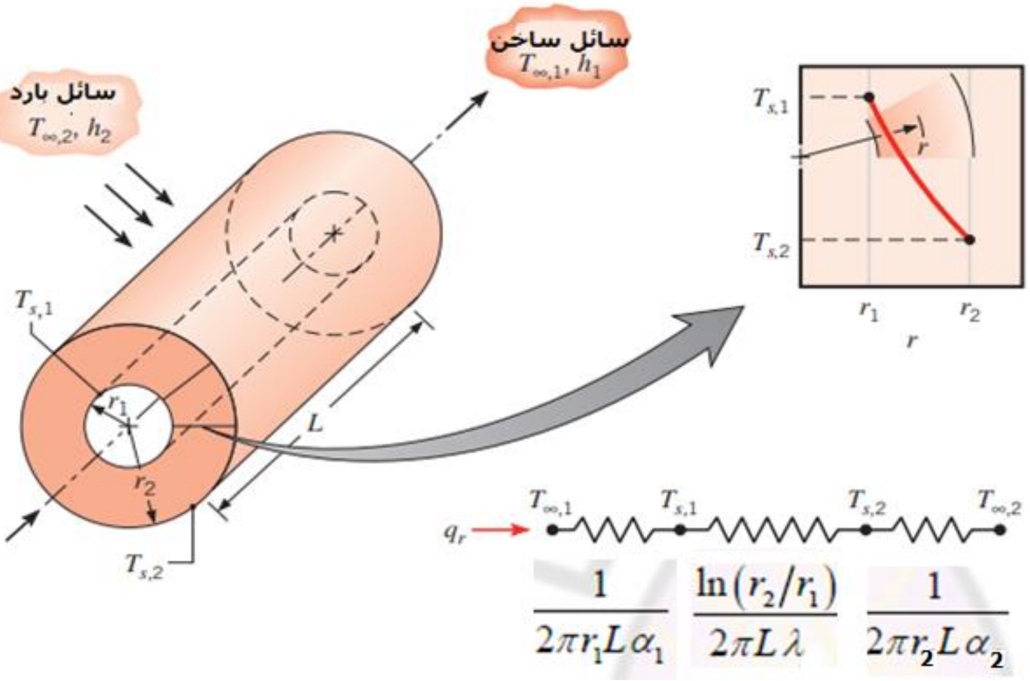
وبإجراء التكامل لأول مرة على المعادلة (20 – 3) نجد:

$$r\frac{dT}{dr}=C_1 \Rightarrow \frac{dT}{dr}=\frac{C_1}{r}$$

وبالتالي فإن شدة التدفق الحراري بالاتجاه القطري متغيرة وتتبع لنصف القطر.

لإيجاد علاقة توزع درجة الحرارة في الأسطوانة نقوم بإجراء التكامل مرة أخرى، وذلك لنحصل على الحل العام:

$$\boxed{T\left(r\right)=C_1\ln r+C_2}$$



التوصيل الحراري في أسطوانة مجوفة بوجود انتقال للحرارة بالحمل عند سطحها

الشروط الحدية في هذه الحالة هي:

$$T\left(r_1\right)=T_{s,1} \qquad T\left(r_2\right)=T_{s,2}$$

وبالتبديل في الحل العام نحصل على علاقة توزع درجة الحرارة ضمن الأسطوانة:

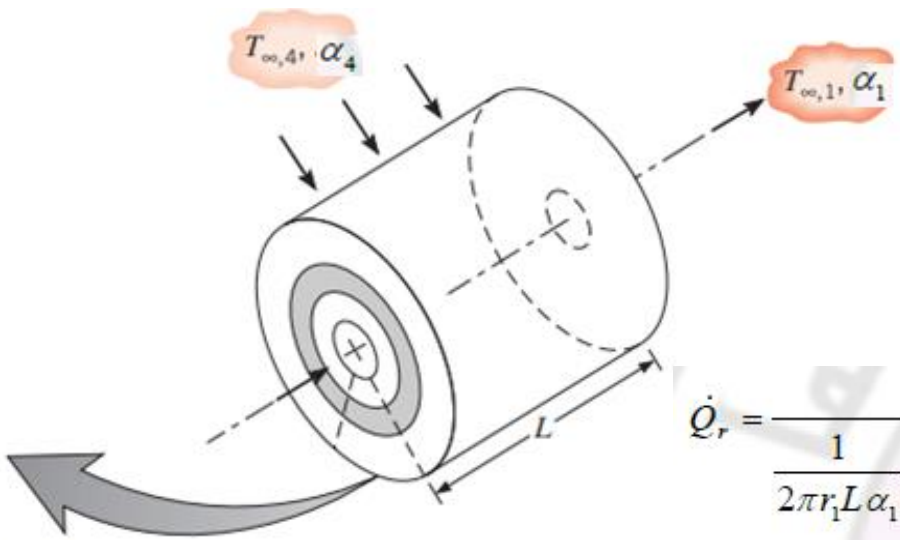
$$\boxed{T\left(r\right)=\frac{T_{s,1}-T_{s,2}}{\ln\left(r_1/r_2\right)}\ln\left(\frac{r}{r_2}\right)+T_{s,2}=\frac{T_{s,1}-T_{s,2}}{\ln\left(r_1/r_2\right)}\ln\left(\frac{r}{r_1}\right)+T_{s,1} \qquad (22-3)}$$

$$\boxed{\dot{Q}_r=\frac{2\pi L\lambda\left(T_{s,1}-T_{s,2}\right)}{\ln\left(r_2/r_1\right)} \qquad (23-3)}$$

من خلال هذه المعادلة، نجد أن المقاومة الحرارية للتوصيل الحراري في جدار أسطواني

$$\boxed{R_{\text{cond}}=\frac{\ln\left(r_2/r_1\right)}{2\pi L\lambda} \qquad (24-3)}$$

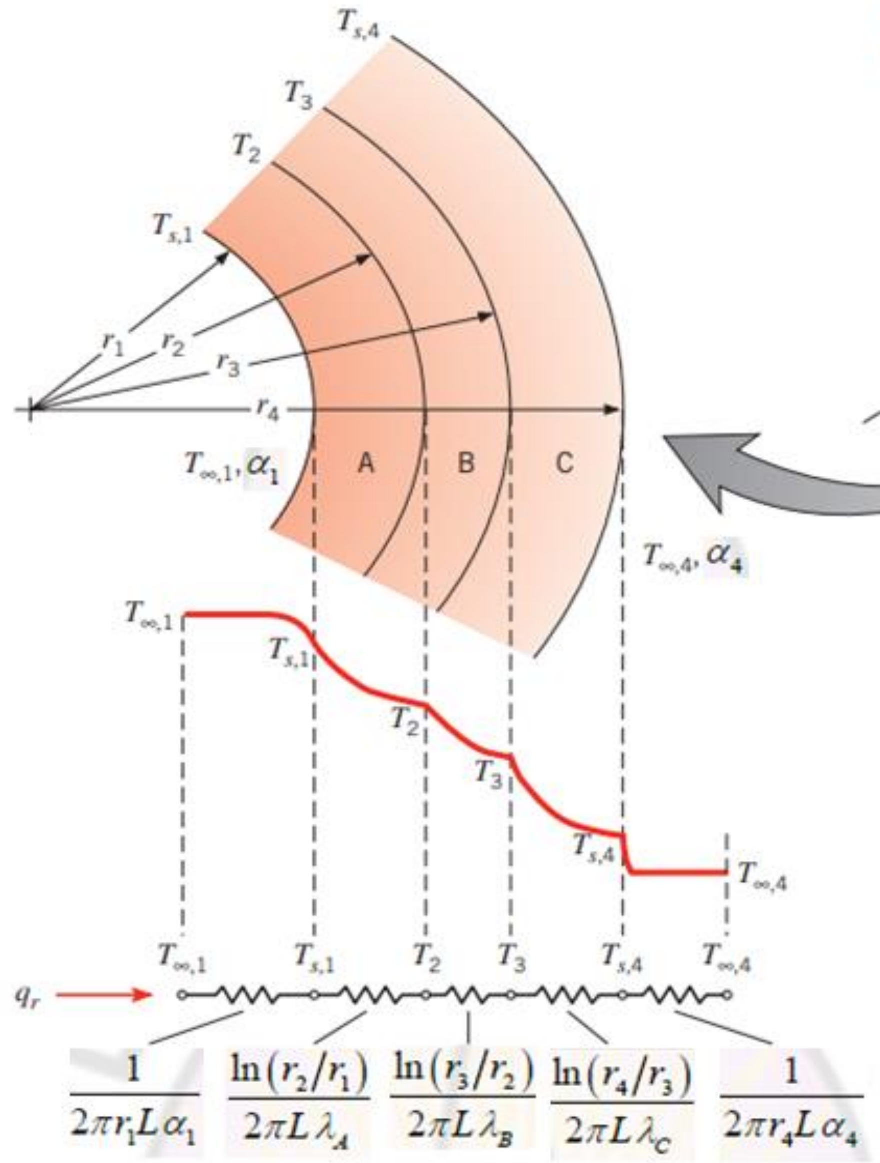
3 – 2 – 2 – جدار أسطواني مركب:



$$\dot{Q}_r = \frac{T_{\infty,1} - T_{\infty,4}}{\dfrac{1}{2\pi r_1 L \alpha_1} + \dfrac{\ln(r_2/r_1)}{2\pi L \lambda_A} + \dfrac{\ln(r_3/r_2)}{2\pi L \lambda_B} + \dfrac{\ln(r_4/r_3)}{2\pi L \lambda_C} + \dfrac{1}{2\pi r_4 L \alpha_4}} \qquad (25 - 3)$$

كما يمكن صياغة النتيجة السابقة باستخدام مفهوم معامل انتقال الحرارة الكلي:

$$\dot{Q}_r = \frac{T_{\infty,1} - T_{\infty,4}}{R_{tot}} = UA\left(T_{\infty,1} - T_{\infty,4}\right) \qquad (26 - 3)$$



توزع درجات الحرارة لجدار اسطواني مركب