

CHƯƠNG 1

DẪN NHIỆT

1.1. NHIỆT TRƯỜNG, MẶT ĐẲNG NHIỆT VÀ GRADIENT NHIỆT ĐỘ

1.1.1. Nhiệt trường

- Nhiệt độ là một thông số trạng thái biểu thị mức độ nóng lạnh của một vật thể hoặc một môi trường.

- Nhiệt trường là tập hợp những điểm có nhiệt độ trong một vật thể hoặc trong không gian tại một thời điểm τ nào đó.

- Nhiệt trường là hàm số của không gian và thời gian. Phương trình tổng quát của trường nhiệt độ có dạng $t = f(x, y, z, \tau)$.

+ Nếu nhiệt trường chỉ thay đổi theo không gian mà không thay đổi theo thời gian thì gọi là nhiệt trường ổn định.

+ Nếu nhiệt trường thay đổi cả theo không gian và thời gian thì gọi là nhiệt trường không ổn định.

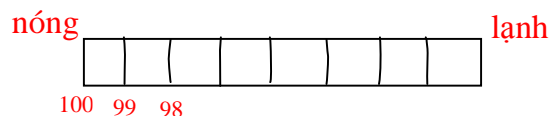
VD: Đun nóng và làm nguội nhanh các đồ hộp để tiết trùng sản phẩm.

Ngoài ra, tùy theo nhiệt độ thay đổi theo 1 trục tọa độ, 2 trục tọa độ hoặc 3 trục tọa độ mà có thể phân thành trường 1 chiều, 2 chiều hoặc 3 chiều.

1.1.2. Mặt đẳng nhiệt

- Là tập hợp những điểm có cùng nhiệt độ tại một thời điểm nào đó.

VD:



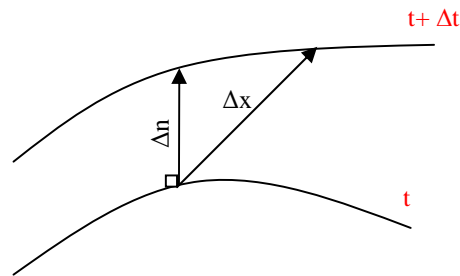
- Đặc điểm:

+ Các mặt đẳng nhiệt song song nhau.

+ Trên mặt đẳng nhiệt không có hiện tượng dẫn nhiệt vì $t = \text{const}$ ở mọi điểm, mà chỉ có hiện tượng dẫn nhiệt từ mặt đẳng nhiệt này đến mặt đẳng nhiệt khác. Do vậy, nhiệt độ trong vật thể chỉ biến thiên theo những phương cắt ngang mặt đẳng nhiệt và biến thiên nhanh nhất là theo phương pháp tuyến với mặt đẳng nhiệt.

1.1.3. Gradient nhiệt độ

Giả sử biến thiên nhiệt độ giữa 2 mặt đẳng nhiệt liền nhau là Δt , khoảng cách giữa chúng theo phương pháp tuyến là Δn , theo phương x là Δx .



Hình 1.1: Phương và chiều của grad T

$\frac{\Delta t}{\Delta n}$ và $\frac{\Delta t}{\Delta x}$ là sự gia tăng nhiệt độ trên một đơn vị độ dài.

Vì $\Delta n < \Delta x \Rightarrow \frac{\Delta t}{\Delta n} > \frac{\Delta t}{\Delta x}$, do đó sự biến thiên nhiệt độ trên một đơn vị độ dài sẽ lớn nhất theo phương pháp tuyến.

Khi 2 mặt đẳng nhiệt tiến tới sát nhau :

$$\lim_{\Delta n \rightarrow 0} \frac{\Delta t}{\Delta n} = \frac{dt}{dn}$$

$$\text{grad } T = \frac{dt}{dn} \text{ (độ/m)} \quad (1.1)$$

→ Gradient nhiệt độ:

– Là một vectơ có phương trùng với phương pháp tuyến của bề mặt đẳng nhiệt và có chiều là chiều tăng của nhiệt độ. Dấu (-) thể hiện ngược chiều với chiều dòng nhiệt.

– Thể hiện tốc độ biến thiên của nhiệt độ trên một đơn vị độ dài theo phương pháp tuyến của bề mặt đẳng nhiệt.

Khi $dt > 0 \rightarrow \text{grad} > 0$ thì mới xảy ra hiện tượng dẫn nhiệt, tức là có dòng nhiệt xuất hiện trong vật thể.

1.2. ĐỊNH LUẬT FOURRIER VÀ HỆ SỐ DẪN NHIỆT

1.2.1. Định luật Fourier

Khi nghiên cứu quá trình dẫn nhiệt trong vật thể, Fourier đã phát hiện « Một lượng nhiệt dQ truyền qua một bề mặt dF trong thời gian $d\tau$ sẽ tỷ lệ thuận với gradient nhiệt độ, với thời gian và diện tích bề mặt ».

$$dQ = \lambda \cdot \frac{dt}{dn} dF \cdot d\tau \quad (1.2)$$

(bỏ qua chiều, chỉ tính độ lớn)

Nếu quá trình là ổn định:

$$Q = \lambda \frac{dt}{dn} F \cdot \tau \quad (1.2a)$$

λ : hệ số dẫn nhiệt (hệ số tỷ lệ, độ dẫn nhiệt)

Q : nhiệt lượng

F : bề mặt vuông góc với phương dẫn nhiệt (m^2)

τ : thời gian (s)

Từ phương trình (1.2) ta sẽ tìm được ý nghĩa vật lý và thứ nguyên của hệ số dẫn nhiệt :

$$+ [\lambda] = \frac{dQ \cdot dn}{dt \cdot dF \cdot d\tau} = \frac{J \cdot m}{s \cdot m^2 \cdot C} = \frac{J}{s \cdot m \cdot C} = \frac{W}{m \cdot C}$$

+ Là lượng nhiệt dẫn qua $1m^2$ bề mặt vuông góc với phương dẫn nhiệt, chiều dài dẫn nhiệt là 1m, chênh lệch nhiệt độ giữa hai đầu là $1^\circ C$ trong thời gian 1s.

Hệ số dẫn nhiệt λ phụ thuộc vào cấu tạo của vật liệu, nhiệt độ, áp suất, độ ẩm,...

VD: Có những vật liệu có hệ số λ rất lớn: Pt, Au, Ag, Cu, Al,...

Có những vật liệu có hệ số λ rất nhỏ: đất sét, không khí, gỗ,...

==> Để giảm hệ số dẫn nhiệt ta làm loại vật liệu xốp vì khoảng rỗng chứa không khí (dẫn nhiệt kém).

1.2.2. Hệ số dẫn nhiệt của các chất rắn, chất lỏng và chất khí

1.2.2.1. Hệ số dẫn nhiệt của chất rắn

Nói chung, hệ số dẫn nhiệt của các vật thể rắn đều phụ thuộc vào nhiệt độ, phần lớn hệ số dẫn nhiệt tăng khi nhiệt độ tăng. Đối với vật thể rắn đồng chất, quan hệ giữa hệ số dẫn nhiệt λ và nhiệt độ gần như theo đường thẳng:

$$\lambda = \lambda_0 (1 + bt) \quad (1.3)$$

λ : hệ số dẫn nhiệt ở $0^\circ C$

λ_0 : hệ số dẫn nhiệt ở $t^\circ C$

b: hệ số nhiệt độ, được xác định bằng thực nghiệm, nó phụ thuộc vào tính chất của vật liệu.

t: nhiệt độ làm việc ($^\circ C$)

➤ Hệ số dẫn nhiệt của vật liệu xây dựng và vật liệu cách nhiệt nằm trong khoảng giới hạn $\lambda = 0,02 \div 3$ (W/mđộ).

- Khi nhiệt độ tăng thì hệ số dẫn nhiệt tăng.
- Cùng loại vật liệu nhưng loại có khối lượng riêng lớn hơn thì λ cũng lớn hơn.
- Đối vật liệu ẩm, hệ số dẫn nhiệt tương đối lớn, lớn hơn cả vật liệu khô và nước.

VD: Gạch khô $\lambda = 0,35$ W/m độ

Nước $\lambda = 0,6$ W/m độ

Gạch ướt $\lambda = 1$ W/m độ

Các vật liệu có hệ số dẫn nhiệt thấp ($\lambda < 0,2$ W/m độ) thường được dùng làm vật liệu cách nhiệt và được gọi là vật liệu cách nhiệt.

- **Hệ số dẫn nhiệt của kim loại** nằm trong khoảng giới hạn: $20 \div 400$ W/m độ.

Bảng 1.1: Hệ số dẫn nhiệt của một số kim loại thường dùng

Tên kim loại	λ (W/m°C)
Đồng	384
Nhôm	203,5
Thép carbon	46,5
Chì	34,9
Thép không gỉ	23,2

Sự truyền nhiệt trong kim loại chủ yếu là do các điện tử tự do, còn dao động của các nguyên tử dưới dạng sóng đàn hồi không đáng kể. Khi tăng nhiệt độ làm cho sự hỗn loạn của điện tử tự do tăng lên, do đó hệ số dẫn nhiệt tăng.

Trong kim loại khi có lẫn các tạp chất khác thì hệ số dẫn nhiệt giảm đi rất nhanh, sở dĩ xảy ra như vậy là do sự tăng tính hỗn loạn của kết cấu mạng và dẫn đến làm tăng sự phân tán của điện tử tự do.

VD: Cu nguyên chất có $\lambda = 395$ W/m độ nhưng nếu pha thêm một ít Asen vào thì hệ số dẫn nhiệt chỉ còn 112 W/m độ.

Bảng 1.2: Hệ số dẫn nhiệt của một số hợp kim phụ thuộc nhiệt độ

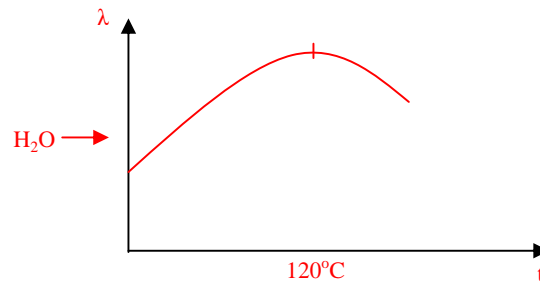
Tên hợp kim	λ , W/m độ							
	Ở nhiệt độ, t°C							
	0	20	100	200	300	400	500	600
Hợp kim nhôm								
92% Al, 8% Mg	102	106	123	148	-	-	-	-
80% Al, 20% Si	158	161	169	174	-	-	-	-
Dura								
94 ÷ 96% Al, 3 ÷ 5% Cu, 0,5% Mg	159	165	181	194	-	-	-	-
Đồng thau								
90% Cu, 10% Zn	102	-	117	134	149	168	180	193
70% Cu, 30% Zn	106	-	109	110	114	116	120	121
67% Cu, 33% Zn	100	-	107	113	121	128	135	151
60% Cu, 40% Zn	106	-	120	137	152	169	186	200
Nicrôm								
90% Ni, 10% Cr	17,1	17,4	19,0	20,9	22,8	24,6	-	-
80% Ni, 20% Cr	12,2	12,8	13,8	15,6	17,2	19,0	-	22,6
Đồng thanh nhôm								
95% Cu, 5% Al	-	82,6	-	-	-	-	-	-
Đồng đỏ								
90% Cu, 10% Sn	-	41,8	-	-	-	-	-	-
75% Cu, 25% Sn	-	25,6	-	-	-	-	-	-
88% Cu, 10% Zn, 2% Sn	-	47,7	-	-	-	-	-	-
Hợp kim Natri với Kali								
22% Na, 78% K	-	-	24,4	-	-	26,6	-	-
Hợp kim chì với bitmút								
44% Pb, 55,5% Bi	-	-	-	9,65	10,9	-	-	-

1.2.2.2. Hệ số dẫn nhiệt của chất lỏng giọt ($\lambda = 0,08 \div 0,7$ W/m độ)

Hệ số dẫn nhiệt của chất lỏng và chất khí nhỏ hơn chất rắn rất nhiều. Ở nhiệt độ bình thường, hệ số dẫn nhiệt λ của nước là 0,593 W/mđộ; của không khí đứng yên khoảng 0,023 W/mđộ; trong khi đó thì hệ số dẫn nhiệt λ của thép carbon là 46,5 W/mđộ.

- Cơ cấu truyền nhiệt năng trong chất lỏng giọt chủ yếu là do sự truyền năng lượng của **dao động đàn hồi hỗn loạn**.

- Thực nghiệm cho thấy rằng hầu hết các chất lỏng có hệ số dẫn nhiệt giảm khi nhiệt độ tăng trừ nước và glycerin.



Hình 1.2: Hệ số dẫn nhiệt của nước

- Khi áp suất tăng thì hệ số dẫn nhiệt tăng.

→ Muốn tăng H₂O lên 120°C → gia nhiệt H₂O trong điều kiện áp suất cao (P>=2atm).

Đối với chất lỏng, hệ số dẫn nhiệt λ có thể tính theo công thức gần đúng:

$$\lambda = \varepsilon \cdot C_p \cdot \rho \sqrt{\frac{\rho}{M}} \quad (1.4)$$

Trong đó: C_p: nhiệt dung riêng của chất lỏng (J/kgđộ)

ρ : khối lượng riêng của chất lỏng (kg/m³)

M: khối lượng mol của chất lỏng

ε : hệ số tỷ lệ phụ thuộc vào tính chất của chất lỏng, có trị số cụ thể như sau:

+ Đối với chất lỏng không kết hợp (benzrn, toluen, các hydrocarbon khác): $\varepsilon = 4,22 \cdot 10^{-8}$

+ Đối với chất lỏng kết hợp (rượu, nước): $\varepsilon = 3,58 \cdot 10^{-8}$

1.2.2.3. Hệ số dẫn nhiệt của chất khí ($\lambda = 0,005 \div 0,5$ W/m độ).

Theo thuyết động học phân tử, trong điều kiện áp suất và nhiệt độ bình thường , sự truyền nhiệt năng bằng dẫn nhiệt trong chất khí được xác định bởi truyền động năng phân tử chuyển động hỗn loạn và sự va chạm của các phân tử chất khí.

- Khi nhiệt độ tăng thì hệ số dẫn nhiệt tăng.

- Trong điều kiện áp suất của các thiết bị kỹ thuật thông thường có thể xem hệ số dẫn nhiệt gần như không phụ thuộc áp suất (trừ trường hợp áp suất quá thấp $P < 20\text{mmHg}$ hoặc áp suất quá cao $P > 20.000\text{bar}$).

Ta có thể xác định hệ số dẫn nhiệt của chất khí trong khoảng áp suất không cao lắm theo công thức sau:

$$\lambda = B \cdot C_v \cdot \mu \quad (1.5)$$

Trong đó: C_v : nhiệt dung riêng của khí khi V không đổi (J/kg độ)

μ : độ nhớt của khí (Ns/m²)

$$B = \frac{9k - 5}{4} \quad (k: \text{chỉ số đoạn nhiệt})$$

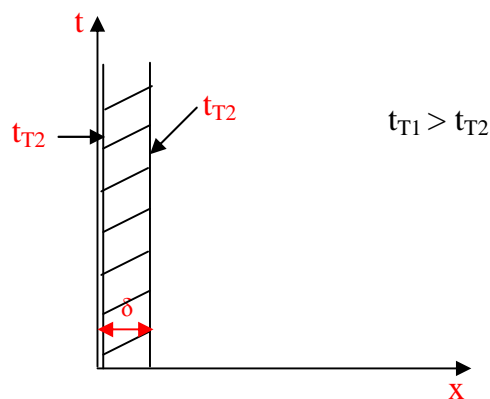
Vì rằng chỉ số đoạn nhiệt $k = \frac{C_p}{C_v}$ của khí với số nguyên tử khác nhau hầu như không khác nhau mấy cho nên ta có thể lấy giá trị B như sau:

- + Đối với khí 1 nguyên tử: $B = 2,5$
- + Đối với khí 2 nguyên tử: $B = 1,9$
- + Đối với khí 3 nguyên tử: $B = 1,72$

Hệ số dẫn nhiệt của hỗn hợp khí thường được xác định bằng thực nghiệm và định luật kết hợp (cộng) không thể ứng dụng được cho các chất khí.

1.3. DẪN NHIỆT QUA TƯỜNG PHẪNG TRONG ĐIỀU KIỆN NHIỆT ỔN ĐỊNH

1.3.1. Tường phẳng một lớp



Hình 1.3: Dẫn nhiệt qua tường phẳng một lớp

Xét một vách phẳng đồng chất có chiều dày δ , hệ số dẫn nhiệt λ .

Giả sử tường có chiều dài và rộng rất lớn so với chiều dày để nhiệt coi như chỉ đi theo phương x.

Đặt tường vào hệ tọa độ vuông góc Oxy thì nhiệt độ sẽ không thay đổi theo phương Oy và Oz.

$$\rightarrow \frac{\delta^2 t}{\delta y^2} = 0 \quad \text{và} \quad \frac{\delta^2 t}{\delta z^2} = 0$$

Ta ký hiệu: t_{T1} là nhiệt độ ở mặt ngoài của tường, t_{T2} là nhiệt độ mặt trong của tường ($t_{T1} > t_{T2}$).

Trong trạng thái nhiệt ổn định thì lượng nhiệt dẫn vào tường và ra khỏi tường là bằng nhau và không thay đổi theo thời gian.

$$dQ = \lambda \cdot \frac{dt}{dn} \cdot dF \cdot d\tau$$

$$Q = \lambda \cdot \frac{\Delta t}{\delta} \cdot F \cdot \tau \quad (\text{J}) \quad (1.6)$$

→ Nhiệt tải riêng là nhiệt lượng trên 1m^2 bề mặt trong thời gian τ :

$$q = \frac{Q}{F} = \lambda \cdot \frac{\Delta t}{\delta} \cdot \tau \quad (\text{J/m}^2) \quad (1.6a)$$

→ Mật độ dòng nhiệt là nhiệt lượng truyền qua 1m^2 bề mặt trong 1s:

$$q_w = \frac{q}{\tau} = \lambda \cdot \frac{\Delta t}{\delta} \quad (\text{W/m}^2) \quad (1.6b)$$

q_w : mật độ dòng nhiệt (W/m^2)

λ : hệ số dẫn nhiệt của tường ($\text{W/m}^\circ\text{C}$)

Δt : chênh lệch nhiệt độ giữa bên này và bên kia tường ($^\circ\text{C}$)

δ : chiều dày của tường (m)

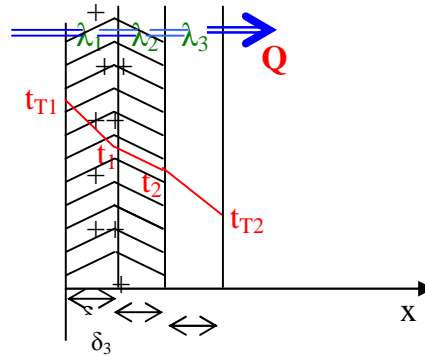
F: diện tích bề mặt truyền nhiệt (m^2)

1.3.2. Tường nhiều lớp

Trên thực tế ta ít gặp vách phẳng một lớp mà thông thường là vách phẳng nhiều lớp.

VD: Vách tường lò gồm có: lớp gạch chịu lửa, lớp gạch thường và lớp vôi vữa trát bên ngoài.

Giả sử có một tường phẳng gồm 3 lớp làm bằng các vật liệu khác nhau, giả thiết là các lớp được ghép thật chặt vào nhau nên nhiệt độ các lớp tại bề mặt tiếp xúc có giá trị như nhau. Độ dày các lớp là $\delta_1, \delta_2, \delta_3$. Hệ số dẫn nhiệt các lớp $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$. Biết nhiệt độ hai mặt ngoài của tường không thay đổi là t_{T1} và t_{T2} với $t_{T1} > t_{T2}$. Nhiệt độ các bề mặt tiếp xúc chưa biết gọi là t_1 và t_2 .



Hình 1.4: Dẫn nhiệt qua tường phẳng nhiều lớp

Ở chế độ ổn định nhiệt, lượng nhiệt dẫn qua các lớp tường như nhau.

Vậy ta có thể ứng dụng phương trình dẫn nhiệt qua từng lớp tường như sau:

$$\text{Lớp 1: } Q = \frac{\lambda_1}{\delta_1} (t_{T1} - t_1) \cdot F \cdot \tau \quad \implies \quad Q \left(\frac{\delta_1}{\lambda_1} \right) = (t_{T1} - t_1) \cdot F \cdot \tau$$

$$\text{Lớp 2: } Q = \frac{\lambda_2}{\delta_2} (t_1 - t_2) \cdot F \cdot \tau \quad \implies \quad Q \left(\frac{\delta_2}{\lambda_2} \right) = (t_1 - t_2) \cdot F \cdot \tau$$

$$\text{Lớp 3: } Q = \frac{\lambda_3}{\delta_3} (t_2 - t_{T2}) \cdot F \cdot \tau \quad \implies \quad Q \left(\frac{\delta_3}{\lambda_3} \right) = (t_2 - t_{T2}) \cdot F \cdot \tau$$

Cộng các phương trình trên ta được:

$$Q \left(\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{\delta_3}{\lambda_3} \right) = (t_{T1} - t_{T2}) \cdot F \cdot \tau$$

$$\text{hay } Q = \frac{(t_{T1} - t_{T2}) \cdot F \cdot \tau}{\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{\delta_3}{\lambda_3}} \quad (1.7)$$

Tổng quát đối với vách có n lớp:

$$Q = \frac{t_{T1} - t_{T2} \cdot F \cdot \tau}{\sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i}} \quad (1.8)$$

n: số lớp tường

i: số thứ tự của tường

t_{T1} và t_{T2} là nhiệt độ của 2 lớp ngoài cùng ($t_{T1} > t_{T2}$)

Từ (1.8) ta suy ra

$$q = \frac{t_{T_1} - t_{T_2}}{\sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i}} \cdot \tau \quad (1.8a)$$

$$q_w = \frac{t_{T_1} - t_{T_2}}{\sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i}} \quad (1.8b)$$

Nhiệt độ các lớp tiếp xúc được tính như sau:

$$t_1 = t_{T_1} - \frac{q\delta_1}{\lambda_1} \quad (1.9a)$$

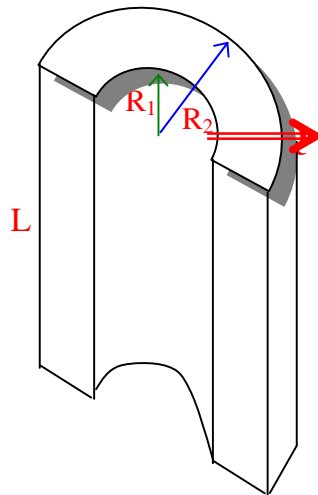
$$t_2 = t_1 - \frac{q\delta_2}{\lambda_2} = t_{T_2} + \frac{q\delta_3}{\lambda_3} \quad (1.9b)$$

1.4. DẪN NHIỆT QUA TƯỜNG ỐNG TRONG TRẠNG THÁI NHIỆT ỔN ĐỊNH

1.4.1. Tường ống một lớp

Một ống có thể xem là vách phẳng nếu chiều dày ống không đáng kể so với đường kính.

Khi chiều dày đáng kể tức diện tích bên trong không giống diện tích bên ngoài thì không thể xem là tường phẳng.



Hình 1.5: Dẫn nhiệt qua tường ống một lớp

Xét một tường ống đồng chất có bán kính trong R_1 và bán kính ngoài R_2 , chiều dài L , hệ số dẫn nhiệt λ . Vì dẫn nhiệt ổn định nên nhiệt độ mặt trong của tường t_{T_1} và mặt ngoài t_{T_2} sẽ không thay đổi theo thời gian. Vì chiều dài ống thông thường rất lớn so với đường kính nên nhiệt độ chỉ thay đổi theo phương bán kính, các mặt đẳng nhiệt là những mặt trụ đồng tâm.

Để cho bề mặt dẫn nhiệt thay đổi không đáng kể, ta sẽ nghiên cứu hiện tượng dẫn nhiệt qua một lớp tường có bán kính R bất kỳ, chiều dày dn và chiều cao L .

Theo định luật Fourier, lượng nhiệt dẫn qua lớp tường dn sẽ là:

$$dQ = \lambda \cdot \frac{dt}{dn} \cdot F \cdot d\tau \quad (J)$$

$$dQ = \lambda \cdot \frac{dt}{dn} \cdot 2\pi R \cdot L \cdot d\tau \quad (J)$$

Vì dẫn nhiệt ổn định nên lượng nhiệt dẫn đi không thay đổi theo thời gian nên phương trình trên có thể viết:

$$Q = \lambda \cdot \frac{dt}{dn} \cdot 2\pi \cdot R \cdot L \cdot \tau$$

$$\text{hay } \frac{dn}{R} = \frac{\lambda \cdot 2\pi \cdot L \cdot \tau \cdot dt}{Q}$$

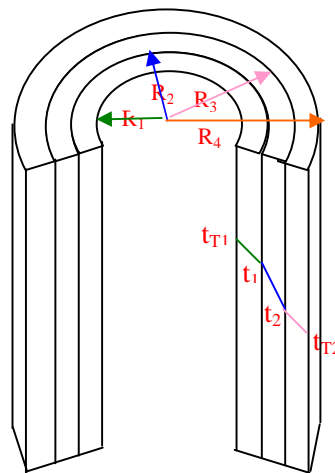
$$\implies \int_{R_1}^{R_2} \frac{dn}{R} = \int_{t_1}^{t_2} \lambda \cdot \frac{2\pi \cdot L \cdot \tau}{Q} \cdot dt$$

$$\implies \ln \frac{R_2}{R_1} = \frac{2\pi \cdot L \cdot \lambda \cdot \tau}{Q} (t_1 - t_2)$$

$$\implies Q = \frac{2\pi \cdot L \cdot (t_1 - t_2) \cdot \tau}{\frac{1}{\lambda} \ln \frac{R_2}{R_1}} \quad (1.10)$$

Đây là phương trình dẫn nhiệt qua tường ống 1 lớp trong trạng thái nhiệt ổn định.

1.4.2. Tường ống nhiều lớp



Hình 1.6: Dẫn nhiệt qua tường ống nhiều lớp

Ở chế độ ổn định nhiệt, lượng nhiệt dẫn qua các lớp tường như nhau.

Vậy ta có thể ứng dụng phương trình dẫn nhiệt qua từng lớp tường như sau:

$$Q = \frac{2\pi.L.\lambda_1(t_{T_1} - t_1).\tau}{\ln R_2 - \ln R_1} \Rightarrow \frac{Q.(\ln R_2 - \ln R_1)}{\lambda_1} = 2\pi.L.(t_{T_1} - t_1).\tau$$

$$Q = \frac{2\pi.L.\lambda_2(t_1 - t_2).\tau}{\ln R_3 - \ln R_2} \Rightarrow \frac{Q.(\ln R_3 - \ln R_2)}{\lambda_2} = 2\pi.L.(t_1 - t_2).\tau$$

$$Q = \frac{2\pi.L.\lambda_3(t_2 - t_{T_2}).\tau}{\ln R_4 - \ln R_3} \Rightarrow \frac{Q.(\ln R_4 - \ln R_3)}{\lambda_3} = 2\pi.L.(t_2 - t_{T_2}).\tau$$

Cộng các phương trình trên ta được:

$$Q \left(\frac{\ln R_2 - \ln R_1}{\lambda_1} + \frac{\ln R_3 - \ln R_2}{\lambda_2} + \frac{\ln R_4 - \ln R_3}{\lambda_3} \right) = 2\pi.L.(t_{T_1} - t_{T_2}).\tau$$

$$\Rightarrow Q = \frac{2\pi.L.(t_{T_1} - t_{T_2}).\tau}{\frac{\ln R_2 - \ln R_1}{\lambda_1} + \frac{\ln R_3 - \ln R_2}{\lambda_2} + \frac{\ln R_4 - \ln R_3}{\lambda_3}}$$

Tổng quát đối với tường nhiều lớp:

$$Q = \frac{2\pi.L.(t_{T_1} - t_{T_2})}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{\lambda_i} \ln \frac{R_{i+1}}{R_i}} \quad (1.11)$$

Với t_{T_1} , t_{T_2} là nhiệt độ mặt trong và mặt ngoài của tường ($t_{T_1} > t_{T_2}$)

i: số thứ tự của tường kể từ trong ra

n: số lớp tường

Nhiệt độ các bề mặt tiếp xúc:

$$t_1 = t_{T_1} - \frac{Q.\ln \frac{R_2}{R_1}}{2\pi.L.\lambda_1.\tau} \quad (1.12a)$$

$$t_2 = t_1 - \frac{Q.\ln \frac{R_3}{R_2}}{2\pi.L.\lambda_2.\tau} = t_{T_2} + \frac{Q.\ln \frac{R_4}{R_3}}{2\pi.L.\lambda_3.\tau} \quad (1.12b)$$

Chú ý: Nếu tỷ số $\frac{R_2}{R_1} < 2$, ta có thể dùng được phương trình của tường phẳng.