

Φυσικές Διεργασίες II: Φροντιστήριο 7

ΕΝΑΛΛΑΚΤΕΣ ΚΕΛΥΦΟΥΣ ΑΥΛΩΝ

Άσκηση 1

19600 kg/hr πετρελαϊκού αποστάγματος πυκνότητας 35° API ψύχονται από 121°C στους 49°C χρησιμοποιώντας νερό που θερμαίνεται από 29.5°C σε 49°C. Άλλες τούτο διαθέτουμε εναλλάκτη 1-4 με εσωτερική διάμετρο κελύφους $19\frac{1}{4}$ in, ο οποίος έχει 204 αυλούς εξωτερικής διαμέτρου $\frac{3}{4}$ in, 16 BWG, μήκους 16 ft, διαρρυθμιζόμενους σε τετραγωνική διάταξη με βήμα 1 in. Τα χωρίσματα έχουν βήμα 5 in.

- (a) Ποια εκλογή δίνει ισοσταθμισμένη πτώση πίεσης?
 (b) Ποιος ο διαθέσιμος συντελεστής ρύπανσης?

Το ιξώδες του πετρελαϊκού αποστάγματος είναι 3.1 cp σε 38°C και 1.3 cp σε 99°C. Τιμές σε άλλες θερμοκρασίες μπορούν να ληφθούν είτε με γραμμική παρεμβολή είτε με παρεμβολή σε λογαριθμικό χαρτί.

Λύση

(α) Ποια εκλογή δίνει ισοσταθμισμένη πτώση πίεσης?

Θερμό Ρευστό: Πετρελαϊκό απόσταγμα 35°API

Ψυχρό Ρευστό: Νερό

1. Υπολογισμός της μέσης θερμοκρασίας των ρευστών (θερμοκρασία μίξεως)

$$\left. \begin{matrix} T_{\theta,in} = 121\text{ }^{\circ}\text{C} \\ T_{\theta,out} = 49\text{ }^{\circ}\text{C} \end{matrix} \right\} \Rightarrow T_{\theta,\mu} = \frac{1}{2} (T_{\theta,in} + T_{\theta,out}) \Rightarrow T_{\theta,\mu} = 85\text{ }^{\circ}\text{C} = 185\text{ }^{\circ}\text{F}$$

$$\left. \begin{matrix} T_{\psi,in} = 29.5\text{ }^{\circ}\text{C} \\ T_{\psi,out} = 49\text{ }^{\circ}\text{C} \end{matrix} \right\} \Rightarrow T_{\psi,\mu} = \frac{1}{2} (T_{\psi,in} + T_{\psi,out}) \Rightarrow T_{\psi,\mu} = 39.25\text{ }^{\circ}\text{C} = 102.65\text{ }^{\circ}\text{F}$$

Σε αυτές τις θερμοκρασίες θα υπολογίσουμε τις ιδιότητες των ρευστών:

Θερμό Ρεύμα (Πετρελαϊκό απόσταγμα 35°API, $T_{\theta,\mu} = 185\text{ }^{\circ}\text{F}$)	Ψυχρό Ρεύμα (Νερό, $T_{\psi,\mu} = 102.65\text{ }^{\circ}\text{F}$)
$Cp_{\theta} = 0.53 \frac{Btu}{lb^{\circ}\text{F}} = 2219 \frac{J}{kg\text{ }K}$	$Cp_{\psi} = 1 \frac{Btu}{lb^{\circ}\text{F}} = 4186.8 \frac{J}{kg\text{ }K}$
$k_{\theta} = 0.079 \frac{Btu}{lb\text{ }hr^{\circ}\text{F}} = 0.1315355\text{ }W/mK$	$k_{\psi} = 0.63\text{ }W/mK$
$s_{\theta} = 0.8 = \frac{\rho_{\psi}}{\rho_{H_2O}} \Rightarrow \rho_{\theta} = 800 \frac{kg}{m^3}$ ($\rho_{H_2O} = 1000 \frac{kg}{m^3}$)	$\rho_{\psi} = 1000 \frac{kg}{m^3}$ $\mu_{\psi} = 0.7\text{ }cp = 0.7 * 10^{-3}\text{ }Pa\text{ }s$

Γραμμική παρεμβολή για την εύρεση του ιξώδους του θερμού ρεύματος,

$$T_1 = 38^\circ\text{C} \rightarrow \mu_1 = 3.1 \text{ cp}$$

$$T_2 = 99^\circ\text{C} \rightarrow \mu_2 = 1.3 \text{ cp}$$

$$\mu_\theta(T = 85^\circ\text{C}) = \mu_1 + (\mu_2 - \mu_1) \frac{T - T_1}{T_2 - T_1} \Rightarrow$$

$$\mu_\theta(T = 85^\circ\text{C}) = 1.5 \text{ cp} \Rightarrow \mu_\theta = 1.5 * 10^{-3} \text{ Pa s}$$

$$m_\theta = 19600 \frac{\text{kg}}{\text{hr}} \Rightarrow m_\theta = 5.44 \text{ kg/s}$$

2. Υπολογισμός του ρυθμού μεταφοράς θερμότητας

Θεωρούμε αμελητέες τις θερμικές απώλειες και ότι οι ιδιότητες των ρευστών είναι σταθερές.

$$Q = m_\theta C p_\theta (T_{\theta, \text{in}} - T_{\theta, \text{out}}) = 5.44 \left(\frac{\text{kg}}{\text{s}} \right) 2219 \left(\frac{\text{J}}{\text{kg K}} \right) (121 - 49) (\text{C}) \Rightarrow$$

$$Q = 869138 \text{ W}$$

$$m_\psi = \frac{Q}{C p_\psi (T_{\psi, \text{in}} - T_{\psi, \text{out}})} = \frac{869138 \left(\frac{\text{J}}{\text{s}} \right)}{4186.8 \left(\frac{\text{J}}{\text{kg K}} \right) (49 - 29.5) (\text{C})} \Rightarrow m_\psi = 10.65 \text{ kg/s}$$

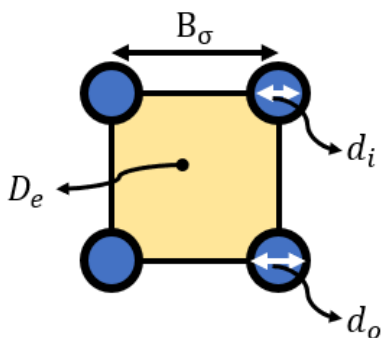
3. Σχήμα εναλλάκτη

Τύπος εναλλάκτη: Κελύφους-Αυλών 1-4 $\Rightarrow \begin{cases} \text{Αριθμός διαδρομών στο κέλυφος: } N_{\delta, \kappa} = 1 \\ \text{Αριθμός διαδρομών στους σωλήνες: } N_{\delta, \sigma} = 4 \end{cases}$

Αριθμός σωλήνων: $N_\sigma = 204$

Μήκος Σωλήνα: $l_\sigma = 16 \text{ ft}$ ή $l_\sigma = 4.8768 \text{ m}$

Εσωτερική διάμετρος κελύφους: $D_K = 19 \frac{1}{4} \text{ in} = 0.48895 \text{ m}$



Βήμα σωληνώσεων: $B_\sigma = 1 \text{ in} = 0.0254 \text{ m}$

Σωλήνες: $d_o = \frac{3}{4} \text{ in} = 0.01905 \text{ m}$

16 BWG \Rightarrow (Πίνακας) $\Rightarrow d_i = 0.620 \text{ in} = 0.015748 \text{ m}$

Βήμα χωρισμάτων: $B_\chi = 5 \text{ in} = 0.127 \text{ m}$

Χωρίσματα με κόψιμο 25%

Υδραυλική ακτίνα:

$$D_e = \frac{4B_\sigma^2 - \pi d_o^2}{\pi d_o} \Rightarrow D_e = 0.0240923 \text{ m}$$

Επιφάνεια κελύφους κατακόρυφο κόψιμο:

$$A_K = \frac{D_K (B_\sigma - d_o) B_\chi}{B_\sigma} \Rightarrow A_K = 0.0155242 \text{ m}^2$$

Αριθμός χωρισμάτων με τοίχωμα στήριξης:

$$N_x + 1 = \frac{l_\sigma}{B_x} \Rightarrow N_x + 1 = 38.4 \approx 39$$

Επιφάνεια διατομής σωλήνων ανά διαδρομή:

$$A_\sigma = \frac{N_\sigma \pi}{N_\delta} d_i^2 \Rightarrow A_\sigma = 0.0099287 \text{ m}^2$$

Ολική υπολογιζόμενη επιφάνεια εναλλαγής:

$$A_o = N_\sigma l_\sigma \pi d_o \Rightarrow A_o = 59.509971 \text{ m}^2$$

4. Υπολογισμός της πτώσης πίεσης

1^η επιλογή:

Πλευρά κελύφους → Ψυχρό ρευστό (Νερό)

Πλευρά Σωλήνων → Θερμό ρευστό (Πετρελαϊκό απόσταγμα)

Πλευρά Κελύφους (Νερό)	Πλευρά Σωλήνων (Πετρελαϊκό Απόσταγμα)
<i>Μαζική Ταχύτητα</i>	
$G_K = \frac{m_K}{A_K} = \frac{m_\psi}{A_K} = 686 \text{ kg/sm}^2$	$G_\sigma = \frac{m_\sigma}{A_\sigma} = \frac{m_\theta}{A_\sigma} = 547.9 \text{ kg/sm}^2$
<i>Αριθμός Reynolds</i>	
$Re_K = \frac{D_e G_K}{\mu_\psi} = 2.36 * 10^4$	$Re_\sigma = \frac{d_i G_\sigma}{\mu_\theta} = 5.75 * 10^3$
<i>Συντελεστής τριβής</i>	
Για $Re_K = 2.36 * 10^4$ από το Σχ.42 σελ.179 (ΑΧΠ) $f_K = 0.265$	$\left. \begin{array}{l} \text{κοινός χάλυβας} \\ d_i = 0.620 \text{ in} \end{array} \right\} \Rightarrow \frac{e}{d_i} = 0.000006$ $\left. \begin{array}{l} \frac{e}{d_i} = 6 * 10^{-5} \\ Re_\sigma = 5.75 * 10^3 \end{array} \right\} \Rightarrow (Moody) f_\sigma = 0.038$
<i>Πτώση πίεσης</i>	
$(\Delta P)_K = (N_x + 1) f_K \frac{D_K \rho_K}{D_e} \frac{\rho_K}{2} \left(\frac{G_K}{\rho_K} \right)^2 \left(\frac{\mu_b}{\mu_w} \right)^{0.14}$ $\Rightarrow \left(\frac{\mu_b}{\mu_w} \right)^{0.14} = 1 \Rightarrow$ $(\Delta P)_K = 49353 \text{ Pa} \Rightarrow (\Delta P)_K = 0.49 \text{ atm}$	$(\Delta P)_\sigma = N_\delta f_\sigma \frac{l_\sigma \rho_\sigma}{d_i} \frac{\rho_\sigma}{2} \left(\frac{G_\sigma}{\rho_\sigma} \right)^2 \left(\frac{\mu_b}{\mu_w} \right)^{0.14}$ $\Rightarrow \left(\frac{\mu_b}{\mu_w} \right)^{0.14} = 1 \Rightarrow$ $(\Delta P)_\sigma = 8831.52 \text{ Pa} = 0.088 \text{ atm}$ $(\Delta P)_{\sigma\tau\rho} = 2 N_\delta \rho_\sigma \left(\frac{G_\sigma}{\rho_\sigma} \right)^2 \Rightarrow$ $(\Delta P)_{\sigma\tau\rho} = 3001.9 \text{ Pa} = 0.03 \text{ atm}$ $(\Delta P)_{\sigma\Delta,\sigma} = (\Delta P)_\sigma + (\Delta P)_{\sigma\tau\rho} = 0.118 \text{ atm}$

Παρατηρώ ότι με αυτή την επιλογή οι πιέσεις δεν είναι καλά ισοσταθμισμένες.

2^η επιλογή:

Πλευρά κελύφους → Θερμό ρευστό (Πετρελαϊκό απόσταγμα)

Πλευρά Σωλήνων → Ψυχρό ρευστό (Νερό)

Πλευρά Κελύφους (Πετρελαϊκό Απόσταγμα)	Πλευρά Σωλήνων (Νερό)
<i>Μαζική Ταχύτητα</i>	
$G_K = \frac{m_K}{A_K} = \frac{m_\theta}{A_K} = 350.4 \text{ kg/sm}^2$	$G_\sigma = \frac{m_\sigma}{A_\sigma} = \frac{m_\psi}{A_\sigma} = 1072.64 \text{ kg/sm}^2$
<i>Αριθμός Reynolds</i>	
$Re_K = \frac{D_e G_K}{\mu_\theta} = 5628.28$	$Re_\sigma = \frac{d_i G_\sigma}{\mu_\psi} = 2.3 * 10^4$
<i>Συντελεστής τριβής</i>	
Για $Re_K = 5628.28$ από το Σχ.42 σελ.179 (ΑΧΠ) $f_K = 0.39$	$\left. \begin{array}{l} \text{κοινός χάλυβας} \\ d_i = 0.620 \text{ in} \end{array} \right\} \Rightarrow \frac{e}{d_i} = 0.000006$ $\left. \begin{array}{l} \frac{e}{d_i} = 6 * 10^{-5} \\ Re_\sigma = 2.3 * 10^4 \end{array} \right\} \Rightarrow (Moody)f_\sigma = 0.024$
<i>Πτώση πίεσης</i>	
$(\Delta P)_K = (N_x + 1) f_K \frac{D_K \rho_K}{D_e} \frac{\rho_K}{2} \left(\frac{G_K}{\rho_K} \right)^2 \left(\frac{\mu_b}{\mu_w} \right)^{0.14}$ $\Rightarrow \left(\frac{\mu_b}{\mu_w} \right)^{0.14} = 1 \Rightarrow$ $(\Delta P)_K = 23690.44 \text{ Pa} \Rightarrow (\Delta P)_K = \mathbf{0.234 \text{ atm}}$	$(\Delta P)_\sigma = N_\delta f_\sigma \frac{l_\sigma \rho_\sigma}{d_i} \frac{\rho_\sigma}{2} \left(\frac{G_\sigma}{\rho_\sigma} \right)^2 \left(\frac{\mu_b}{\mu_w} \right)^{0.14}$ $\Rightarrow \left(\frac{\mu_b}{\mu_w} \right)^{0.14} = 1 \Rightarrow$ $(\Delta P)_\sigma = 17102.46 \text{ Pa} = 0.1687 \text{ atm}$ $(\Delta P)_{\sigma\tau\rho} = 2 N_\delta \rho_\sigma \left(\frac{G_\sigma}{\rho_\sigma} \right)^2 \Rightarrow$ $(\Delta P)_{\sigma\tau\rho} = 0.0908 \text{ atm}$ $(\Delta P)_{\sigma\Delta\sigma} = (\Delta P)_\sigma + (\Delta P)_{\sigma\tau\rho} = \mathbf{0.259 \text{ atm}}$

Παρατηρώ ότι με αυτή την επιλογή οι πτώσεις πίεσης είναι πιο ισοσταθμισμένες, επομένως επιλέγω το θερμό ρευστό στην πλευρά του κελύφους και το ψυχρό ρευστό στην πλευρά των σωλήνων.

(β) Ποιος ο διαθέσιμος συντελεστής ρύπανσης?

5. Υπολογισμός της φαινόμενης διαφοράς θερμοκρασίας

$$\left. \begin{array}{l} R = \frac{T_1 - T_2}{t_2 - t_1} = \frac{121 - 49}{49 - 29.5} \Rightarrow R = 3.692 \\ S = \frac{t_2 - t_1}{T_1 - t_1} = \frac{49 - 29.5}{121 - 29.5} \Rightarrow S = 0.213 \end{array} \right\} \Rightarrow F_T = 0.815 > 0.75$$

Επομένως μπορεί να χρησιμοποιηθεί ο εναλλάκτης.

$$(\Delta T)_{lm} = \frac{(T_{\theta,in} - T_{\psi,out}) - (T_{\theta,out} - T_{\psi,in})}{\ln \left(\frac{T_{\theta,in} - T_{\psi,out}}{T_{\theta,out} - T_{\psi,in}} \right)} \Rightarrow (\Delta T)_{lm} = 40.2 \text{ K}$$

$$(\Delta T)_\varphi = (\Delta T)_{lm} F_T \Rightarrow (\Delta T)_\varphi = 32.763 \text{ K}$$

6. Υπολογισμός του συντελεστή μεταφοράς θερμότητας

Πλευρά Κελύφους (Πετρελαϊκό Απόσταγμα)	Πλευρά Σωλήνων (Νερό)
$A_K = 0.0155242 \text{ m}^2$	$A_\sigma = 0.0099287 \text{ m}^2$
$G_K = 350.425 \text{ kg/m}^2\text{s}$	$G_\sigma = 1051.36 \text{ kg/m}^2\text{s}$
$Re_K = 5.65 * 10^3$	$Re_\sigma = 2.3 * 10^4$
$j_{H,K} = 0.36 Re_K^{0.55} = 42$	$j_{H,\sigma} = 0.026 Re_\sigma^{0.8} = 80$
$Pr_K = \frac{C p_\theta \mu_\theta}{k_\theta} = 25.3$	$Pr_\sigma = \frac{C p_\psi \mu_\psi}{k_\psi} = 4.652$
$h_o = j_{H,K} \frac{k_\theta}{D_e} (Pr)^{\frac{1}{3}} \left(\frac{\mu_b}{\mu_w}\right)^{0.14} \Rightarrow$ $h_o = 670.097 \text{ W/m}^2\text{K}$	$h_i = j_{H,\sigma} \frac{k_\psi}{d_i} (Pr)^{\frac{1}{3}} \left(\frac{\mu_b}{\mu_w}\right)^{0.14} \Rightarrow$ $h_i = 5392.993 \text{ W/m}^2\text{K}$

7. Ολικός συντελεστής μεταφοράς Θερμότητας

$$\text{κοινός χάλυβας} \Rightarrow k_T = 50 \text{ W/m}^2\text{K}$$

$$U_o = \frac{2}{d_o} \left\{ \frac{2}{d_i h_i} + \frac{1}{k_T} \ln\left(\frac{d_o}{d_i}\right) + \frac{2}{d_o h_o} \right\}^{-1} \Rightarrow U_o = 570.5 \text{ W/m}^2\text{K}$$

8. Ολικός συντελεστής μεταφοράς θερμότητας για σχεδιασμό

$$Q = A_o U_{\sigma\chi} (\Delta T)_\varphi \Rightarrow U_{\sigma\chi} = \frac{Q}{A_o (\Delta T)_\varphi} \Rightarrow U_{\sigma\chi} = 438.4 \text{ W/m}^2\text{K}$$

9. Υπολογισμός του διαθέσιμου συντελεστή ρύπανσης

$$R_\rho = \frac{1}{U_{\sigma\chi}} - \frac{1}{U_o} \Rightarrow R_\rho = 0.00053 \text{ m}^2\text{K/W}$$

Άσκηση 2

Σε μια νέα εγκατάσταση πρέπει να προθερμάνουμε μια παροχή 67590 kg/hr ακάθαρτου πετρελαίου πυκνότητας 34° API από 76.5°C σε 140.5°C , ώστε να τροφοδοτήσουμε μια αποστακτική στήλη. Για αυτό διαθέτουμε σχετικά απεριόριστη ποσότητα καύσιμου πετρελαίου (gas oil) πυκνότητας 33° API του οποίου ο αγωγός περνά κοντά από την αποστακτική στήλη. Η θερμοκρασία του καύσιμου πετρελαίου είναι 277°C . Επειδή το κόστος άντληση του ψυχρού καύσιμου πετρελαίου είναι απαγορευτικό λόγω μεγάλου ιξώδους, η θερμοκρασία δεν πρέπει να χαμηλωθεί κάτω από 149°C .

Προς τούτο διαθέτουμε εναλλάκτη 1-6 με εσωτερική διάμετρο κελύφους 25 in , ο οποίος έχει 25 αυλούς εξωτερικής διαμέτρου 1 in , 13 BWG, μήκους 16 ft , διαρρυθμιζόμενους σε τριγωνική διάταξη με βήμα $1\frac{1}{4} \text{ in}$. Τα χωρίσματα έχουν βήμα 5 in . Η επιτρεπόμενη πτώση πίεσης για το καύσιμο πετρέλαιο είναι $0,68 \text{ atm}$ ενώ για το ακάθαρτο πετρέλαιο είναι 1 atm . Εάν ο εναλλάκτης καθαριστεί καλά, θα είναι ικανοποιητικός, και αν ναι πόσος θα είναι ο ολικός συντελεστής ρύπανσης?

Το ιξώδες του καύσιμου πετρελαίου είναι 0.4 cp σε 277°C και 0.7 cp σε 149°C . Το ιξώδες του ακάθαρτου πετρελαίου είναι 0.9 cp σε 140.5°C και 2.1 cp σε 76.5°C . Ενδιάμεσες τιμές μπορούν να ληφθούν χρησιμοποιώντας γραμμική παρεμβολή σε λογαριθμικό χαρτί.

Λύση

Θερμό ρευστό: Καύσιμο πετρέλαιο

Ψυχρό ρευστό: Ακάθαρτο πετρέλαιο

1. Υπολογισμός της μέσης θερμοκρασίας των ρευστών (θερμοκρασία μίξεως)

$$\left. \begin{array}{l} T_{\theta,in} = 277^\circ \text{C} \\ T_{\theta,out} = 149^\circ \text{C} \end{array} \right\} \Rightarrow T_{\theta,\mu} = \frac{1}{2} (T_{\theta,in} + T_{\theta,out}) \Rightarrow T_{\theta,\mu} = 213^\circ \text{C} = 415.4^\circ \text{F}$$

$$\left. \begin{array}{l} T_{\psi,in} = 76.5^\circ \text{C} \\ T_{\psi,out} = 140.5^\circ \text{C} \end{array} \right\} \Rightarrow T_{\psi,\mu} = \frac{1}{2} (T_{\psi,in} + T_{\psi,out}) \Rightarrow T_{\psi,\mu} = 108.5^\circ \text{C} = 227.3^\circ \text{F}$$

Σε αυτές τις θερμοκρασίες θα υπολογίσουμε τις ιδιότητες των ρευστών:

Θερμό Ρεύμα (Καύσιμο πετρέλαιο 33°API , $T_{\theta,\mu} = 415.4^\circ \text{F}$)	Ψυχρό Ρεύμα (Ακάθαρτο πετρέλαιο 34°API , $T_{\psi,\mu} = 227.3^\circ \text{F}$)
$c_{p\theta} = 2721.42 \frac{\text{J}}{\text{kg K}}$	$c_{p\psi} = 2260.872 \frac{\text{J}}{\text{kg K}}$
$k_\theta = 0.1203 \text{ W/mK}$	$k_\psi = 0.12894 \text{ W/mK}$
$\rho_\theta = 720 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$	$\rho_\psi = 790 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$

Γραμμική παρεμβολή σε λογαριθμικό χαρτί για την εύρεση του ιξώδους του θερμού ρεύματος,

$$T_1 = 149^\circ \text{C} \rightarrow \mu_1 = 0.7 \text{ cp}$$

$$T_2 = 277^\circ \text{C} \rightarrow \mu_2 = 0.4 \text{ cp}$$

$$\log(\mu_\theta(T = 213^\circ \text{C})) = \log(\mu_1) + (\log(\mu_2) - \log(\mu_1)) \frac{\log T - \log T_1}{\log T_2 - \log T_1} \Rightarrow$$

$$\mu_{\theta}(T = 213^{\circ}\text{C}) = 0.5069 \text{ cp} \Rightarrow \mu_{\theta} = 0.51 * 10^{-3} \text{ Pa s}$$

Γραμμική παρεμβολή σε λογαριθμικό χαρτί για την εύρεση του ιξώδους του ψυχρού ρεύματος,

$$T_1 = 76.5^{\circ}\text{C} \rightarrow \mu_1 = 2.1 \text{ cp}$$

$$T_2 = 140.5^{\circ}\text{C} \rightarrow \mu_2 = 0.9 \text{ cp}$$

$$\log(\mu_{\psi}(T = 108.5^{\circ}\text{C})) = \log(\mu_1) + (\log(\mu_2) - \log(\mu_1)) \frac{\log T - \log T_1}{\log T_2 - \log T_1} \Rightarrow$$

$$\mu_{\psi}(T = 108.5^{\circ}\text{C}) = 1.29 * 10^{-3} \text{ Pa s}$$

Επίσης για το ψυχρό ρεύμα έχω ότι:

$$m_{\psi} = 67590 \frac{\text{kg}}{\text{hr}} \Rightarrow m_{\psi} = 18.775 \text{ kg/s}$$

2. Υπολογισμός του ρυθμού μεταφοράς θερμότητας

Θεωρούμε αμελητέες τις θερμικές απώλειες και ότι οι ιδιότητες των ρευστών είναι σταθερές.

$$Q = m_{\theta} C p_{\theta} (T_{\theta, in} - T_{\theta, out}) \Rightarrow$$

$$Q = 2719 \text{ kW}$$

$$m_{\theta} = \frac{Q}{C p_{\theta} (T_{\theta, in} - T_{\theta, out})} \Rightarrow m_{\theta} = 7.799 \text{ kg/s}$$

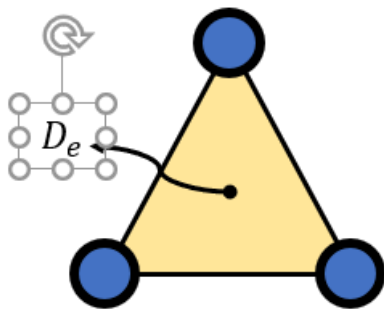
3. Σχήμα εναλλάκτη

Τύπος εναλλάκτη: Κελύφους-Αυλών 1-6 $\Rightarrow \begin{cases} \text{Αριθμός διαδρομών στο κέλυφος: } N_{\delta, \kappa} = 1 \\ \text{Αριθμός διαδρομών στους σωλήνες: } N_{\delta, \sigma} = 6 \end{cases}$

Αριθμός σωλήνων: $N_{\sigma} = 252$

Μήκος Σωλήνα: $l_{\sigma} = 16 \text{ ft}$ ή $l_{\sigma} = 4.8768 \text{ m}$

Εσωτερική διάμετρος κελύφους: $D_K = 25 \text{ in} = 0.635 \text{ m}$



Βήμα σωληνώσεων: $B_{\sigma} = 1 \frac{1}{4} \text{ in} = 0.03175 \text{ m}$

Σωλήνες: $d_o = 1 \text{ in} = 0.0254 \text{ m}$

13 BWG \Rightarrow (Πίνακας) $\Rightarrow d_i = 0.02057 \text{ m}$

Βήμα χωρισμάτων: $B_x = 5 \text{ in} = 0.127 \text{ m}$

Χωρίσματα με κόψιμο 25%

Υδραυλική ακτίνα:

$$D_e = \frac{2\sqrt{3}B_{\sigma}^2 - \pi d_o^2}{\pi d_o} \Rightarrow D_e = 0.0183839 \text{ m}$$

Επιφάνεια κελύφους κατακόρυφο κόψιμο:

$$A_K = \frac{D_K(B_\sigma - d_o)B_\chi}{B_\sigma} \Rightarrow A_K = 0.016129 \text{ m}^2$$

Αριθμός χωρισμάτων με τοίχωμα στήριξης:

$$N_\chi + 1 = \frac{l_\sigma}{B_\chi} \Rightarrow N_\chi + 1 = 38.4 \approx 39$$

Επιφάνεια διατομής σωλήνων ανά διαδρομή:

$$A_\sigma = \frac{N_\sigma \pi}{N_\delta 4} d_i^2 \Rightarrow A_\sigma = 0.0139559 \text{ m}^2$$

Ολική υπολογιζόμενη επιφάνεια εναλλαγής:

$$A_o = N_\sigma l_\sigma \pi d_o \Rightarrow A_o = 98.016423 \text{ m}^2$$

4. Υπολογισμός της πτώσης πίεσης

Πλευρά κελύφους → Θερμό ρευστό

Πλευρά Σωλήνων → Ψυχρό ρευστό

Πλευρά Κελύφους (Καύσιμο πετρέλαιο)	Πλευρά Σωλήνων (Ακάθαρο πετρέλαιο)
<i>Μαζική Ταχύτητα</i>	
$G_K = \frac{m_K}{A_K} = \frac{m_\theta}{A_K} = 483.54 \text{ kg/sm}^2$	$G_\sigma = \frac{m_\sigma}{A_\sigma} = \frac{m_\psi}{A_\sigma} = 1343.31 \text{ kg/sm}^2$
<i>Αριθμός Reynolds</i>	
$Re_K = \frac{D_e G_K}{\mu_\theta} = 17430$	$Re_\sigma = \frac{d_i G_\sigma}{\mu_\psi} = 21420$
<i>Συντελεστής τριβής</i>	
Για $Re_K = 17430$ από το Σχ.42 σελ.179 (ΑΧΠ) $f_K = 0.28$	$\left. \begin{array}{l} \text{κοινός χάλυβας} \\ d_i = 0.620 \text{ in} \end{array} \right\} \Rightarrow \frac{e}{d_i} = 0.000006$ $\left. \begin{array}{l} \frac{e}{d_i} = 6 * 10^{-5} \\ Re_\sigma = 21420 \end{array} \right\} \Rightarrow (Moody) f_\sigma = 0.024$
<i>Πτώση πίεσης</i>	
$(\Delta P)_K = (N_\chi + 1) f_K \frac{D_K \rho_K}{D_e 2} \left(\frac{G_K}{\rho_K}\right)^2 \left(\frac{\mu_b}{\mu_w}\right)^{0.14}$ $\Rightarrow \left(\frac{\mu_b}{\mu_w}\right)^{0.14} = 1 \Rightarrow$ $(\Delta P)_K = 0.6 \text{ atm} < 0.68 \text{ atm}$	$(\Delta P)_\sigma = N_\delta f_\sigma \frac{l_\sigma \rho_\sigma}{d_i 2} \left(\frac{G_\sigma}{\rho_\sigma}\right)^2 \left(\frac{\mu_b}{\mu_w}\right)^{0.14} \Rightarrow \left(\frac{\mu_b}{\mu_w}\right)^{0.14}$ $= 1 \Rightarrow$ $(\Delta P)_\sigma = 0.479 \text{ atm}$ $(\Delta P)_{\sigma\tau\rho} = 2N_\delta \rho_\sigma \left(\frac{G_\sigma}{\rho_\sigma}\right)^2 \Rightarrow$ $(\Delta P)_{\sigma\tau\rho} = 0.271 \text{ atm}$ $(\Delta P)_{\sigma\Delta,\sigma} = (\Delta P)_\sigma + (\Delta P)_{\sigma\tau\rho} = 0.75 \text{ atm} < 1 \text{ atm}$

Παρατηρώ ότι και στην πλευρά του κελύφους και στην πλευρά των σωλήνων, η υπολογιζόμενη πτώση πίεσης είναι μικρότερη από την ελάχιστη επιτρεπόμενη, επομένως στην πλευρά του κελύφους θα βάλω το θερμό ρευστό και στην πλευρά των σωλήνων το ψυχρό ρευστό.

5. Υπολογισμός της φαινόμενης διαφοράς θερμοκρασίας

$$\left. \begin{aligned} R &= \frac{T_1 - T_2}{t_2 - t_1} \Rightarrow R = 2 \\ S &= \frac{t_2 - t_1}{T_1 - t_1} \Rightarrow S = 0.32 \end{aligned} \right\} \Rightarrow F_T = 0.845 > 0.75$$

Επομένως μπορεί να χρησιμοποιηθεί ο εναλλάκτης.

$$(\Delta T)_{lm} = \frac{(T_{\theta,in} - T_{\psi,out}) - (T_{\theta,out} - T_{\psi,in})}{\ln \left(\frac{T_{\theta,in} - T_{\psi,out}}{T_{\theta,out} - T_{\psi,in}} \right)} \Rightarrow (\Delta T)_{lm} = 101.15 \text{ K}$$

$$(\Delta T)_{\varphi} = (\Delta T)_{lm} F_T \Rightarrow (\Delta T)_{\varphi} = 85.472 \text{ K}$$

6. Υπολογισμός του συντελεστή μεταφοράς θερμότητας

Πλευρά Κελύφους (Καύσιμο πετρέλαιο)	Πλευρά Σωλήνων (Ακάθαρτο πετρέλαιο)
$A_K = 0.016129 \text{ m}^2$	$A_{\sigma} = 0.0139559 \text{ m}^2$
$G_K = 483.54 \text{ kg/m}^2\text{s}$	$G_{\sigma} = 1343.31 \text{ kg/m}^2\text{s}$
$Re_K = 17430$	$Re_{\sigma} = 21420$
$j_{H,K} = 0.36 Re_K^{0.55} = 77.44$	$j_{H,\sigma} = 0.026 Re_{\sigma}^{0.8} = 75.8$
$Pr_K = \frac{C_p \mu_{\theta}}{k_{\theta}} = 11.54$	$Pr_{\sigma} = \frac{C_p \mu_{\psi}}{k_{\psi}} = 22.62$
$h_o = j_{H,K} \frac{k_{\theta}}{D_e} (Pr)^{\frac{1}{3}} \left(\frac{\mu_b}{\mu_w} \right)^{0.14} \Rightarrow$ $h_o = 1145.3 \text{ W/m}^2\text{K}$	$h_i = j_{H,\sigma} \frac{k_{\psi}}{d_i} (Pr)^{\frac{1}{3}} \left(\frac{\mu_b}{\mu_w} \right)^{0.14} \Rightarrow$ $h_i = 1343.74 \text{ W/m}^2\text{K}$

7. Ολικός συντελεστής μεταφοράς Θερμότητας

$$\text{κοινός χάλυβας} \Rightarrow k_T = 50 \text{ W/m}^2\text{K}$$

$$U_o = \frac{2}{d_o} \left\{ \frac{2}{d_i h_i} + \frac{1}{k_T} \ln \left(\frac{d_o}{d_i} \right) + \frac{2}{d_o h_o} \right\}^{-1} \Rightarrow U_o = 541.66 \text{ W/m}^2\text{K}$$

8. Ολικός συντελεστής μεταφοράς θερμότητας για σχεδιασμό

$$Q = A_o U_{\sigma\chi} (\Delta T)_{\varphi} \Rightarrow U_{\sigma\chi} = \frac{Q}{A_o (\Delta T)_{\varphi}} \Rightarrow U_{\sigma\chi} = 324.36 \text{ W/m}^2\text{K}$$

9. Υπολογισμός του διαθέσιμου συντελεστή ρύπανσης

$$R_\rho = \frac{1}{U_{\sigma\chi}} - \frac{1}{U_o} \Rightarrow R_\rho = 0.0001237 \text{ m}^2\text{K/W}$$

Ο συντελεστής ρύπανσης είναι αρκετά μεγάλος ώστε ο εναλλάκτης να χρησιμοποιηθεί με ασφάλεια.

Άσκηση 3

27000 $\frac{kg}{hr}$ 25% δ/τος NaCl σε νερό ψύχονται από 65.5 °C σε 37.5 °C χρησιμοποιώντας νερό εισόδου 26.5 °C. Τι θερμοκρασία εξόδου του νερού μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε?

Για την εφαρμογή διαθέτουμε εναλλάκτη 1-2 με εσωτερική διάμετρο κελύφους $24\frac{1}{4}$ in, ο οποίος έχει 302 αυλούς εξωτερικής διαμέτρου $\frac{3}{4}$ in, 14 BWG, μήκους 16 ft, διαρρυθμιζόμενους σε τριγωνική διάταξη με βήμα 1 in. Τα χωρίσματα έχουν βήμα 5 in.

(a) Ποιες είναι οι πτώσεις πιέσεως?

(b) Είναι κατάλληλος ο εναλλάκτης και αν ναι, πόσος είναι ο διαθέσιμος συντελεστής ρύπανσης?

Λύση

Θερμό ρευστό: Διάλυμα 25% NaCl σε νερό

Ψυχρό ρευστό: Νερό

- Υπολογισμός της μέσης θερμοκρασίας των ρευστών (θερμοκρασία μίξεως)

$$\left. \begin{array}{l} T_{\theta,in} = 65.5 \text{ } ^\circ\text{C} \\ T_{\theta,out} = 37.5 \text{ } ^\circ\text{C} \end{array} \right\} \Rightarrow T_{\theta,\mu} = \frac{1}{2} (T_{\theta,in} + T_{\theta,out}) \Rightarrow T_{\theta,\mu} = 51.5 \text{ } ^\circ\text{C} = 125^\circ\text{F}$$

$$\left. \begin{array}{l} T_{\psi,in} = 76.5 \text{ } ^\circ\text{C} \\ T_{\psi,out} = ? \end{array} \right\} \Rightarrow T_{\psi,\mu} = \frac{1}{2} (T_{\psi,in} + T_{\psi,out}) \Rightarrow T_{\psi,\mu} = ?$$

Σε αυτές τις θερμοκρασίες θα υπολογίσουμε τις ιδιότητες των ρευστών:

Θερμό Ρεύμα (Διάλυμα 25% NaCl σε νερό)	Ψυχρό Ρεύμα (Νερό)
$Cp_\theta = 0.82 \frac{Btu}{lb^\circ F} = 3433.176 \frac{J}{kg K}$	$Cp_\psi = ?$
$k_\theta = 0.647 W/mK$	$k_\psi = ?$
$s_\theta = 1.19 = \frac{\rho_\psi}{\rho_{H_2O}} \Rightarrow \rho_\theta = 1190 \frac{kg}{m^3}$ ($\rho_{H_2O} = 1000 \frac{kg}{m^3}$)	$\rho_\psi = ?$
$\mu_\theta = 1.25 cp = 1.25 * 10^{-3} Pa s$	

$$m_\theta = 27000 \frac{kg}{hr} = 7.5 kg/s$$

Δεν μπορώ να υπολογίσω τις ιδιότητες του νερό (ψυχρό ρευστό) καθώς δεν έχω πληροφορίες για την θερμοκρασία εξόδου.

- Σχήμα εναλλάκτη

Τύπος εναλλάκτη: Κελύφους-Αυλών 1-2 $\Rightarrow \begin{cases} \text{Αριθμός διαδρομών στο κέλυφος: } N_{\delta,\kappa} = 1 \\ \text{Αριθμός διαδρομών στους σωλήνες: } N_{\delta,\sigma} = 2 \end{cases}$

Αριθμός σωλήνων: $N_\sigma = 302$

Μήκος Σωλήνα: $l_\sigma = 16 \text{ ft}$ ή $l_\sigma = 4.8768 \text{ m}$

Εσωτερική διάμετρος κελύφους: $D_K = 21 \frac{1}{4} \text{ in} = 0.53975 \text{ m}$

Βήμα σωληνώσεων: $B_\sigma = 1 \text{ in} = 0.0254 \text{ m}$

Σωλήνες: $d_o = \frac{3}{4} \text{ in} = 0.01905 \text{ m}$

$$14 \text{ BWG} \Rightarrow (\text{Πίνακας}) \Rightarrow d_i = 0.584 \text{ in} = 0.0148336 \text{ m}$$

Βήμα χωρισμάτων: $B_\chi = 5 \text{ in} = 0.127 \text{ m}$

Χωρίσματα με κόψιμο 25%

Υδραυλική ακτίνα:

$$D_e = \frac{2\sqrt{3}B_\sigma^2 - \pi d_o^2}{\pi d_o} \Rightarrow D_e = 0.0183123 \text{ m}$$

Επιφάνεια κελύφους κατακόρυφο κόψιμο:

$$A_K = \frac{D_K(B_\sigma - d_o)B_\chi}{B_\sigma} \Rightarrow A_K = 0.0171371 \text{ m}^2$$

Αριθμός χωρισμάτων με τοίχωμα στήριξης:

$$N_\chi + 1 = \frac{l_\sigma}{B_\chi} \Rightarrow N_\chi + 1 = 38.4 \approx 39$$

Επιφάνεια διατομής σωλήνων ανά διαδρομή:

$$A_\sigma = \frac{N_\sigma \pi}{N_\delta} \frac{d_i^2}{4} \Rightarrow A_\sigma = 0.0260819 \text{ m}^2$$

Ολική υπολογιζόμενη επιφάνεια εναλλαγής:

$$A_o = N_\sigma l_\sigma \pi d_o \Rightarrow A_o = 88.098095 \text{ m}^2$$

$$Q = m_\theta C p_\theta (T_{\theta in} - T_{\theta out}) \Rightarrow Q = 720.966 \text{ kW}$$

$$Q = m_\theta C p_\theta (T_{\theta in} - T_{\theta out}) = m_\psi C p_\psi (T_{\psi in} - T_{\psi out}) \Rightarrow$$

$$T_{\psi out} = T_{\psi in} + \frac{(m_\theta C p_\theta (T_{\theta in} - T_{\theta out}))}{m_\psi C p_\psi} \quad (1)$$

Παρατηρώ ότι στην εξίσωση (1) έχουμε 3 άγνωστες μεταβλητές, εκ των οποίων 2 είναι ανεξάρτητες $T_{\psi out}$, m_ψ και μία είναι εξαρτημένη $C p_\psi = f(T_{\psi, \mu})$. Για την επίλυση του προβλήματος χρειαζόμαστε να προσδιορίσουμε την $T_{\psi out}$. Μια επιλογή θα ήταν να προσδιορίσουμε με δοκιμή και σφάλμα την μαζική παροχή, παρόλα αυτά αυτή η λύση δεν ενδείκνυται σε τέτοια προβλήματα καθώς η παροχή μπορεί να υπόκειται σε περιορισμούς που μπορούμε να αγνοούμε. Θα ακολουθήσουμε την παρακάτω διεργασία.

Ως γνωστών αποφεύγουμε να λειτουργούμε εναλλάκτες τύπου κελύφους-αυλών σε περιοχή του F_T γύρω στο 0.75 ώστε να έχουμε μεγάλο περιθώριο ασφάλειας όσον αφορά την λειτουργία και την αποδοτικότητα των εναλλακτών. Επομένως έχουμε την επιπρόσθετη πληροφορία ότι:

$$F_T > 0.75$$

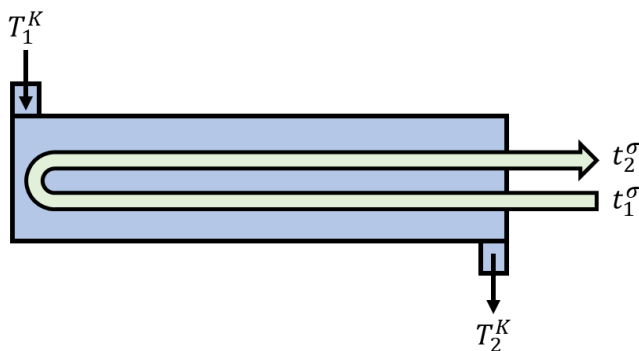
Οι παράμετροι R και S ορίζονται με τον παρακάτω τρόπο:

$$R = \frac{\text{Αλλαγή θερμοκρασία στο κέλυφος}}{\text{Αλλαγή θερμοκρασία στο σωλήνα}} = \frac{T_1^K - T_2^K}{t_2^\sigma - t_1^\sigma}$$

$$S = \frac{\text{Αλλαγή θερμοκρασία στο σωλήνα}}{\text{Διάστημα θερμοκρασιών}} = \frac{t_2^\sigma - t_1^\sigma}{T_1^K - t_1^\sigma}$$

Επομένως, αναλόγως με την κατανομή των ρευστών στον εναλλάκτη η κατάσταση μπορεί να είναι διαφορετική. Θα εξετάσουμε και τις δύο περιπτώσεις έτσι ώστε να δούμε ποια από τις δύο δίνει πιο ισοσταθμισμένη πτώση πίεσης και καλύτερο τελικό συντελεστή ρύπανσης.

I. Ρευστό Κελύφους (Νερό) / Ρευστό σωλήνων (Διάλυμα NaCl)



$$T_1^K = 26.5 \text{ }^\circ\text{C} \quad T_2^K = ?$$

$$t_1^\sigma = 65.5 \text{ }^\circ\text{C} \quad t_2^\sigma = 37.5 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$R = \frac{T_1^K - T_2^K}{t_2^\sigma - t_1^\sigma} = \frac{26.5 - T_2}{-2.8} \quad (2)$$

$$S = \frac{t_2^\sigma - t_1^\sigma}{T_1^K - t_1^\sigma} = 0.72$$

Από το διάγραμμα για εναλλάκτη τύπου 1-2, υποθέτοντας ότι $F_T = 0.875 > 0.75$ και για $S = 0.72$ παίρνουμε ότι:

$$R = 0.3 \Rightarrow (2) \Rightarrow T_2^K = 26.5 + 28 * 0.3 \Rightarrow T_2^K = 34.9 \sim 35^\circ\text{C}$$

Τώρα μπορώ να υπολογίσω τις ιδιότητες και του ψυχρού ρευστού και να συμπληρώσω τον πίνακα.

$$\left. \begin{array}{l} T_{\psi,in} = 76.5 \text{ }^\circ\text{C} \\ T_{\psi,out} = 35 \text{ }^\circ\text{C} \end{array} \right\} \Rightarrow T_{\psi,\mu} = \frac{1}{2} (T_{\psi,in} + T_{\psi,out}) \Rightarrow T_{\psi,\mu} = 30.75^\circ\text{C} = 87.35^\circ\text{F}$$

Σε αυτές τις θερμοκρασίες θα υπολογίσουμε τις ιδιότητες των ρευστών:

Θερό Ρεύμα (Διάλυμα 25% NaCl σε νερό)	Ψυχρό Ρεύμα (Νερό)
$Cp_\theta = 0.82 \frac{Btu}{lb^\circ F} = 3433.176 \frac{J}{kg K}$	$Cp_\psi = 4186.8 J/kgK$
$k_\theta = 0.647 W/mK$	$k_\psi = 0.63 W/mK$
$s_\theta = 1.19 = \frac{\rho_\psi}{\rho_{H2O}} \Rightarrow \rho_\theta = 1190 \frac{kg}{m^3}$ ($\rho_{H2O} = 1000 \frac{kg}{m^3}$)	$\rho_\psi = 1000 kg/m^3$
$\mu_\theta = 1.25 cp = 1.25 * 10^{-3} Pa s$	$\mu_\psi = 0.85 cp = 0.85 * 10^{-3} Pa s$

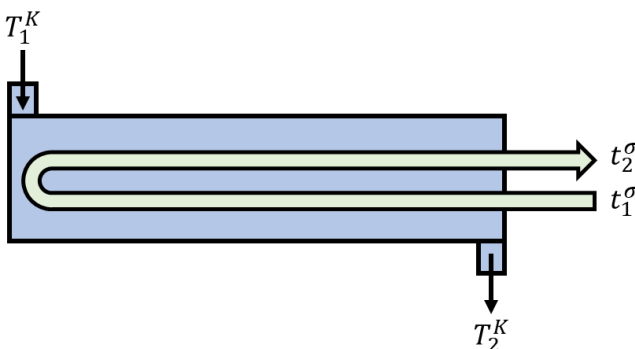
$$m_{\psi} = \frac{Q}{Cp_{\psi}(T_{\psi,in} - T_{\psi,out})} = 20.26 \text{ kg/s}$$

• Υπολογισμός της πτώσης πίεσης

Πλευρά Κελύφους (Νερό)	Πλευρά Σωλήνων (Διάλυμα NaCl)
<i>Μαζική Ταχύτητα</i>	
$G_K = \frac{m_K}{A_K} = \frac{m_{\psi}}{A_K} = 1205 \text{ kg/sm}^2$	$G_{\sigma} = \frac{m_{\sigma}}{A_{\sigma}} = \frac{m_{\theta}}{A_{\sigma}} = 287.6 \text{ kg/sm}^2$
<i>Αριθμός Reynolds</i>	
$Re_K = \frac{D_e G_K}{\mu_{\psi}} = 2.6 * 10^4$	$Re_{\sigma} = \frac{d_i G_{\sigma}}{\mu_{\theta}} = 3.4 * 10^3$
<i>Συντελεστής τριβής</i>	
Για $Re_K = 2.6 * 10^4$ από το Σχ.42 σελ.179 (ΑΧΠ) $f_K = 0.26$	κοινός χάλυβας } $\Rightarrow \frac{e}{d_i} = 0.003$ $\frac{e}{d_i} = 0.003$ } $\Rightarrow (Moody)f_{\sigma} = 0.044$ $Re_{\sigma} = 3.4 * 10^3$ }
<i>Πτώση πίεσης</i>	
$(\Delta P)_K = (N_x + 1)f_K \frac{D_K \rho_K}{D_e} \frac{1}{2} \left(\frac{G_K}{\rho_K}\right)^2 \left(\frac{\mu_b}{\mu_w}\right)^{0.14}$ $\Rightarrow \left(\frac{\mu_b}{\mu_w}\right)^{0.14} = 1 \Rightarrow$ $(\Delta P)_K = 217 \text{ kPa} \Rightarrow (\Delta P)_K = 2.14 \text{ atm}$	$\left(\frac{\mu_b}{\mu_w}\right)^{0.14} = 1$ $(\Delta P)_{\sigma} = N_{\delta} f_{\sigma} \frac{l_{\sigma} \rho_{\sigma}}{d_i} \frac{1}{2} \left(\frac{G_{\sigma}}{\rho_{\sigma}}\right)^2 + 2N_{\delta} \rho_{\sigma} \left(\frac{G_{\sigma}}{\rho_{\sigma}}\right)^2$ $= 1300 \text{ Pa} = 0.013 \text{ atm}$

Παρατηρώ ότι η πτώση πίεσης δεν είναι επαρκώς ισοσταθμισμένη ανάμεσα στο κέλυφος και στους σωλήνες επομένως θα εξετάσω την 2^η περίπτωση κατανομής των ρευστών στον εναλλάκτη.

II. Ρευστό κελύφους (Διάλυμα NaCl) /Ρευστό σωλήνων (Νερό)



$$T_1^K = 65.5 \text{ }^{\circ}\text{C} \quad T_2^K = 37.5 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$t_1^{\sigma} = 26.5 \text{ }^{\circ}\text{C} \quad t_2^{\sigma} = ?$$

$$R = \frac{T_1^K - T_2^K}{t_2^{\sigma} - t_1^{\sigma}}$$

$$S = \frac{t_2^{\sigma} - t_1^{\sigma}}{T_1^K - t_1^{\sigma}}$$

Θα κρατήσουμε την ίδια θερμοκρασία εξόδου του νερού με πριν άρα $t_2^{\sigma} = 35 \text{ }^{\circ}\text{C}$

Τότε έχουμε ότι:

$$\left. \begin{matrix} R = 3.3 \\ S = 0.22 \end{matrix} \right\} \Rightarrow (\text{Σχήμα για } 1 - 2 \text{ εναλλάκτη}) \Rightarrow F_T = 0.875$$

Παρατηρούμε ότι αν και οι τιμές των R και S μεταβάλλονται ανάλογα με την κατανομή των ρευστών στον εναλλάκτη, η τιμή του F_T παραμένει η ίδια για δεδομένες θερμοκρασίες εξόδου και εισόδου του ρευστού.

Οι ιδιότητες και η παροχή του ψυχρού ρεύματος παραμένουν οι ίδιες με πριν.

- **Υπολογισμός της πτώσης πίεσης**

Πλευρά Κελύφους (Διάλυμα NaCl)	Πλευρά Σωλήνων (Νερό)
<i>Μαζική Ταχύτητα</i>	
$G_K = \frac{m_K}{A_K} = \frac{m_\theta}{A_K} = 437.65 \text{ kg/sm}^2$	$G_\sigma = \frac{m_\sigma}{A_\sigma} = \frac{m_\psi}{A_\sigma} = 776.78 \text{ kg/sm}^2$
<i>Αριθμός Reynolds</i>	
$Re_K = \frac{D_e G_K}{\mu_\theta} = 6.4 * 10^3$	$Re_\sigma = \frac{d_i G_\sigma}{\mu_\psi} = 1.4 * 10^4$
<i>Συντελεστής τριβής</i>	
Για $Re_K = 6.4 * 10^3$ από το Σχ.42 σελ.179 (ΑΧΠ) $f_K = 0.34$	κοινός χάλυβας } $\Rightarrow \frac{e}{d_i} = 0.003$ $\frac{e}{d_i} = 0.003$ } $\Rightarrow (Moody)f_\sigma = 0.03$ $Re_\sigma = 1.4 * 10^4$ }
<i>Πτώση πίεσης</i>	
$(\Delta P)_K = (N_x + 1) f_K \frac{D_K \rho_K}{D_e} \frac{1}{2} \left(\frac{G_K}{\rho_K} \right)^2 \left(\frac{\mu_b}{\mu_w} \right)^{0.14}$ $\Rightarrow \left(\frac{\mu_b}{\mu_w} \right)^{0.14} = 1 \Rightarrow$ $(\Delta P)_K = 31454 \text{ Pa} = 0.31 \text{ atm}$	$\left(\frac{\mu_b}{\mu_w} \right)^{0.14} = 1$ $(\Delta P)_{\sigma, \psi} = N_\delta f_\sigma \frac{l_\sigma \rho_\sigma}{d_i} \frac{1}{2} \left(\frac{G_\sigma}{\rho_\sigma} \right)^2 + 2N_\delta \rho_\sigma \left(\frac{G_\sigma}{\rho_\sigma} \right)^2$ $= 8365 \text{ Pa} = 0.083 \text{ atm}$

Παρατηρώ ότι με αυτήν την κατανομή των ρευστών η πτώση πίεσης είναι πιο ισοσταθμισμένη μέσα στον εναλλάκτη.

- **Υπολογισμός της φαινόμενης διαφοράς θερμοκρασίας**

$$(\Delta T)_{lm} = \frac{(T_{\theta, in} - T_{\psi, out}) - (T_{\theta, out} - T_{\psi, in})}{\ln \left(\frac{T_{\theta, in} - T_{\psi, out}}{T_{\theta, out} - T_{\psi, in}} \right)} \Rightarrow (\Delta T)_{lm} = 19.12 \text{ K}$$

$$(\Delta T)_\varphi = (\Delta T)_{lm} F_T \Rightarrow (\Delta T)_\varphi = 16.73 \text{ K}$$

- **Υπολογισμός του συντελεστή μεταφοράς θερμότητας**

Πλευρά Κελύφους (Καύσιμο πετρέλαιο)	Πλευρά Σωλήνων (Ακάθαρτο πετρέλαιο)
$A_K = 0.0171371 \text{ m}^2$	$A_\sigma = 0.0260819 \text{ m}^2$
$G_K = 437.65 \text{ kg/m}^2\text{s}$	$G_\sigma = 776.78 \text{ kg/m}^2\text{s}$

$Re_K = 6.4 * 10^3$	$Re_\sigma = 1.4 * 10^4$
$j_{H,K} = 0.36Re_K^{0.55} = 43$	$j_{H,\sigma} = 50$
$Pr_K = \frac{Cp_\theta\mu_\theta}{k_\theta} = 6.633$	$Pr_\sigma = \frac{Cp_\psi\mu_\psi}{k_\psi} = 6.648$
$h_o = j_{H,K} \frac{k_\theta}{D_e} (Pr)^{\frac{1}{3}} \left(\frac{\mu_b}{\mu_w}\right)^{0.14} \Rightarrow$ $h_o = 2854.5 \text{ W/m}^2\text{K}$	$h_i = j_{H,\sigma} \frac{k_\psi}{d_i} (Pr)^{\frac{1}{3}} \left(\frac{\mu_b}{\mu_w}\right)^{0.14} \Rightarrow$ $h_i = 3782 \text{ W/m}^2\text{K}$

- **Ολικός συντελεστής μεταφοράς Θερμότητας**

κοινός χάλυβας $\Rightarrow k_T = 50 \text{ W/m}^2\text{K}$

$$U_o = \frac{2}{d_o} \left\{ \frac{2}{d_i h_i} + \frac{1}{k_T} \ln\left(\frac{d_o}{d_i}\right) + \frac{2}{d_o h_o} \right\}^{-1} \Rightarrow U_o = 1377.12 \text{ W/m}^2\text{K}$$

- **Ολικός συντελεστής μεταφοράς θερμότητας για σχεδιασμό**

$$Q = A_o U_{\sigma\chi} (\Delta T)_\varphi \Rightarrow U_{\sigma\chi} = \frac{Q}{A_o (\Delta T)_\varphi} \Rightarrow U_{\sigma\chi} = 489.162 \text{ W/m}^2\text{K}$$

- **Υπολογισμός του διαθέσιμου συντελεστή ρύπανσης**

$$R_\rho = \frac{1}{U_{\sigma\chi}} - \frac{1}{U_o} \Rightarrow R_\rho = 0.00132 \text{ m}^2\text{K/W}$$

Ο συντελεστής ρύπανσης είναι αρκετά μεγάλος ώστε ο εναλλάκτης να χρησιμοποιηθεί με ασφάλεια.

Από τα αποτελέσματα γίνεται προφανές ότι θα πρέπει να εφαρμόσουμε την 2^η περίπτωση όσον αφορά την πτώση πίεσης και τον συντελεστή μεταφοράς ρύπανσης.