

Ασκήσεις Θερμικών Διεργασιών

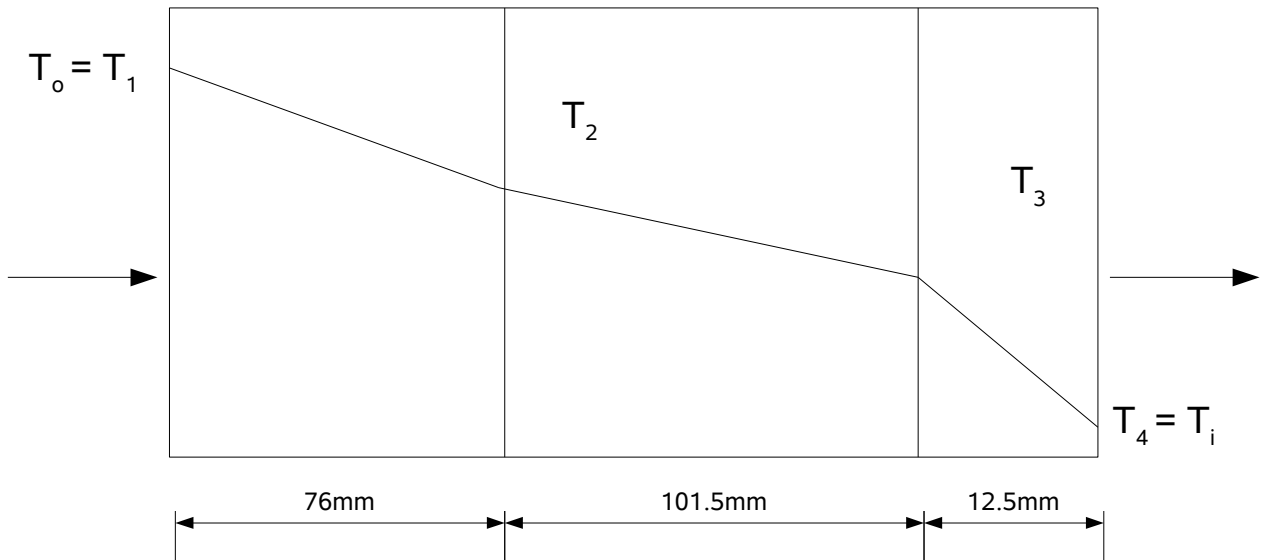
1. Ψυκτικός θάλαμος έχει τα εξής χαρακτηριστικά:

- Επίπεδα κατακόρυφα τοιχώματα
- Τα τοιχώματα αποτελούνται από μπετόν πάχους $x_1 = 76 \text{ mm}$, μόνωση από φελλό πάχους $x_2 = 101.5 \text{ mm}$ και επένδυση από ξύλο πάχους $x_3 = 12.5 \text{ mm}$.
- Θερμοκρασία στο εσωτερικό $T_i = -17^\circ \text{C}$ και στο εξωτερικό $T_o = 24^\circ \text{C}$.
- Θερμικές αγωγιμότητες (σε W / mK): ξύλο, $\kappa_1 = 0.151$, φελλός, $\kappa_2 = 0.043$, μπετόν, $\kappa_3 = 0.765$.

Ζητούνται: α) η ροή θερμότητας ανά μονάδα επιφάνειας, $\frac{\dot{q}}{A}$ β) Η θερμοκρασία T_3 μεταξύ ξύλου και φελλού.

Λύση:

Ένα σκαρίφημα του θερμοκρασιακού προφίλ από το εξωτερικό μέχρι το εσωτερικό δίνεται στο παρακάτω σχήμα:



Η κλίση των ευθειών εξαρτάται από τις θερμικές αγωγιμότητες (όσο πιο μεγάλες, τόσο πιο μεγάλη η μεταβολή της θερμοκρασίας και τόσο πιο απότομη η ευθεία).

$$\text{Ισχύει } \dot{q} = \frac{T_1 - T_2}{\frac{x_1}{\kappa_1 A}} = \frac{T_2 - T_3}{\frac{x_2}{\kappa_2 A}} = \frac{T_3 - T_4}{\frac{x_3}{\kappa_3 A}} = \frac{T_1 - T_4}{\left(\frac{x_1}{\kappa_1} + \frac{x_2}{\kappa_2} + \frac{x_3}{\kappa_3} \right) \frac{1}{A}}$$

$$\text{άρα } \frac{\dot{q}}{A} = \frac{24 - (-17)}{\frac{0.076}{0.765} + \frac{0.1015}{0.043} + \frac{0.0125}{0.151}} = 16.13 \text{ W/m}^2$$

$$\text{Αλλά επίσης, αφού } \frac{\dot{q}}{A} = \frac{T_3 - T_4}{\frac{x_3}{\kappa}} = \frac{T_3 - (-17)}{0.0125 / 0.151} \text{ οπότε βρίσκουμε } T_3 = -15.7^\circ \text{C}.$$

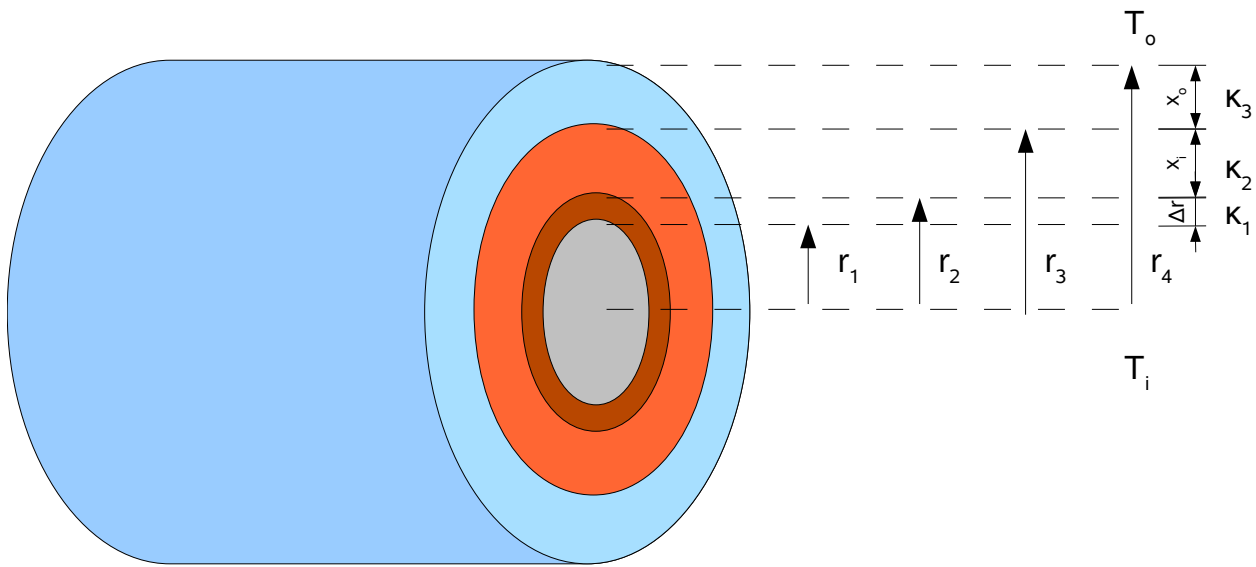
Φυσικά, με παρόμοιο τρόπο μπορούμε να βρούμε και την T_2 η οποία βρίσκεται ίση με 22.4°C .

2. Κυλινδρικός σωλήνας που μεταβιβάζει υπέρθερμο ατμό, έχει τα εξής χαρακτηριστικά:

- Εσωτερική διάμετρος $D_i = 50\text{mm}$, πάχος τοιχώματος $\Delta r = 2\text{mm}$ με θερμική αγωγιμότητα $\kappa = 45\text{ W/mK}$
- Πρώτο μονωτικό στο εσωτερικό, πάχους $x_i = 25\text{mm}$ και θερμικής αγωγιμότητας $\kappa_i = 0.08\text{ W/mK}$
- Δεύτερο μονωτικό στο εξωτερικό, πάχους $x_o = 40\text{mm}$ και θερμικής αγωγιμότητας $\kappa_o = 0.04\text{ W/mK}$
- Η θερμοκρασία του ρευστού στο εσωτερικό είναι $T_i = 280^\circ\text{C}$, ενώ στην εξωτερική επιφάνεια του δεύτερου μονωτικού είναι $T_o = 57^\circ\text{C}$.

Ζητούνται οι απώλειες θερμότητας ανά μήκος σωλήνα.

Λύση:



Σύμφωνα με το ανωτέρω σχήμα:

$$r_1 = r_i = D_i/2 = 50/2 = 25\text{ mm}$$

$$r_2 = r_1 + \Delta r = 27\text{ mm}$$

$$r_3 = r_2 + x_i = 27 + 25 = 52\text{ mm}$$

$$r_4 = r_3 + x_o = 52 + 40 = 92\text{ mm}$$

Ισχύει:

$$\dot{q} = \frac{T_i - T_o}{\frac{r_2 - r_1}{\kappa_1 A_{L1}} + \frac{r_3 - r_2}{\kappa_2 A_{L2}} + \frac{r_4 - r_3}{\kappa_3 A_{L3}}}$$

Θεωρώ μήκος $L = 1\text{ m}$

$$A_1 = 2\pi r_1 L = 0.157\text{ m}^2$$

$$A_2 = 2\pi r_2 L = 0.170\text{ m}^2$$

$$A_3 = 2\pi r_3 L = 0.327\text{ m}^2$$

$$A_4 = 2\pi r_4 L = 0.578\text{ m}^2$$

Επειδή οι λόγοι $r_2/r_1 = 1.1$, $r_3/r_2 = 1.9$, $r_4/r_3 = 1.8$ είναι όλοι μικρότεροι από 2, ισχύει για όλες τις

παραπάνω επιφάνειες ότι $A_L \approx \bar{A} \pm 4\%$ επομένως

$$A_{L1} = (A_1 + A_2)/2 = 0.164 \text{ m}^2$$

$$A_{L2} = (A_2 + A_3)/2 = 0.248 \text{ m}^2$$

$$A_{L3} = (A_3 + A_4)/2 = 0.452 \text{ m}^2$$

$$\dot{q} = \frac{280-57}{\frac{0.027-0.025}{45 \times 0.164} + \frac{0.052-0.027}{0.08 \times 0.247} + \frac{0.092-0.052}{0.04 \times 0.452}} = 64.1 \frac{\text{W}}{\text{m}}$$

3. Έστω εναλλάκτης E: 1-2 (n=2) (διπλής διαδρομής) για θέρμανση αργού πετρελαίου πριν την εισαγωγή του σε στήλη κλασματικής απόσταξης από τους 30 στους 60 °C με θερμό νερό. Το νερό ρέει μέσα από το κέλυφος του εναλλάκτη και η θερμοκρασία του μειώνεται από τους 98 στους 78°C. Η εσωτερική διάμετρος των σωλήνων είναι $D_i = 10 \text{ mm}$. Το πετρέλαιο πυκνότητας $\rho = 800 \text{ kg/m}^3$, και θερμοχωρητικότητας $c_p = 2000 \text{ J/kgK}$ ρέει μέσω αυτών με ταχύτητα $u = 1 \text{ m/s}$. Δίνονται επίσης για τον εναλλάκτη οι συντελεστές $U = 330 \text{ W/m}^2\text{K}$ και $Y = 0.94$.

Ζητείται το μήκος L των σωλήνων.

Λύση:

$$\text{Η ροή θερμότητας δίνεται από: } \dot{q} = U A Y \Delta T_L = \dot{m} c_p (T_{c2} - T_{c1})$$

$$\text{όπου η μαζική παροχή του πετρελαίου είναι } \dot{m} = u \left(\pi \frac{D_i^2}{4} \right) N \rho$$

Συνδυάζοντας τα παραπάνω:

$$U A Y \Delta T_L = N u \rho \left(\pi \frac{D_i^2}{4} \right) c_p (T_{c2} - T_{c1})$$

Το ΔT_L μπορεί να υποκατασταθεί με πολύ καλή ακρίβεια και από την προσέγγισή του με τη μέση τιμή: $\Delta T_L \approx \frac{(T_{h1} - T_{c2}) - (T_{h2} - T_{c1})}{2} = \frac{(98 - 60) - (78 - 30)}{2} = 43^\circ \text{C}$

Τότε, η επιφάνεια του εναλλάκτη βρίσκεται ότι είναι

$$A = \frac{N \times 1 \times 800 \left(\frac{3.141 \times 0.01^2}{4} \right) 2000 \times (60 - 30)}{330 \times 0.94 \times 43} = 0.284 \text{ N}$$

Αυτή όμως είναι ίση με τη συνολική επιφάνεια όλων των διαβάσεων όλων των σωλήνων, άρα:

$$A = N n L \pi D_i = 0.284 \text{ N}$$

επομένως:

$$L = \frac{0.284}{2 \times 3.141 \times 0.01} = 4.5 \text{ m}$$

Φυσικά, το L είναι ανεξάρτητο από τον αριθμό N των σωλήνων γιατί δίνεται ρυθμός ροής πετρελαίου ανά σωλήνα. Θα μπορούσαμε δηλαδή να θεωρήσουμε $N = 1$ και $A_{\text{εναλλάκτη}} = A_{\text{σωλήνα}}$.

4. Θέλουμε να βρούμε το μήκος σωλήνα σε εναλλάκτη 1-6 κελύφους-σωλήνων για συμπύκνωση ατμών πεντανίου. Το νερό ψύξης διέρχεται μέσα από τους σωλήνες με ταχύτητα $u = 1 \text{ m/s}$. Διατίθενται χαλύβδινοι σωλήνες με μήκη $L = 2.5, 3.5, 4.5$ και 5 m και εξωτερική διάμετρο $D_o = 19 \text{ mm}$ και πάχος $x = 1.65 \text{ mm}$.

Ποιου μήκους σωλήνες να διαλέξουμε; Ποια η θερμοκρασία εξόδου του νερού;

Δίνονται:

Συντελεστής συμπύκνωσης πεντανίου $h_o = 1100 \text{ W/m}^2\text{K}$,

συντελεστής μεταφοράς θερμότητας νερού $h_i = 4472 \text{ W/m}^2\text{K}$,

θερμοκρασία συμπύκνωσης πεντανίου $T_{h1} = T_{h2} = T_h = 55^\circ\text{C}$ (έχουμε μόνο αλλαγή φάσης και όχι μεταβολή θερμοκρασίας),

θερμοκρασία εισόδου νερού $T_{c1} = 20^\circ\text{C}$,

θερμική αγωγιμότητα χάλυβα $\kappa_\chi = 45 \text{ W/mK}$,

πυκνότητα νερού $\rho_v = 995.7 \text{ kg/m}^3$

Λύση:

$$(1) \quad \dot{q} = \dot{m}_c (T_{c1} - 20) c_p$$

$$(2) \quad \dot{q} = U_o A_o \Delta T_L$$

$$(3) \quad \Delta \bar{T}_L \approx \frac{(T_h - T_{c1}) - (T_h - T_{c2})}{2} = \frac{T_{c2} - 20}{2} \quad (\text{προσεγγιστική σχέση})$$

$$\text{ή} \quad \Delta \bar{T}_L = \frac{T_{c2} - 20}{\ln \frac{35}{55 - T_{c2}}}$$

$$(4) \quad \frac{1}{U_o} = \frac{1}{h_o} + \frac{D_o}{D_i} \frac{x}{\kappa_\chi} + \frac{D_o}{D_i} \frac{1}{h_i} = \frac{1}{1100} + \frac{19}{17.4} \frac{1.65 \times 10^{-3}}{45} + \frac{19}{15.7} \frac{1}{4472} = 820 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{K}}$$

$$(5) \quad \text{Αριθμός σωλήνων: } N_\sigma = \frac{\dot{m}_c}{S_i u \rho} \Rightarrow N_\sigma = 31.14 \dot{m}_c \quad (\text{Si είναι η εσωτερική διατομή των σωλήνων})$$

$$(6) \quad A_o = \pi D_o L N_\sigma$$

$$(7) \quad \text{Από τις (1), (2) και (3)} \quad A_o = 5.1 \dot{m}_c \ln \frac{35}{55 - T_{c2}}$$

$$(8) \quad \text{Από τις (5), (6) και (7)} \quad L = 2.74 \ln \frac{35}{55 - T_{c2}}$$

Έτσι, συσχετίσαμε το μήκος σωλήνων με τη θερμοκρασία εξόδου του νερού. Τώρα, πρέπει να διαλέξουμε με κάποιο κριτήριο τιμή για τη μία μεταβλητή ώστε να προσδιορίσουμε την άλλη. Σε τέτοιου είδους προβλήματα υπεισέρχονται τεχνικοοικονομικά κριτήρια που επιβάλλουν περιορισμούς στα πλαίσια των οποίων αναζητούμε την καλύτερη δυνατή ανάλυση. Προβλήματα αυτού του είδους θα αναλυθούν εκτενώς στο μάθημα του «Σχεδιασμού Χημικών Βιομηχανιών και Διεργασιών».

Εδώ, θα περιοριστούμε να πούμε τα εξής: συνήθεις περιορισμοί είναι το πάγιο κόστος κατασκευής του εναλλάκτη, το λειτουργικό κόστος και η ανώτερη επιτρεπτή θερμοκρασία εξόδου του νερού. Όσο πιο μεγάλο το μήκος των σωλήνων τόσο πιο μεγάλη και η θερμοκρασία εξόδου του νερού (τείνει σε αυτή του πεντανίου). Συνήθως βάζουμε ένα όριο στους 45 βαθμούς. Τότε υπολογίζεται μήκος σωλήνων $L = 3.5 \text{ m}$.