

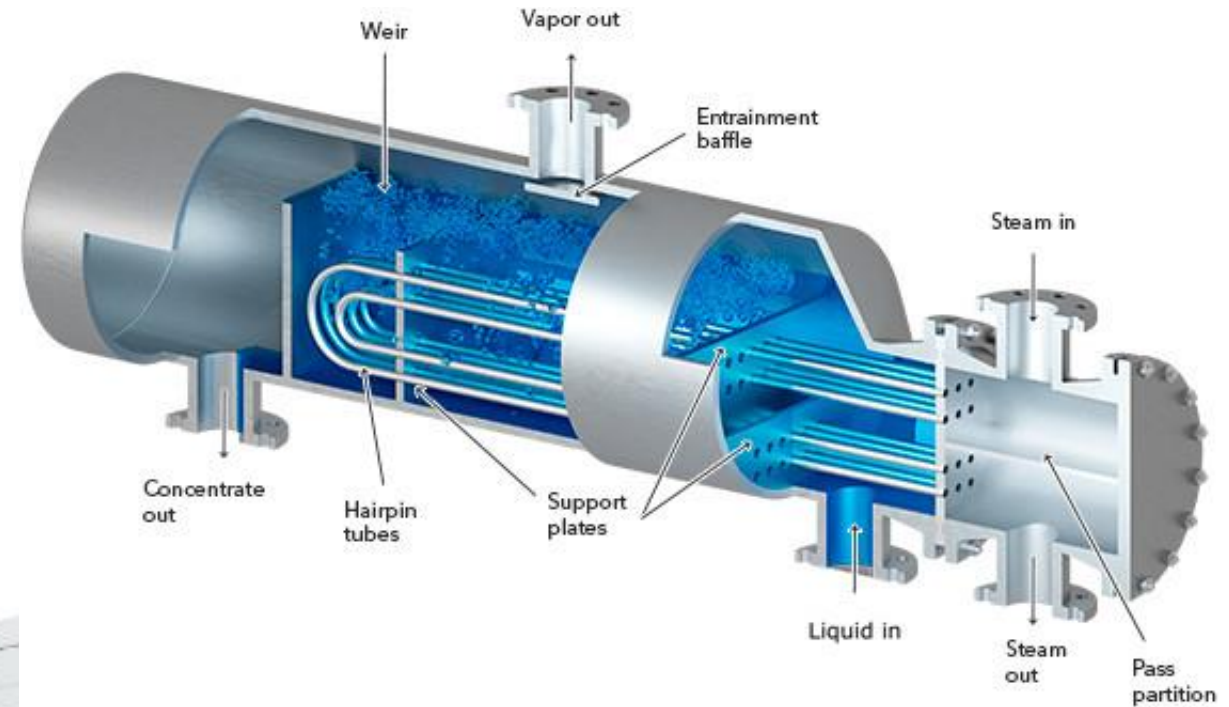
Συσκευές θερμικών διεργασιών

Συσκευές που χρησιμοποιούνται για την αποτελεσματική μεταφορά θερμότητας μεταξύ δύο ρευστών.



Παραδείγματα:

- Συμπυκνωτές
- Εξατμιστήρες
- Αναβραστήρες
- Ατμοπαραγωγοί

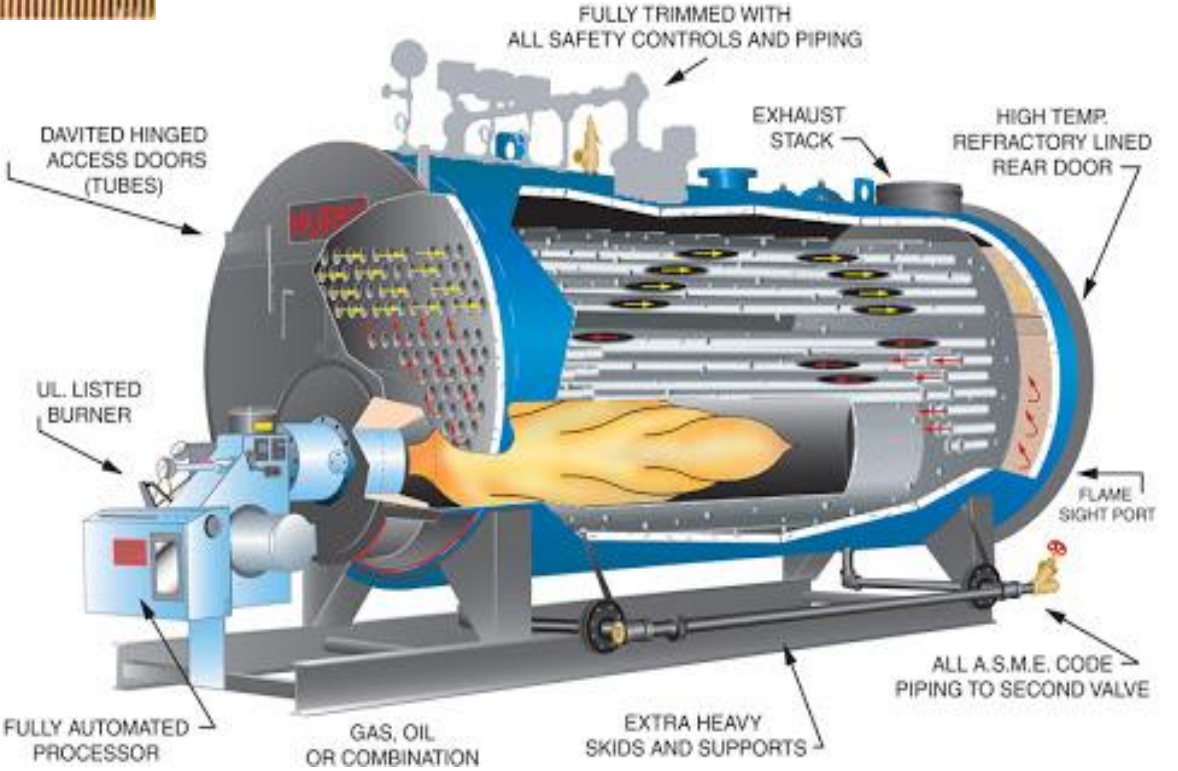
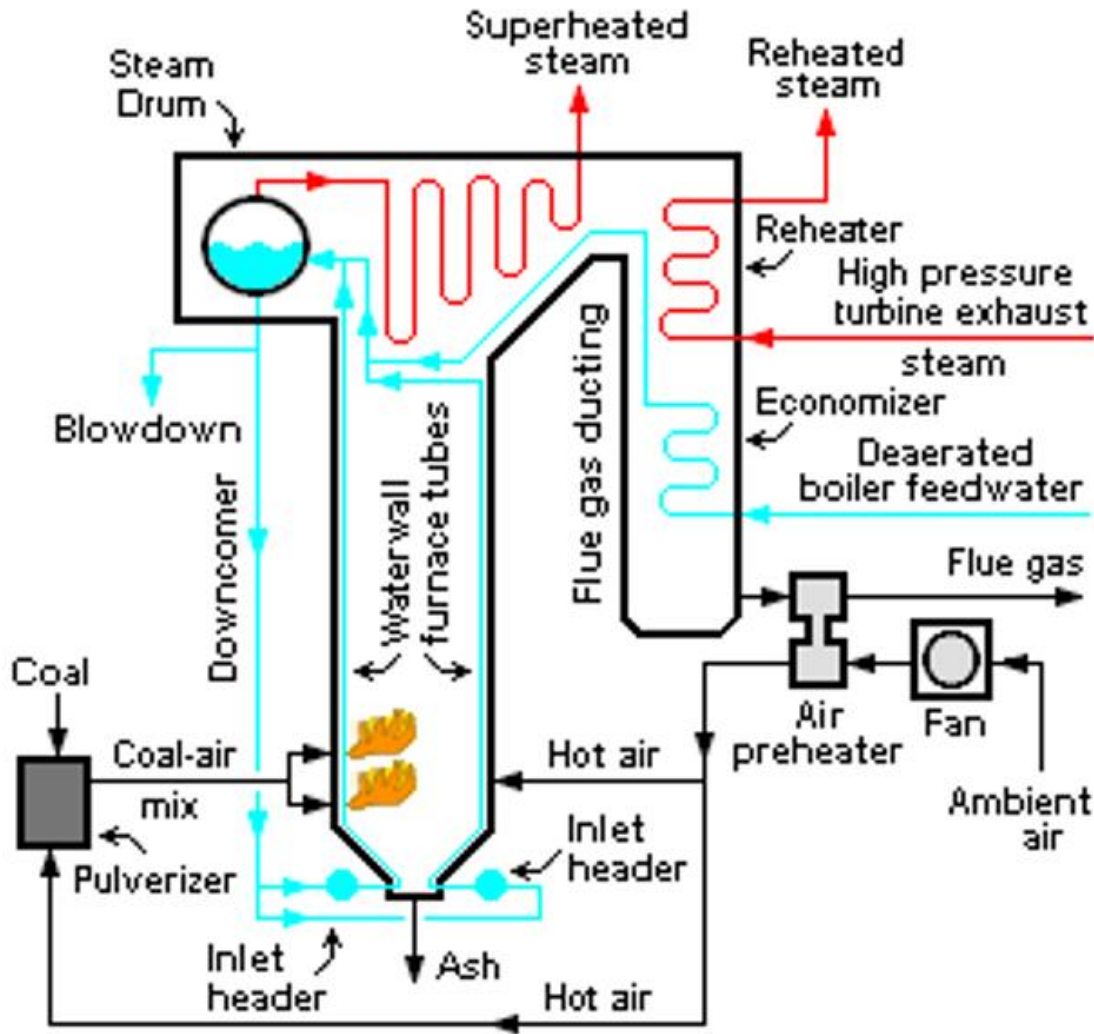


Ενότητες του μαθήματος

- *Εναλλάκτες θερμότητας (μονοφασικοί)*
- *Διφασική ροή ατμού/υγρού (και συμπιεστότητα)*
- *Συμπύκνωση (και δίκτυα ατμού)*
- *Βρασμός (και τριχοειδή φαινόμενα)*
- *Ατμοπαραγωγοί (ακτινοβολία, φλόγα)*

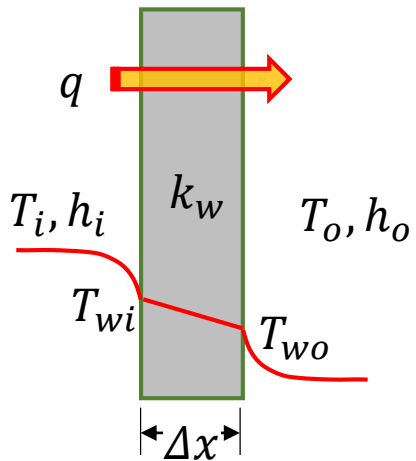


Ατμοπαραγωγοί (εσωτερικό)



Εναλλάκτες θερμότητας

Θερμικές αντιστάσεις σε σειρά - Ολικός συντελεστής μεταφοράς θερμότητας



Καρτεσιανή γεωμετρία

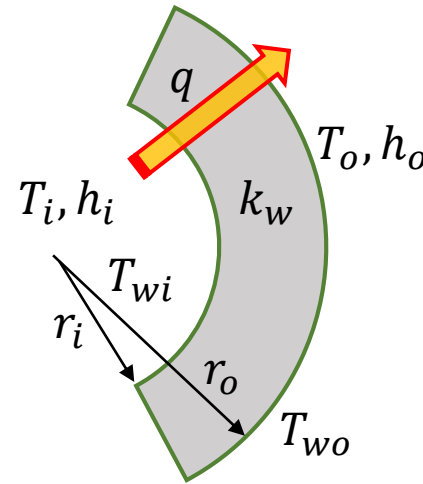
$$Q = Ak_w \frac{(T_{wi} - T_{wo})}{\Delta x}$$

$$Q = Ah_i(T_i - T_{wi})$$

$$Q = Ah_o(T_{wo} - T_o)$$

$$Q = AU(T_i - T_o)$$

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{h_i} + \frac{\Delta x}{k_w} + \frac{1}{h_o}$$



Κυλινδρική γεωμετρία

$$Q = 2\pi Lk_w \frac{(T_{wi} - T_{wo})}{\ln(r_o/r_i)}$$

$$= (2\pi r_o L)k_w \frac{(T_{wi} - T_{wo})}{r_o \ln(r_o/r_i)}$$

$$Q = A_o U (T_i - T_o)$$

$$\frac{1}{U} = \frac{A_o}{A_i h_i} + \frac{r_o \ln(r_o/r_i)}{k_w} + \frac{1}{h_o}$$

Έλεγχος αντίστασης

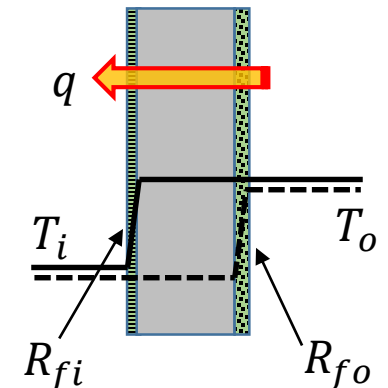
$$\frac{k_w}{\Delta x} \ll h_i, h_o \Rightarrow T_{wi} \approx T_i, T_{wo} \approx T_o \text{ (μόνωση)}$$

$$\frac{k_w}{\Delta x} \gg h_i, h_o \Rightarrow T_{wi} \approx T_{wo} = T_i + (T_o - T_i) \frac{h_o}{h_o + h_i}$$

$$h_i \gg h_o \Rightarrow T_w \approx T_i$$

Παράδειγμα αυλών ατμοπαραγωγού

- Ποια η θερμοκρασία του τοιχώματος;
- Τί επίπτωση έχει ο σχηματισμός επικαθήσεων;



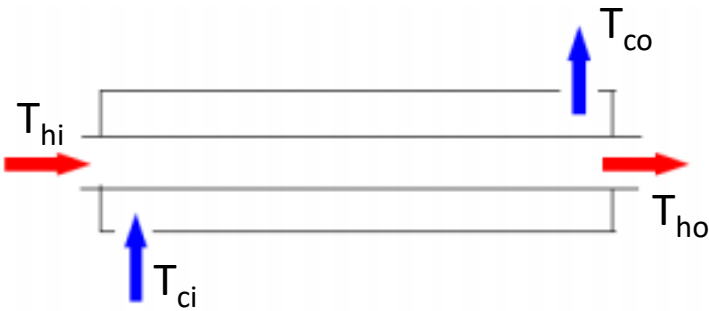
Ενδεικτικές τιμές συντελεστών

Συντελεστές συναγωγής	h (W/m ² K)
Φυσική συναγωγή	
Αέρια	2-25 (10)
Υγρά	50-1000 (100)
Εξαναγκασμένη συναγωγή	
Αέρια	25-250 (100)
Υγρά	100-10000 (1000)
Βρασμός – συμπύκνωση	500 – 50000

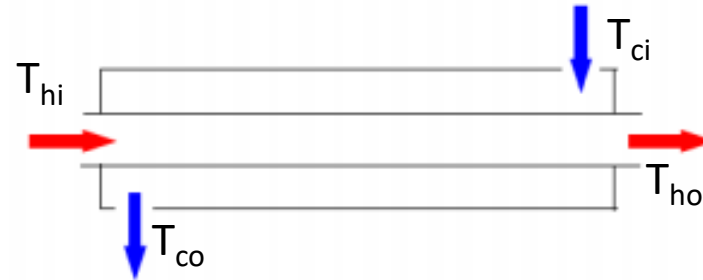
Συντελεστές θερμικής αγωγιμότητας	k (W/mK)
νερό	0,6
οκτάνιο	0,14
ακετόνη	0,16
ατμός	0,03
αέρας	0,03
αλουμίνιο	205
χαλκός	385
χάλυβας	30-50
πολυαιθυλένιο	0,5
γυαλί	0,8
ξύλο	0,04-0,12

Διατάξεις ροής και οριακές θερμοκρασίες

ΟΜΟΡΡΟΗ



ΑΝΤΙΡΡΟΗ



ΕΝΑΛΛΑΚΤΗΣ ΑΠΕΙΡΟΥ ΜΗΚΟΥΣ

Ομορροή

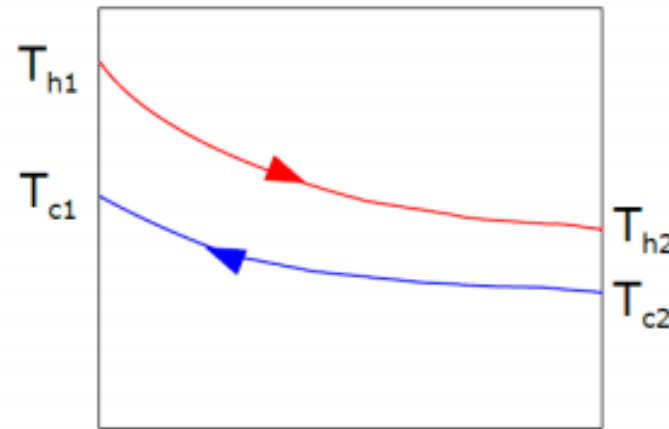
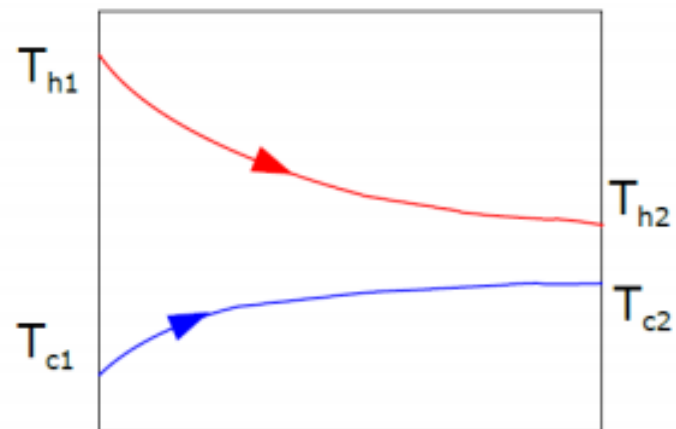
$$T_{ho}^{\infty} = T_{co}^{\infty}$$

Αντιρροή

$$T_{ho}^{\infty} = T_{co}^{\infty} ?$$

$$T_{ho}^{\infty} = T_{ci} ?$$

$$T_{co}^{\infty} = T_{hi} ?$$



Οριακές θερμοκρασίες αντιρροής

$$m_h c_{ph} > m_c c_{pc} \Rightarrow T_{co}^{\infty} = T_{hi}$$

$$m_h c_{ph} < m_c c_{pc} \Rightarrow T_{ho}^{\infty} = T_{ci}$$

Εναλλαγή θερμότητας (Θερμοδυναμική)

$$Q = m_h c_{ph} (T_{hi} - T_{ho}) = m_c c_{pc} (T_{co} - T_{ci})$$

ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΟΣ ΕΝΑΛΛΑΚΤΗΣ

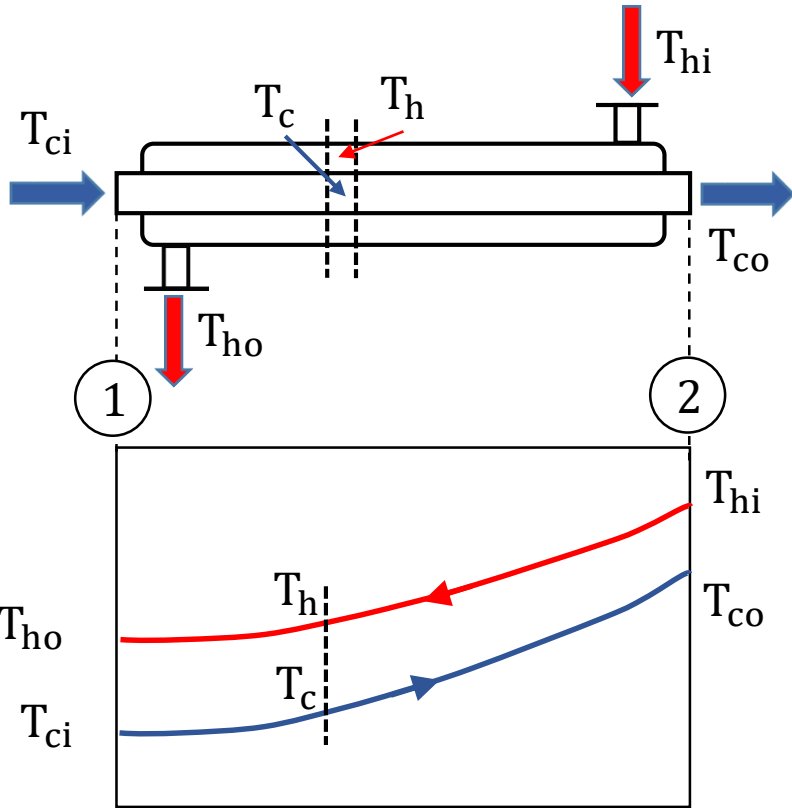
(θερμοκρασιακή προσέγγιση, ΔT)

Ομορροή: $T_{ho} = T_{co} + \Delta T$

Αντιρροή: $T_{co} = T_{hi} - \Delta T$ ($m_h c_{ph} > m_c c_{pc}$)

$T_{ho} = T_{ci} + \Delta T$ ($m_h c_{ph} < m_c c_{pc}$)

Σχεδιασμός (διαστασιολόγηση) εναλλάκτη θερμότητας



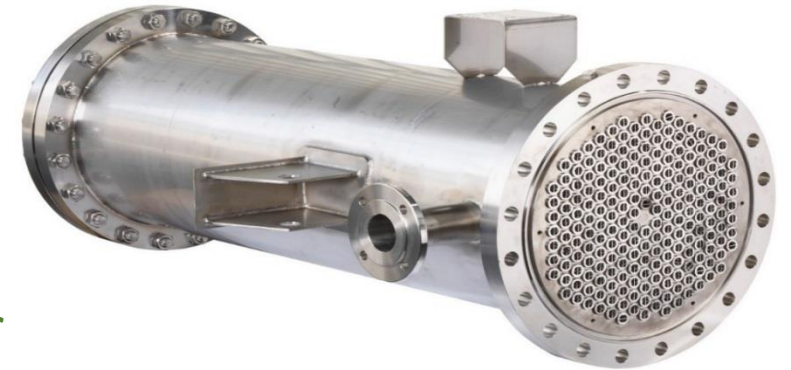
Διαφορικό θερμικό ισοζύγιο

$$dQ = \underbrace{U dA (T_h - T_c)}_{\text{Μεταφορά Θερμότητας}} = \underbrace{m_h C_{ph} (\pm dT_h)}_{\text{Θερμοδυναμική}} = m_c C_{pc} (dT_c) \Rightarrow$$

Ολικό θερμικό ισοζύγιο

$$Q = m_h C_{ph} (T_{hi} - T_{ho}) = m_c C_{pc} (T_{co} - T_{ci})$$

$$Q = UA(\Delta T)_{LM}$$



Μέση λογαριθμική διαφορά θερμοκρασίας
(ο ίδιος τύπος και για ομορροή)

$$(\Delta T)_{LM} = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln(\Delta T_1 / \Delta T_2)}$$

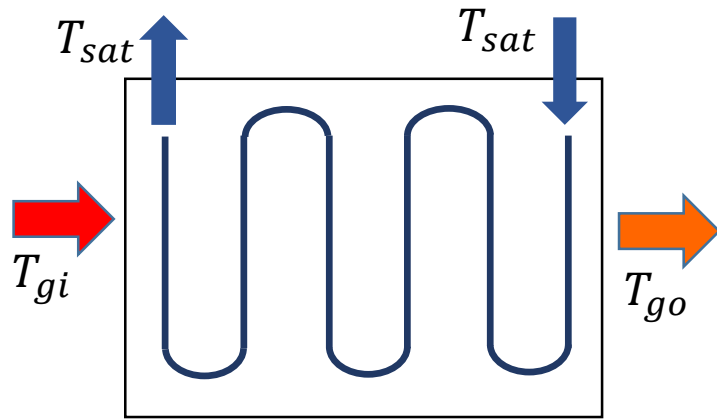
Πόσα ΔT ;?!

Ολικός συντελεστής μεταφοράς
(σταθερός)

$$\frac{1}{U} = \frac{A_o}{A_i h_i} + \frac{r_o \ln(r_o / r_i)}{k_w} + \frac{1}{h_o}$$



Λέβητας ανάκτησης θερμότητας καυσαερίων (HRSB)



$$Q = \dot{m}_g C_{p,g} (T_{gi} - T_{go}) = UA(\Delta T)_{LM}$$

$$(\Delta T)_{LM} = \left[\frac{(T_{gi} - T_{sat}) - (T_{go} - T_{sat})}{\ln \left[\frac{(T_{gi} - T_{sat})}{(T_{go} - T_{sat})} \right]} \right]$$

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{h_{sat}} + \frac{\Delta x}{k_w} + \frac{1}{h_g} \approx \frac{1}{h_g}$$

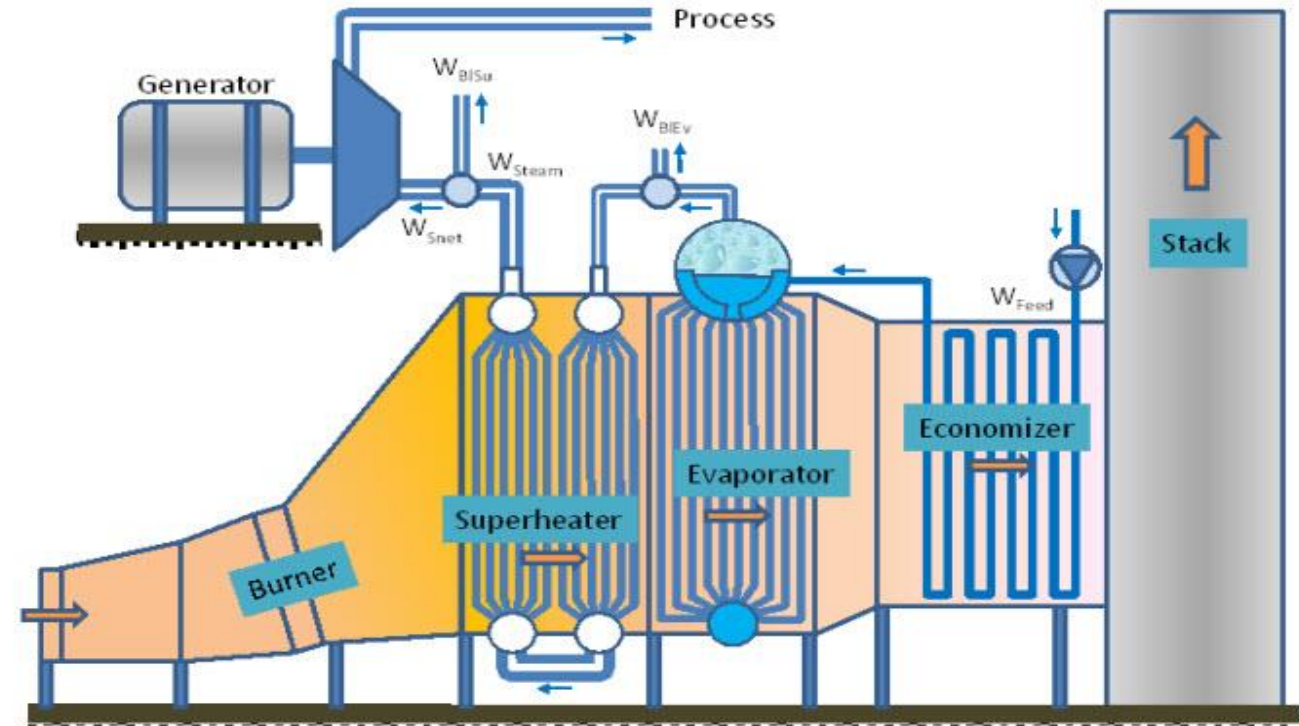
$$\Rightarrow \ln \left[\frac{(T_{gi} - T_{sat})}{(T_{go} - T_{sat})} \right] = \frac{UA}{\dot{m}_g C_{p,g}}$$

ΥΔΡΑΥΛΩΤΟΣ ΛΕΒΗΤΑΣ

$$Nu \sim Re^{0,6} \Rightarrow U \sim \dot{m}_g^{0,6} \Rightarrow \ln \left[\frac{(T_{gi} - T_{sat})}{(T_{go} - T_{sat})} \right] = \frac{K_Y}{\dot{m}_g^{0,4}}$$

ΦΛΟΓΑΥΛΩΤΟΣ ΛΕΒΗΤΑΣ

$$Nu \sim Re^{0,8} \Rightarrow U \sim \dot{m}_g^{0,8} \Rightarrow \ln \left[\frac{(T_{gi} - T_{sat})}{(T_{go} - T_{sat})} \right] = \frac{K_\Phi}{\dot{m}_g^{0,2}}$$



Αξιολόγηση εναλλάκτη (μέθοδος ε-NTU)

Σε τί διαφέρει ο σχεδιασμός (διαστασιολόγηση) από την αξιολόγηση εναλλάκτη;

$$C_h = m_h c_{ph}, C_c = m_c c_{pc}, C_{min} = \min(C_h, C_c), C_{max} = \max(C_h, C_c), C_R = C_{min}/C_{max}$$

Εναλλάκτης άπειρου μήκους σε αντιρροή: $Q_{A,max} = C_{min}(T_{hi} - T_{ci})$

Αποτελεσματικότητα εναλλάκτη

$$\varepsilon = \frac{Q}{Q_{A,max}} = \frac{C_h(T_{hi} - T_{ho})}{C_{min}(T_{hi} - T_{ci})} = \frac{C_c(T_{co} - T_{ci})}{C_{min}(T_{hi} - T_{ci})}$$

Αριθμός μονάδων μεταφοράς

$$NTU = \frac{UA}{C_{min}}$$



Ομορροή

$$\varepsilon = \frac{1 - \exp[-(1 + C_R)NTU]}{1 + C_R}$$

Αντιρροή

$$\varepsilon = \frac{1 - \exp[-(1 - C_R)NTU]}{1 - C_R \exp[-(1 - C_R)NTU]}$$

Όταν σε μία πλευρά έχουμε αλλαγή φάσης τότε $C_R = 0$

	$NTU \rightarrow \infty$	$C_R = 0$	$C_R = 1$
Ομορροή	$\varepsilon = \frac{1}{1 + C_R}$	$\varepsilon = 1 - e^{-NTU}$	$\varepsilon = \frac{1 - e^{-2NTU}}{2}$
Αντιρροή	$\varepsilon = 1$	$\varepsilon = 1 - e^{-NTU}$	$\varepsilon = \frac{NTU}{1 + NTU}$

Εκτίμηση ολικού συντελεστή μεταφοράς θερμότητας

Representative values of the overall heat transfer coefficients in heat exchangers

Type of heat exchanger	U , $W/m^2 \cdot K^*$
Water-to-water	850–1700
Water-to-oil	100–350
Water-to-gasoline or kerosene	300–1000
Water-to-brine	600–1200
Feedwater heaters	1000–8500
Steam-to-light fuel oil	200–400
Steam-to-heavy fuel oil	50–200
Steam condenser	1000–6000
Freon condenser (water cooled)	300–1000
Ammonia condenser (water cooled)	800–1400
Alcohol condensers (water cooled)	250–700
Gas-to-gas	10–40
Gas-to-brine	10–250
Oil-to-oil	50–400
Organic vapors-to-water	700–1000
Organic solvents-to-organic solvents	100–300
Water-to-air in finned tubes (water in tubes)	30–60 [†]
	400–850 [†]
Steam-to-air in finned tubes (steam in tubes)	30–300 [†]
	400–4000 [‡]

Σχηματισμός και αντιμετώπιση αποθέσεων

Κατά τη λειτουργία του εναλλάκτη σχηματίζονται αποθέσεις στις επιφάνειες που δημιουργούν επιπλέον θερμική αντίσταση μειώνουν την διατομή της ροής

Διαφόρων ειδών αποθέσεις

Σωματιδιακές: Τέφρα, σκόνη

Κρυσταλλικές: Άλατα

Προϊόντα διάβρωσης

Βιολογικές αποθέσεις: μικροοργανισμοί

Προϊόντα χημικής αντίδρασης

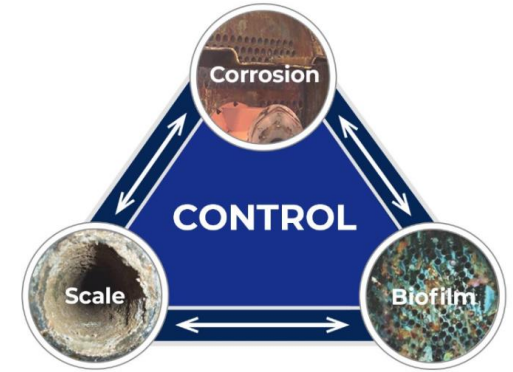
Αντιμετώπιση

υπερδιαστασιολόγηση του εναλλάκτη

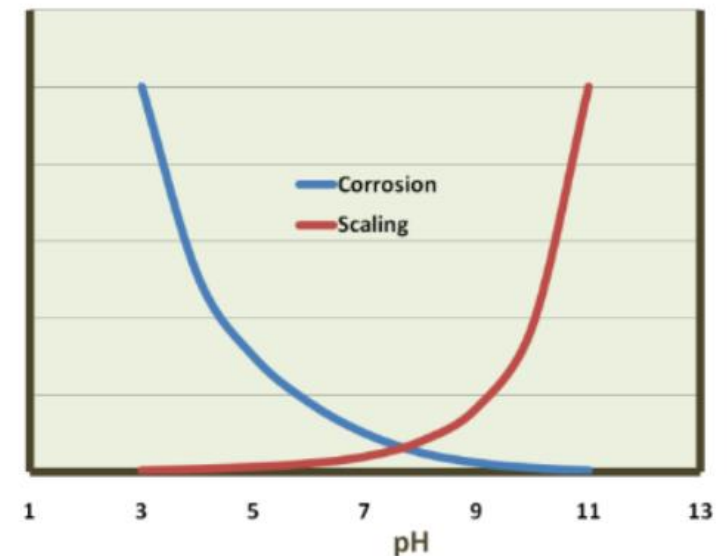
μεγάλες ταχύτητες ροής

αποφυγή υψηλών θερμοκρασιών

καθαρισμός



- Disodium chromate $\text{Na}_2\text{Cr}_2\text{O}_7 \rightarrow \text{CrO}_4^{2-}$ (Erin Brockovich)
- TSP : $\text{Na}_3\text{PO}_4 + \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{NaH}_2\text{PO}_4 + \text{NaOH}$
 $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ formation



Ολικός συντελεστής μεταφοράς χωρίς τις αποθέσεις

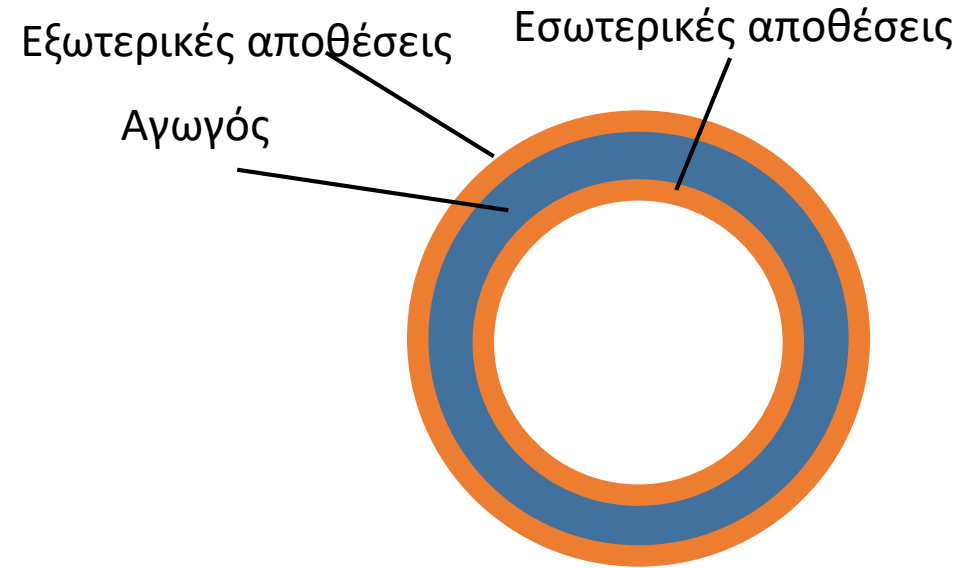
$$\frac{1}{U_c} = \frac{A_o}{A_i h_i} + \frac{r_o \ln(r_o/r_i)}{k} + \frac{1}{h_o}$$

Οι αποθέσεις προσθέτουν θερμικές αντιστάσεις σε σειρά

$$\frac{1}{U_f} = \frac{A_o}{A_i} \left(\frac{1}{h_i} + R_{fi} \right) + \frac{r_o \ln(r_o/r_i)}{k} + \left(\frac{1}{h_o} + R_{fo} \right) = \frac{1}{U_c} + R_{ft}$$
$$R_{ft} = \frac{A_o}{A_i} R_{fi} + R_{fo}$$

Για να έχουμε την ίδια θερμορροή:

$$\frac{A_f}{A_c} = 1 + U_c R_{ft}$$



Θερμική αντίσταση αποθέσεων

$$R_f = \frac{\Delta x_f}{k_f}$$

Θερμική αντίσταση αποθέσεων

Τυπικές τιμές της αντίστασης αποθέσεων από πίνακες ανάλογα με το ρευστό

$$(m^2 K) / kW$$

TEMA Design Fouling Resistances for Water

Temperature of Heating Medium	Up to 115°C		115 to 205°C	
	50°C		Over 50°C	
Temperature of Water	Water Velocity, m/s		Water Velocity, m/s	
	< 0.9	> 0.9	< 0.9	> 0.9
Sea water	0.088	0.088	0.176	0.176
Brackish water	0.352	0.176	0.528	0.352
Cooling tower and artificial spray pond				
Treated makeup	0.176	0.176	0.352	0.352
Untreated	0.528	0.528	0.881	0.705
City or well water	0.176	0.176	0.352	0.352
River water				
Minimum	0.352	0.176	0.528	0.352
Average	0.528	0.352	0.705	0.528
Muddy or silty	0.528	0.352	0.705	0.528
Hard (over 15 grains/gallon)	0.528	0.528	0.881	0.881
Engine jacket	0.176	0.176	0.176	0.176
Distilled or closed cycle				
Condensate	0.088	0.088	0.088	0.088
Treated boiler feed water	0.176	0.088	0.176	0.176
Boiler blowdown	0.352	0.352	0.352	0.352

TEMA Design Fouling Resistances for Industrial Fluids, $(m^2 \cdot K) / kW$ [19]

Oils	
Fuel oil #2	0.352
Fuel oil #6	0.881
Transformer oil	0.176
Engine lube oil	0.176
Quench oil	0.705
Gases and vapors	
Manufactured gas	1.761
Engine exhaust gas	1.761
Steam (nonoil bearing)	0.088
Exhaust stream (oil bearing)	0.264–0.352
Refrigerant vapors (oil bearing)	0.352
Compressed air	0.176
Ammonia vapor	0.176
CO ₂ vapor	0.176
Chlorine vapor	0.352
Coal flue gas	1.761
Natural gas flue gas	0.881
Liquids	
Molten heat transfer salts	0.088
Refrigerant liquids	0.176
Hydraulic fluid	0.176
Industrial organic heat transfer media	0.352
Ammonia liquid	0.176
Ammonia liquid (oil bearing)	0.528
Calcium chloride solutions	0.528
Sodium chloride solutions	0.528
CO ₂ liquid	0.176
Chlorine liquid	0.352
Methanol solutions	0.352
Ethanol solutions	0.352
Ethylene glycol solutions	0.352

Heat transfer coefficient (W/m²K) Fouling resistance (m²K/kW)

Sensible heat transfer

Water	Liquid	5,000–7,500	0.1–0.25
Ammonia	Liquid	6,000–8,000	0–0.1
Light organics	Liquid	1,500–2,000	0.1–0.2
Medium organics	Liquid	750–1,500	0.15–0.4
Heavy organics	Liquid		
	Heating	250–750	0.2–1.0
	Cooling	150–400	0.2–1.0
Very heavy organics	Liquid		
	Heating	100–300	0.4–3.0
	Cooling	60–150	0.4–3.0
Gas	1–2 bar abs	80–125	0–0.1
Gas	10 bar abs	250–400	0–0.1
Gas	100 bar abs	500–800	0–0.1

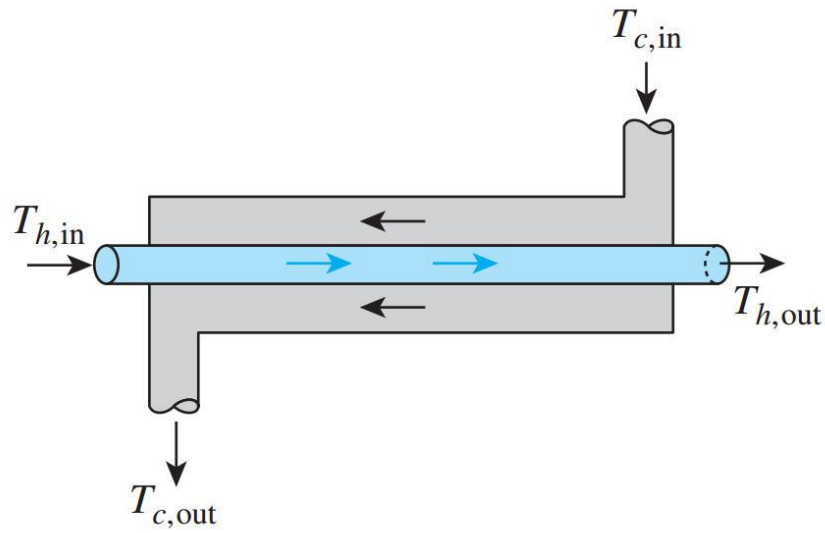
Condensing heat transfer

Steam, ammonia	No noncondensable	8,000–12,000	0–0.1
Light organics	Pure component, 0.1 bar abs, no noncondensable	2,000–5,000	0–0.1
Light organics	0.1 bar, 4% noncondensable	750–1,000	0–0.1
Medium organics	Pure or narrow condensing range, 1 bar abs	1,500–4,000	0.1–0.3
Heavy organics	Narrow condensing range, 1 bar abs	600–2,000	0.2–0.5

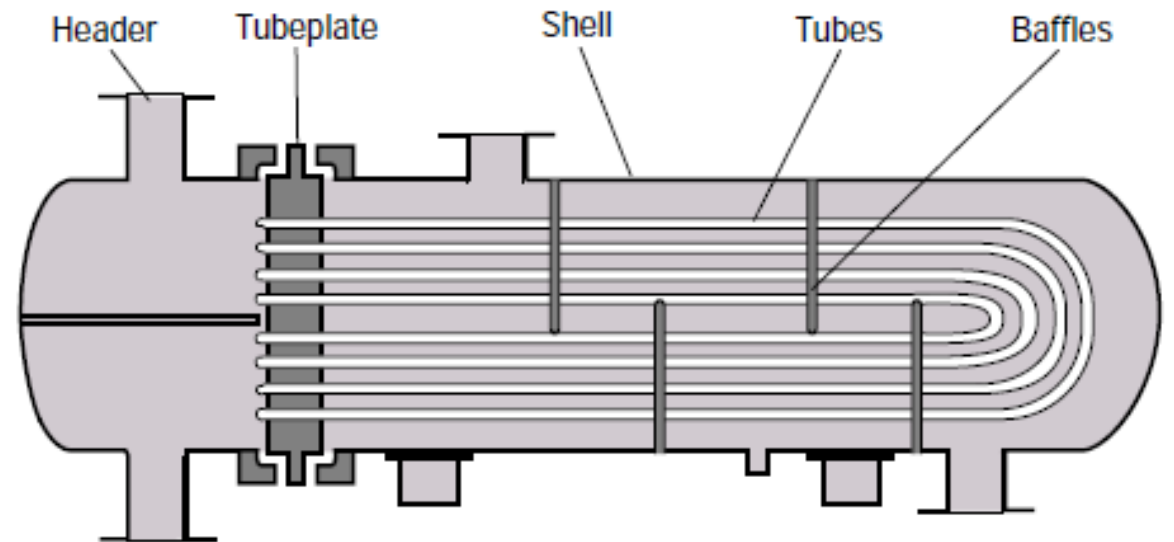
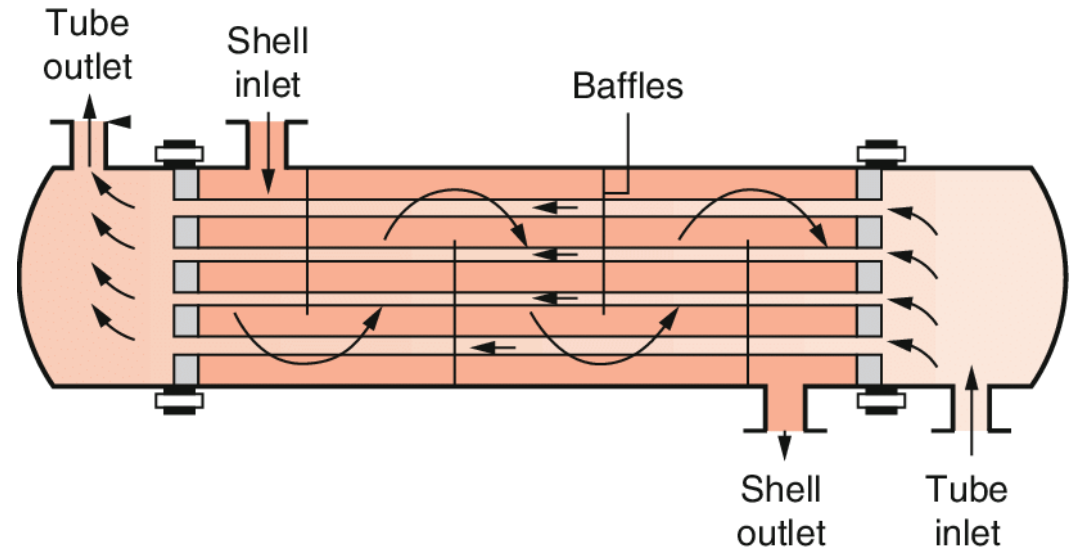
		W/m ² K	m ² K/kW
Light multicomponent mixture, all condensible	Medium condensing range, 1 bar abs	1,000–2,500	0–0.2
Medium multicomponent mixture, all condensible	Medium condensing range, 1 bar abs	600–1,500	0.1–0.4
Heavy multicomponent mixture, all condensible	Medium condensing range, 1 bar abs	300–600	0.2–0.8
Vaporizing heat transfer			
Water	Pressure < 5 bar abs, $\Delta T = 25$ K	5,000–10,000	0.1–0.2
Water	Pressure 5–100 bar abs, $\Delta T = 20$ K	4,000–15,000	0.1–0.2
Ammonia	Pressure < 30 bar abs, $\Delta T = 20$ K	3,000–5,000	0.1–0.2
Light organics	Pure component, pressure < 30 bar abs, $\Delta T = 20$ K	2,000–4,000	0.1–0.2
Light organics	Narrow boiling range, pressure 20–150 bar abs, $\Delta T = 15$ –20 K	750–3,000	0.1–0.3
Medium organics	Narrow boiling range, pressure < 20 bar abs, $\Delta T_{max} = 15$ K	600–2,500	0.1–0.3
Heavy organics	Narrow boiling range, pressure < 20 bar abs, $\Delta T_{max} = 15$ K	400–1,500	0.2–0.8

Τύποι εναλλακτών θερμότητας

Διπλού σωλήνα

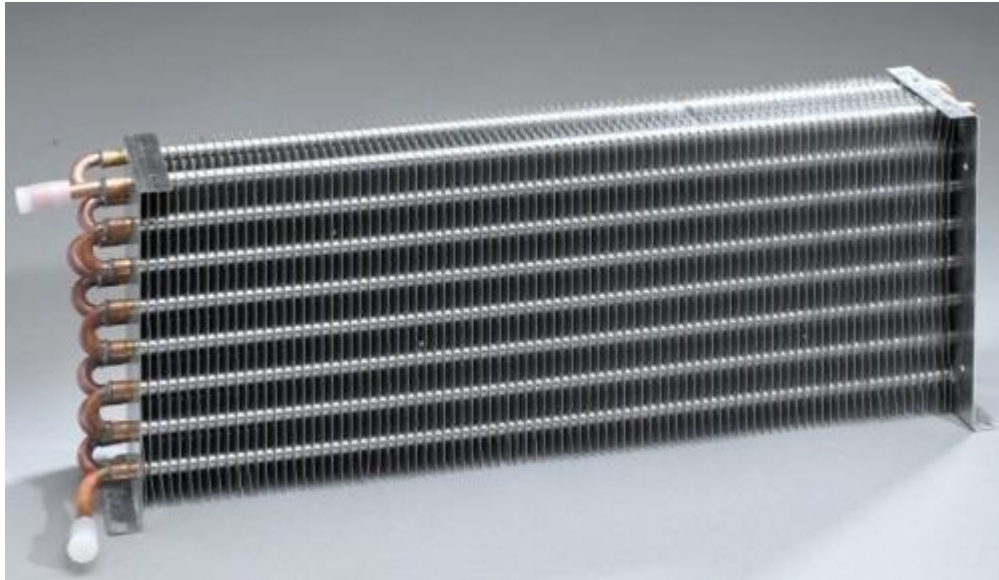


Αυλών κελύφους

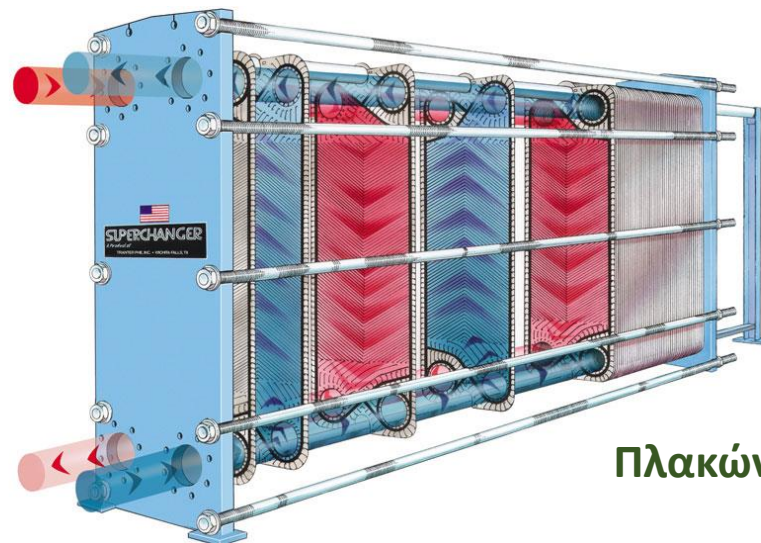
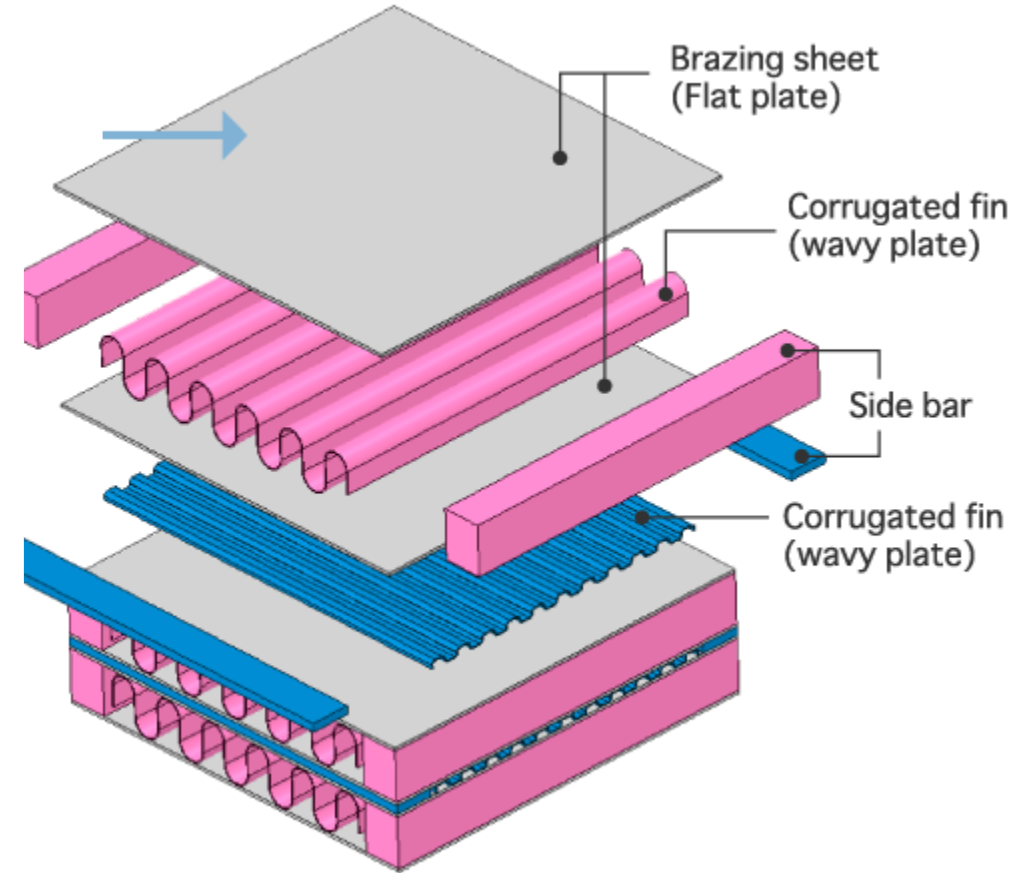


Τύποι εναλλακτών θερμότητας

Αυλών πτερυγίων



Πλακών πτερυγίων

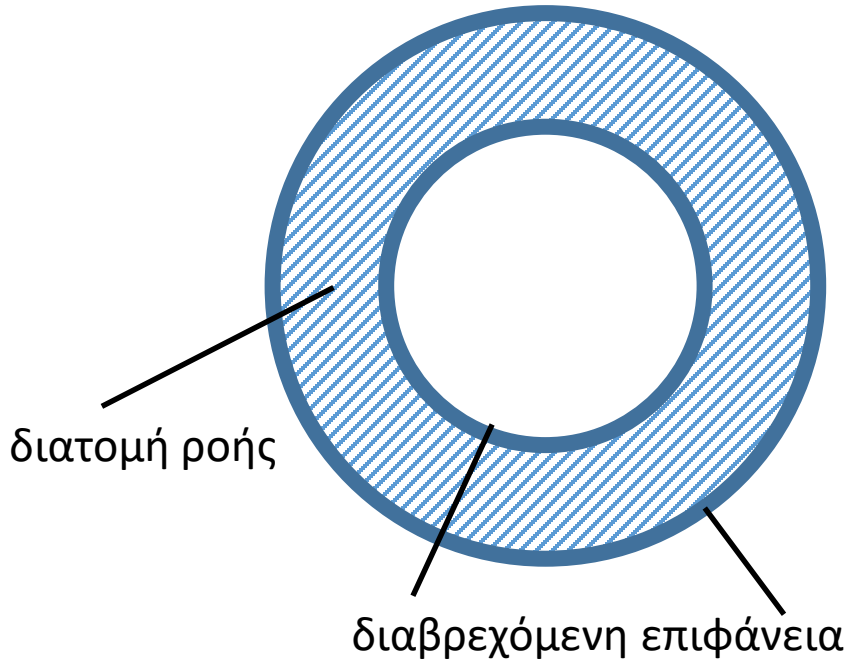
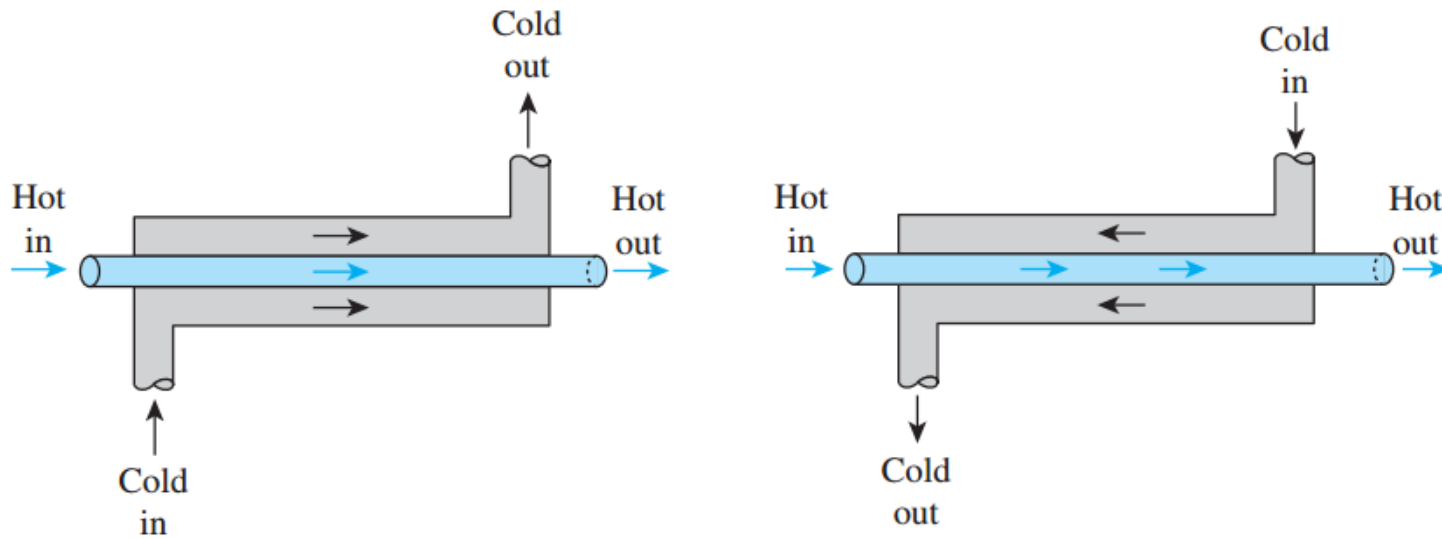


Πλακών-πλαisiού

- Καθορισμός προδιαγραφών ($Q, T_{in}, T_{out}, m_h, m_c$)
- Προκαταρκτική διαστασιολόγηση ($U, \Delta T_{\pi\rho} \rightarrow A_o$)
- Επιλογή τύπου και διαστάσεων εναλλάκτη
- Λεπτομερής θερμοϋδραυλικός σχεδιασμός ($h_h, h_c, A_{new}, \Delta P$)
- Διόρθωση σχεδιασμού ($\Delta P_{max}, A_{min}$)
- Επιλογή υλικών και μηχανολογικός σχεδιασμός (ASME Boiler and pressure vessel code)
- Αρχιτεκτονικός σχεδιασμός
- Σχεδιασμός συστημάτων ελέγχου και συντήρησης

Εναλλάκτες διπλού σωλήνα

Εναλλάκτες διπλού σωλήνα - Πτώση πίεσης



Πτώση πίεσης στον αυλό

$$\Delta P = 4f \frac{L \rho u^2}{d}$$

$$f = \frac{16}{Re}, \quad Re = \frac{\rho u d}{\mu} < 2300$$

$$(4f)^{-1/2} = -1.8 \log_{10} \left[\left(\frac{\varepsilon}{3.7d} \right)^{1.11} + \frac{6.9}{Re} \right]$$

$$f = 0.0035 + 0.264 Re^{-0.42}$$

(2300 < Re < 10⁵ τραχείς, χαλύβδινοι σωλήνες)

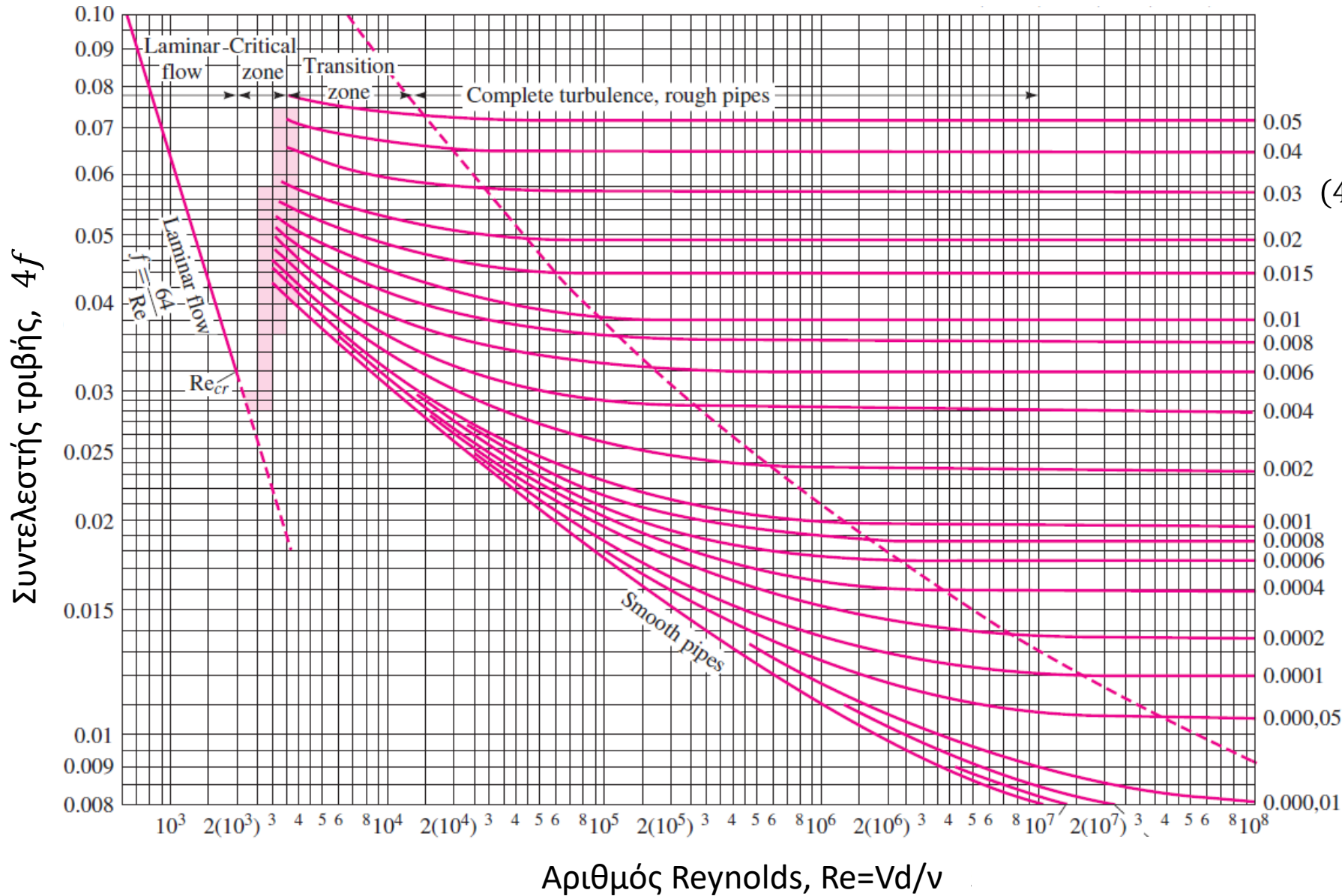
Υδραυλική διάμετρος και πτώση πίεσης στον δακτύλιο

$$d_h = \frac{4(\text{εμβαδόν ροής})}{(\text{διαβρεχόμενη περιμετρος})} = d_2 - d_1$$

Πτώση πίεσης σε στροφές 180°

$$\Delta P_r = 1.1 \frac{\rho u^2}{2}$$

Διάγραμμα Moody



$$\frac{1}{\sqrt{4f}} = -2,0 \log \left(\frac{2,51}{Re\sqrt{4f}} + \frac{\epsilon/d}{3,7} \right)$$

$$(4f)^{-1/2} = -1,8 \log_{10} \left[\left(\frac{\epsilon}{3,7d} \right)^{1,11} + \frac{6,9}{Re} \right]$$

Σχετική τραχύτητα, ϵ/d

Εναλλάκτες διπλού σωλήνα - Συντελεστής συναγωγής

Συντελεστής συναγωγής

$$Nu_T = \left[3.66^3 + 1.61^3 \left(Re Pr \frac{d}{L} \right) \right]^{1/3}$$

$$Nu_Q = \left[4.36^3 + 1.95^3 \left(Re Pr \frac{d}{L} \right) \right]^{1/3}$$

$$Nu_T = 3.66$$

$$Nu_Q = 4.36$$

$$Nu_{smooth} = \frac{(f/2)(Re - 1000)Pr}{1 + 12.7\sqrt{f/2}(Pr^{2/3} - 1)}$$

$$Nu_{rough} = Nu_{smooth} \left(\frac{f_{rough}}{f_{smooth}} \right)^n, n = 0,68 Pr^{0,215}$$

$$Nu = 0.023 Re^{0.8} Pr^{0.33} \left(\frac{\mu}{\mu_w} \right)^{0,14}$$

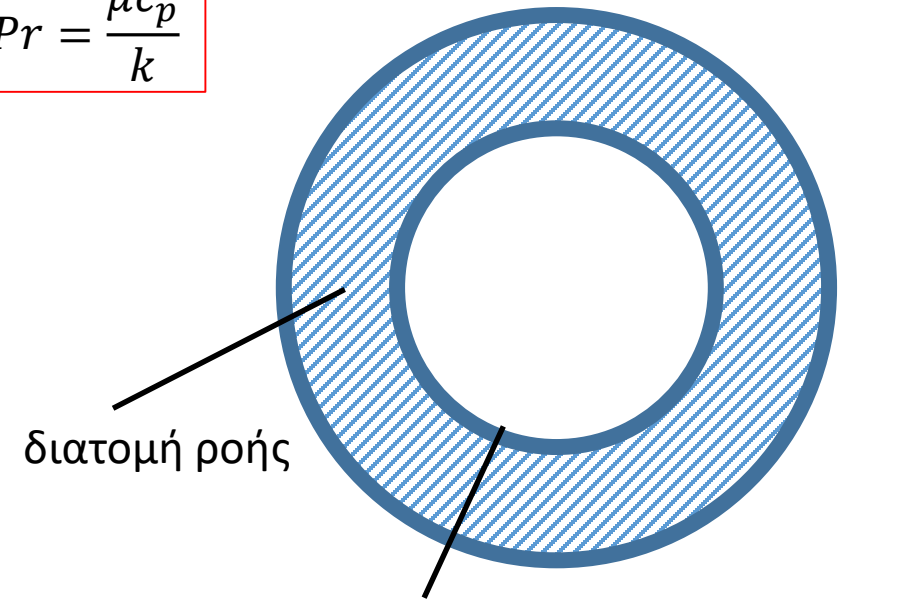
$$Nu = \frac{hd}{k}$$

$$Pr = \frac{\mu c_p}{k}$$

Στρωτή ροή
Μικρά μήκη

Στρωτή πλήρως
ανεπτυγμένη ροή

Τυρβώδης ροή



Υδραυλική διάμετρος για συναγωγή

$$d_h = \frac{4(\text{εμβαδόν ροής})}{(\text{διαβρεχόμενη περιμετρος})} = \frac{d_2^2 - d_1^2}{d_1}$$

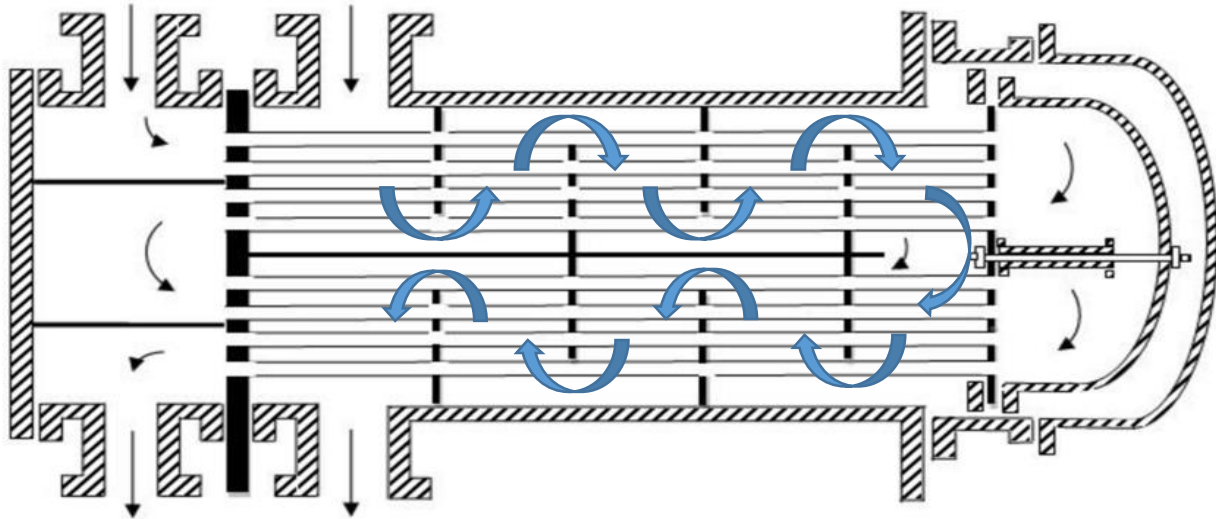
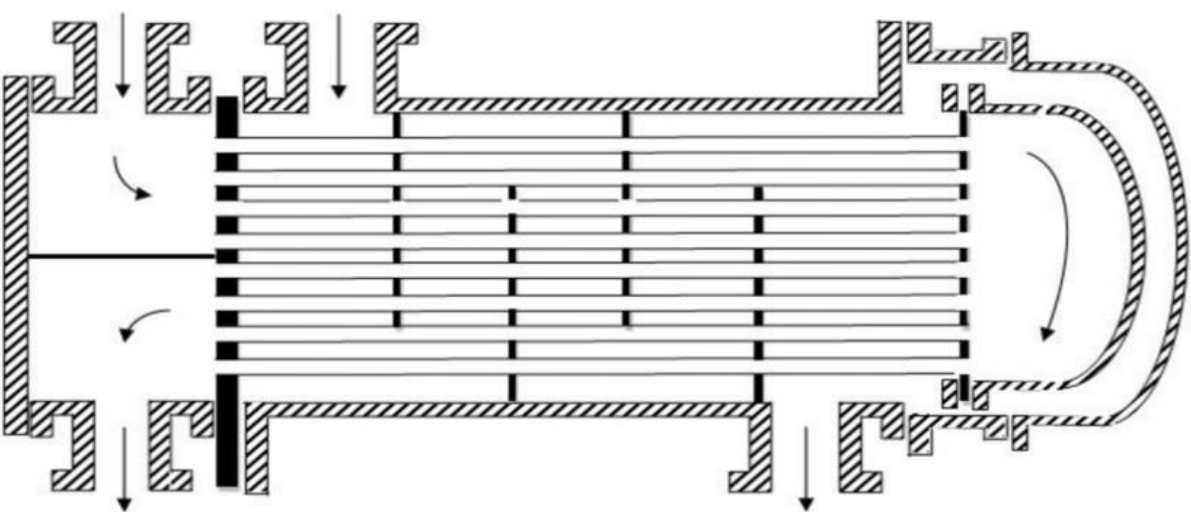
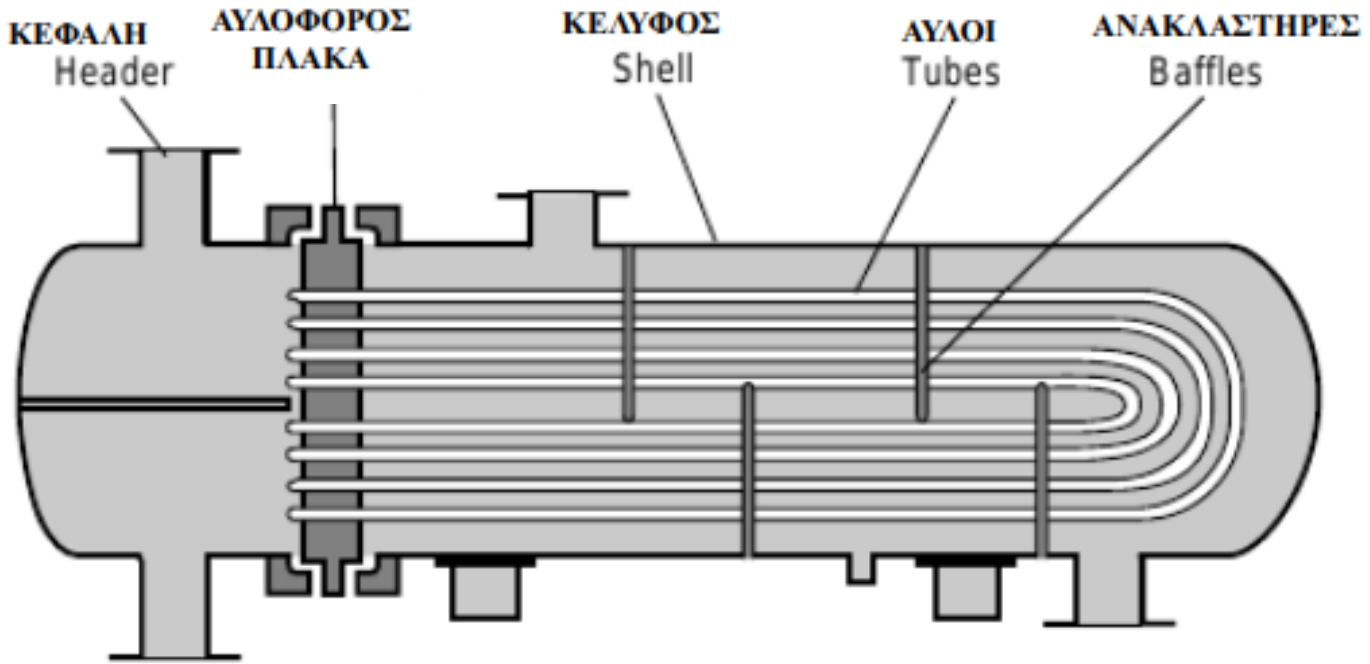
Διαστάσεις χαλυβδοσωλήνων

Nominal Pipe Size		Outside Diameter (mm)	Nominal Wall Thickness Schedule																	
NPS	DN		OD	SCH 5s	SCH 10s	SCH 10	SCH 20	SCH 30	SCH 40s	SCH STD	SCH 40	SCH 60	SCH 80s	SCH XS	SCH 80	SCH 100	SCH 120	SCH 140	SCH 160	SCH XXS
1/8	6	10.3		1.24				1.73	1.73	1.73		2.41	2.41	2.41						
1/4	8	13.7		1.65				2.24	2.24	2.24		3.02	3.02	3.02						
3/8	10	17.1		1.65				2.31	2,31	2.31		3.20	3.20	3.20						
1/2	15	21.3	1.65	2.11				2.77	2.77	2.77		3.73	3.73	3.73					4.78	7.47
3/4	20	26.7	1.65	2.11				2.87	2.87	2.87		3.91	3.91	3.91					5.56	7.82
1	25	33.4	1.65	2.77				3.38	3.38	3.38		4.55	4.55	4.55					6.35	9.09
1 1/4	32	42.2	1.65	2.77				3.56	3.56	3,56		4.85	4.85	4.85					6.35	9.70
1 1/2	40	48.3	1.65	2.77				3.68	3.68	3.68		5.08	5.08	5.08					7.14	10.15
2	50	60.3	1.65	2.77				3.91	3.91	3.91		5.54	5.54	5.54					8.74	11.07
2 1/2	65	73	2.11	3.05				5.16	5.16	5.16		7.01	7.01	7.01					9.53	14.02
3	80	88.9	2.11	3.05				5.49	5.49	5.49		7.62	7.62	7.62					11.13	15.24
3 1/2	90	101.6	2.11	3.05				5.74	5.74	5.74		8.08	8.08	8.08						
4	100	114.3	2.11	3.05				6.02	6.02	6.02		8.56	8.56	8.56		11.13			13.49	17.12
5	125	141.3	2.77	3.40				6.55	6.55	6.55		9.53	9,53	9.53		12.70			15.88	19.05
6	150	168.3	2.77	3.40				7.11	7.11	7.11		10.97	10.97	10.97		14.27			18.26	21.95
8	200	219.1	2.77	3.76		6.35	7.04	8.18	8.18	8.18	10.31	12.70	12.70	12.70	15.09	18.26	20.62		23.01	22.23
10	250	273.1	3.40	4.19		6.35	7.80	9.27	9.27	9.27	12.70	12.70	12.70	15.09	18.26	21.44	25.40		28.58	25.40
12	300	323.9	3.96	4.57		6.35	8.38	9.53	9.53	10.31	14.27	12.70	12.70	17.48	21.44	25.40	28.58		33.32	25.40



Εναλλάκτες αυλών-κελύφους

Κατασκευαστικά χαρακτηριστικά



Διάμετρος και πάχος τοιχώματος

Outside diameter		BWG						
		22	20	18	16	14	12	10
mm inches		Wall thickness mm						
		0.71	0.89	1.24	1.65	2.11	2.77	3.40
		Weight kg/m						
9.53	3/8	0.157	0.193	0.257				
12.7	1/2	0.214	0.263	0.356	0.457			
15.88	5/8	0.271	0.334	0.455	0.588			
19.05	3/4	0.327	0.405	0.553	0.729	0.895		
25.4	1	0.44	0.546	0.75	0.981	1.234	1.574	
31.75	1 1/4	0.554	0.688	0.947	1.244	1.574	2.014	
38.1	1 1/2	0.667	0.832	1.144	1.514	1.904	2.454	
44.5	1 3/4			1.342	1.774	2.244	2.894	3.5
50.8	2			1.549	2.034	2.574	3.334	4.03
63.5	2 1/2			1.949	2.554	3.244	4.214	5.13
76.2	3			2.345	3.084	3.914	5.094	6.19
88.9	3 1/2			2.729	3.609	4.584	5.974	7.27
101.6	4				4.134	5.254	6.854	8.35
114.3	4 1/2				4.654	5.924	7.734	9.43

Συνήθης διάμετρος: 10-30 mm (3/4" ή 1")

Εξαιρέση: $d_t > 30 \text{ mm}$
Εξατμιστήρες/συμπυκνωτές
με φυσική ανακυκλοφορία

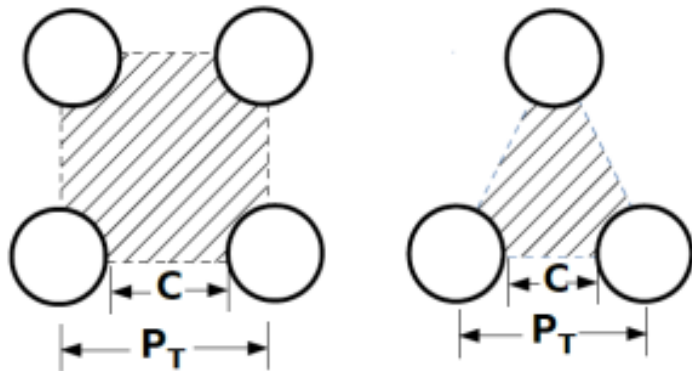
Μήκος αυλών: $1 \text{ m} < L < 20 \text{ m}$

$$A = N_t \pi d_t L \quad N_t \Rightarrow D_{sh} \quad L \uparrow \Rightarrow D_{sh} \downarrow$$

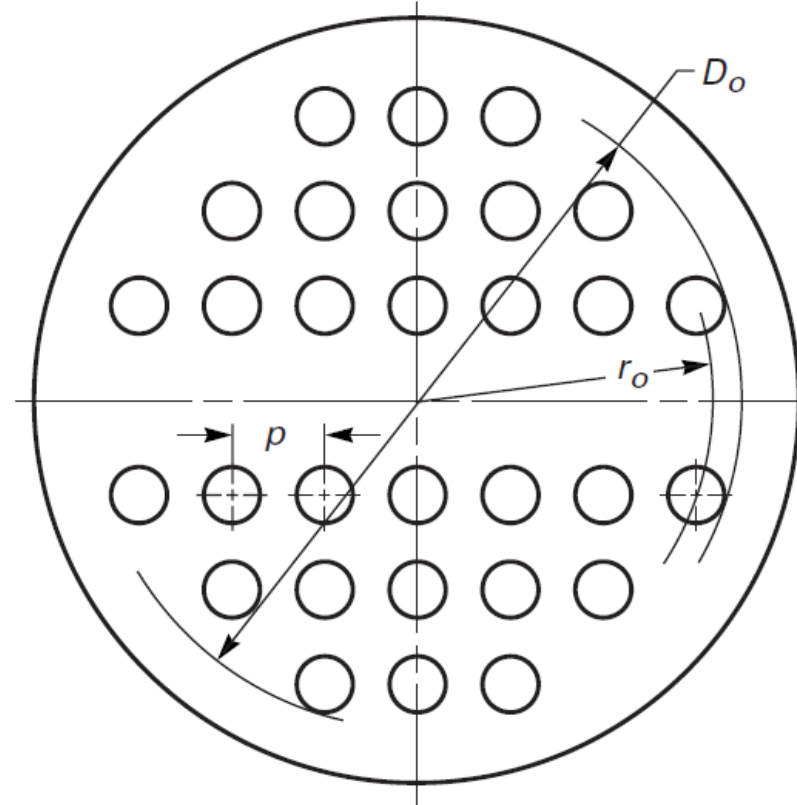
Συνήθεις διαστάσεις: $5 < \frac{L}{D_{sh}} < 15$

Διάταξη αυλών

- Τριγωνική ή τετραγωνική (μείωση διαμέτρου κελύφους/ευκολία εξωτερικού καθαρισμού)
- Διάκενα περασμάτων



$$P_T = 1,25d_t$$



Φορτία αυλοφόρου πλάκας και φλάντζας

- Διαφορική θερμική διαστολή
- Αμφίπλευρη διαφορά πίεσης
- Στεγανότητα παρεμβυσμάτων

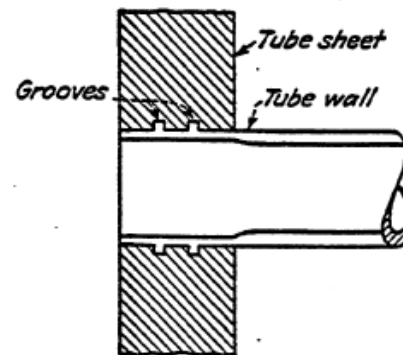


FIG. 7.1. Tube roll.

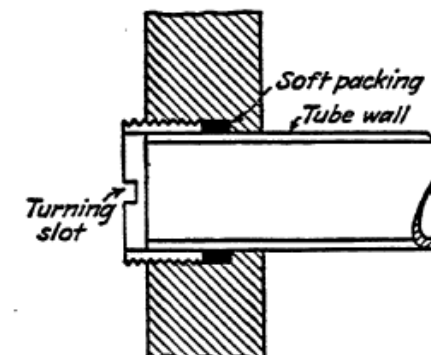


FIG. 7.2. Ferrule.

Σύνδεση αυλών

- Συγκόλληση
- Εκτόνωση
- κοχλίωση

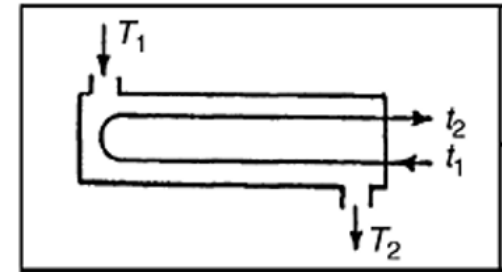
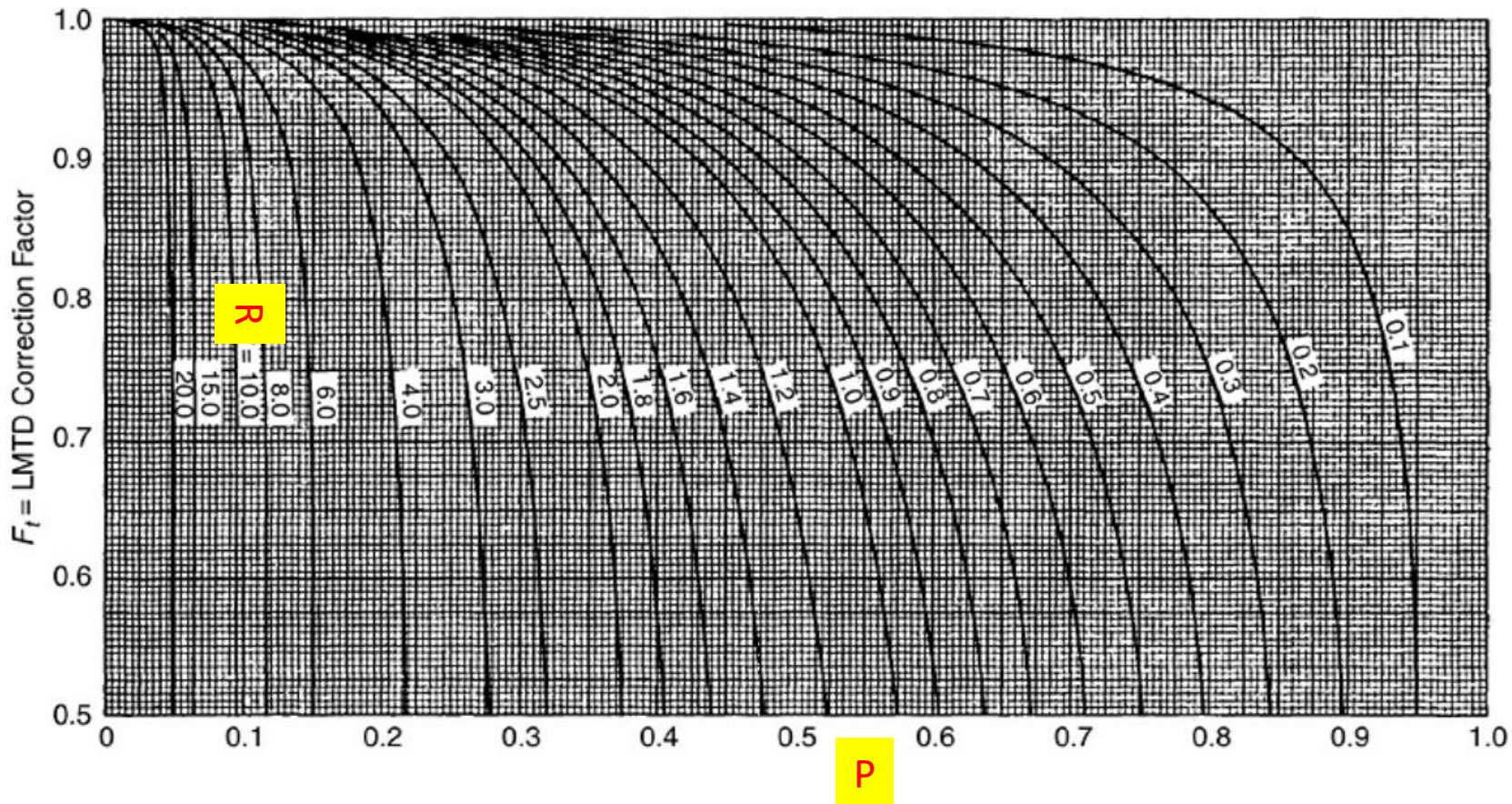
Περάσματα αυλών-κελύφους και μέση διαφορά θερμοκρασίας

Σκοπιμότητα πολλαπλών περασμάτων

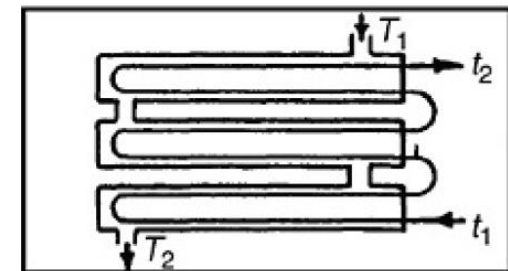
- Αύξηση ταχύτητας και συντελεστή συναγωγής
- Μεγάλη διαφορά παροχών
- Βελτιστοποίηση λόγου L/D_{sh}
- Χωροθέτηση εισόδου/εξόδου

$$\Delta T_{Mean} = F_T \Delta T_{LMTD}$$

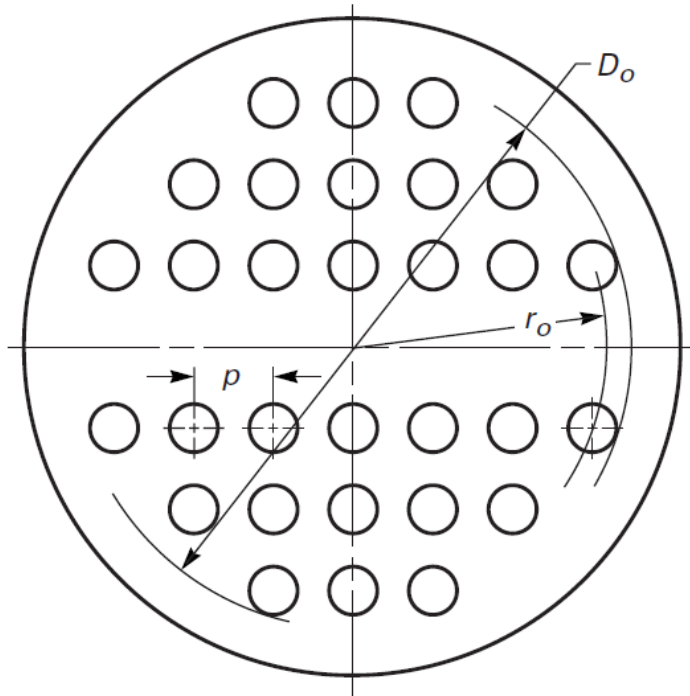
$$(F_T > 0,75)$$



$$P = \frac{t_2 - t_1}{T_1 - t_1} \quad R = \frac{T_1 - T_2}{t_2 - t_1}$$



Διάμετροι κελύφους και δέσμης αυλών



Διάμετρος κελύφους (προσεγγιστική)

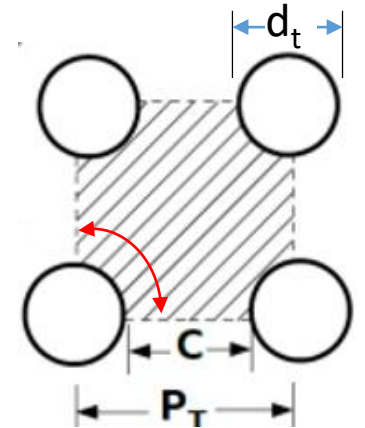
$$D_{sh} = P_T \left(\frac{C_L}{C_{PT}} \frac{4N_t}{\pi} \right)^{1/2}$$

$$N_t = \sim \frac{\pi}{4} \left(\frac{D_{sh}}{P_T} \right)^2$$

$$C_{PT} = 0.93/0.90/0.85$$

για ένα/δύο/τρία-τέσσερα περάσματα αυλών

$$C_L = \sin\theta \quad (1 \text{ ή } 0,87)$$



Διάμετρος δέσμης αυλών

$$D_{bundle} = d_t \left(\frac{N_t}{K_1} \right)^{1/n_1}$$

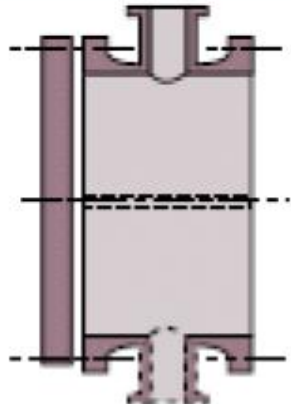

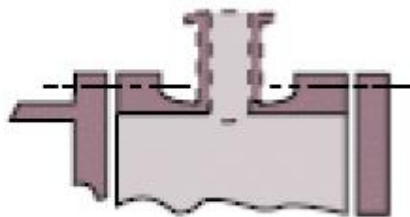
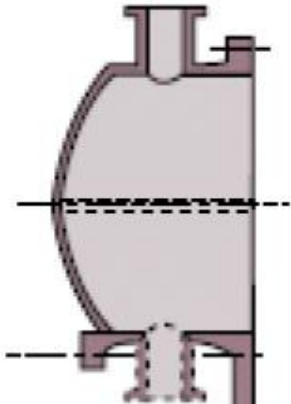
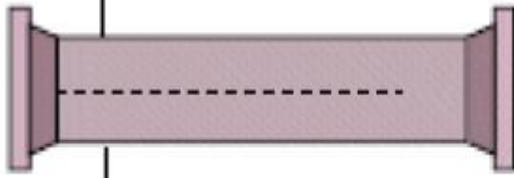

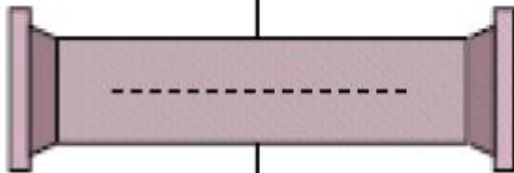
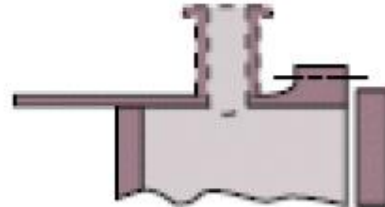
Triangular pitch, $P_T = 1,25d_t$

No. passes	1	2	4	6	8
K_1	0.319	0.249	0.175	0.0743	0.0365
n_1	2.142	2.207	2.285	2.499	2.675

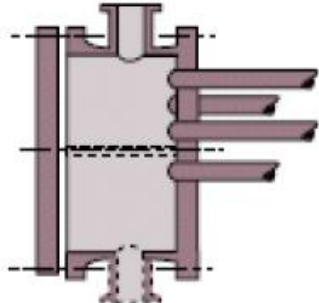
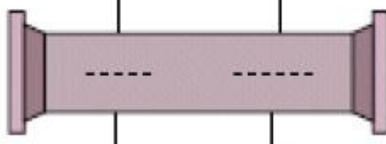
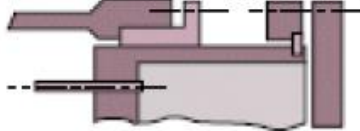
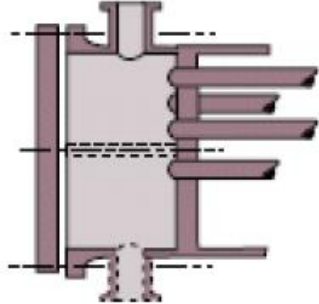
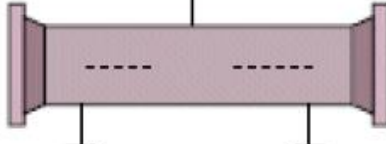
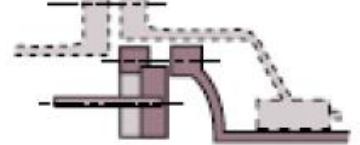
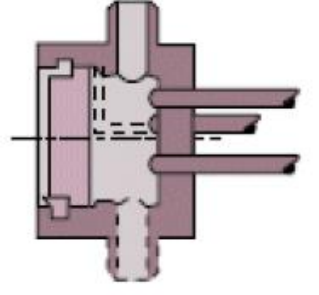
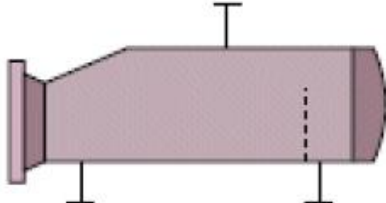

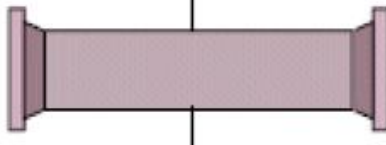


Square pitch, $P_T = 1,25d_t$

No. passes	1	2	4	6	8
K_1	0.215	0.156	0.158	0.0402	0.0331
n_1	2.207	2.291	2.263	2.617	2.643

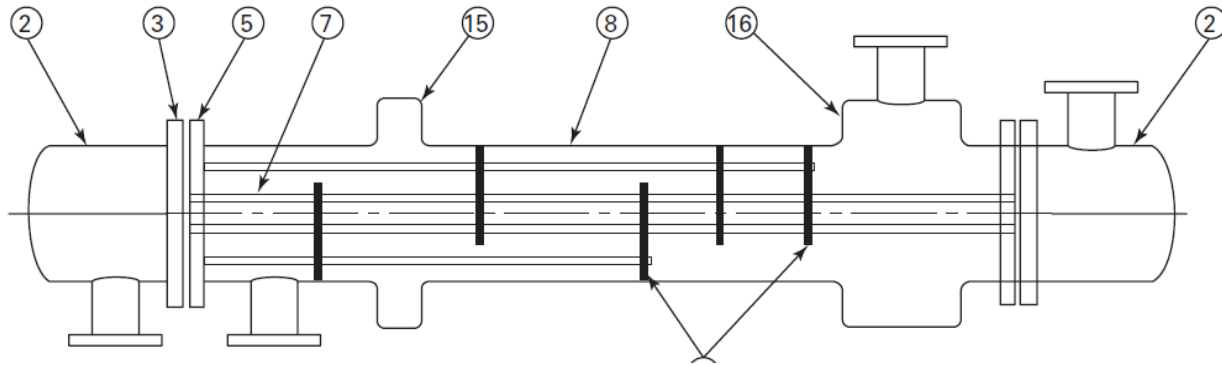
Παραλλαγές κεφαλών και κελυφών κατά ΤΕΜΑ

	Stationary Head Types	Shell Types	Rear Head Types
A	 <p>Removable Channel and Cover</p>	E  <p>One-Pass Shell</p>	L  <p>Fixed Tube Sheet Like "A" Stationary Head</p>
B	 <p>Bonnet (Integral Cover)</p>	F  <p>Two-Pass Shell with Longitudinal Baffle</p>	M  <p>Fixed Tube Sheet Like "B" Stationary Head</p>
		G  <p>Split Flow</p>	N  <p>Fixed Tube Sheet Like "C" Stationary Head</p>

Παραλλαγές κεφαλών και κελυφών κατά ΤΕΜΑ

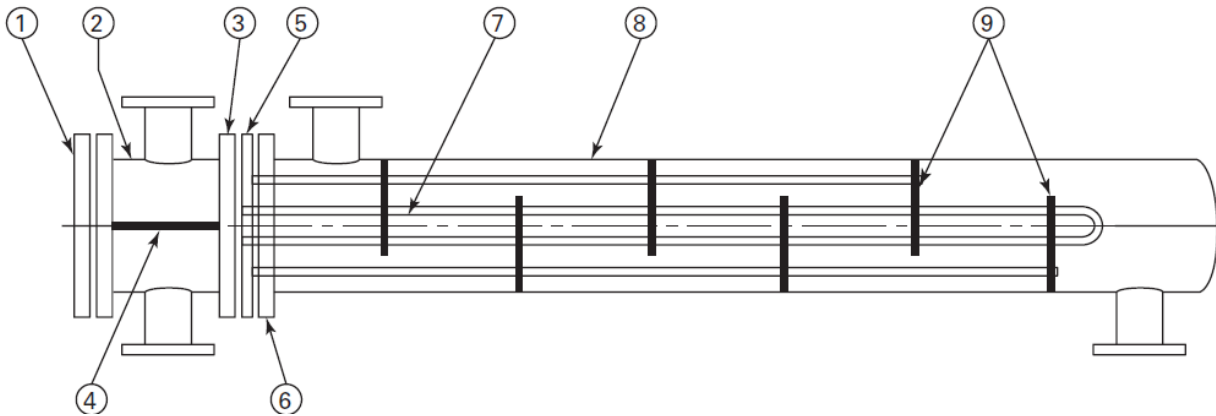
C	 <p>Integral With Tubesheet Removable Cover</p>		H	 <p>Double Split Flow</p>	P	 <p>Outside Packed Floating Head</p>
N	 <p>Channel Integral With Tubesheet and Removable Cover</p>	J	 <p>Divided Flow</p>	S	 <p>Floating Head with Backing Device</p>	
D	 <p>Special High-Pressure Closures</p>	K	 <p>Kettle-Type Reboiler</p>	T	 <p>Pull-Through Floating Head</p>	
		X	 <p>Cross Flow</p>	U	 <p>U-Tube Bundle</p>	
				W	 <p>Externally Sealed Floating Tubesheet</p>	

Παραδείγματα εναλλακτών



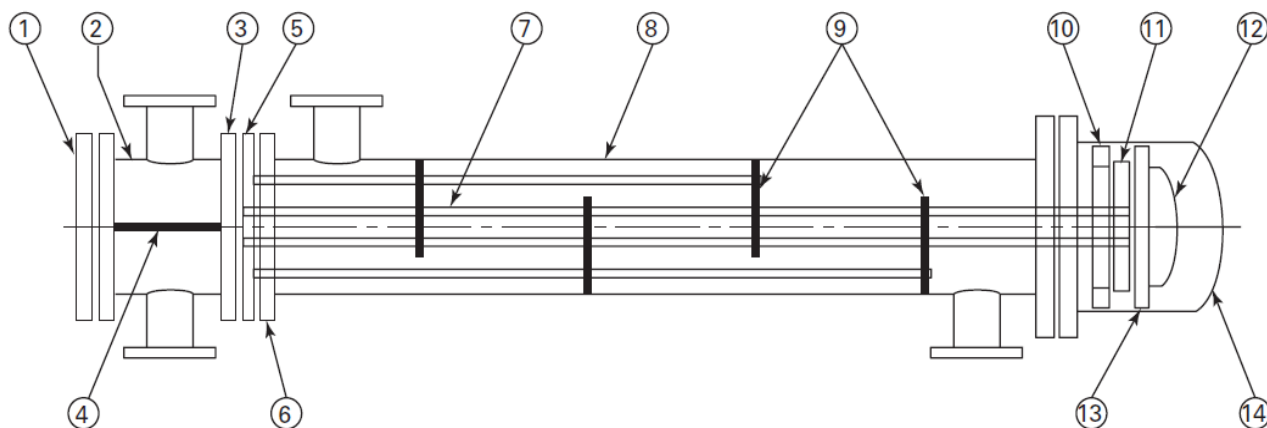
BEM

- Απλή συμπαγής κατασκευή
- Μη-προσβάσιμη εξωτερική επιφάνεια αυλών
- Μικρές θερμικές διαστολές (δακτύλιος διαστολής)



AEU

- Ο φθηνότερος
- Απεριόριστες διαστολές
- Δύσκολος καθαρισμός αυλών
- Ζυγά περάσματα



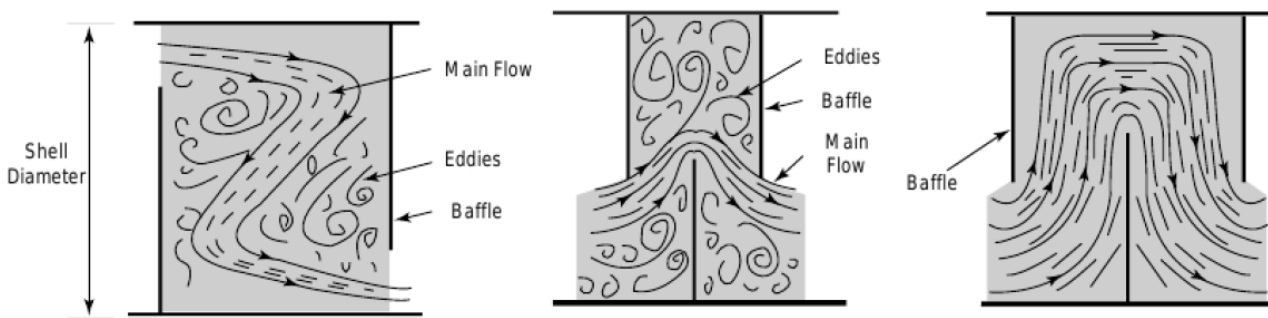
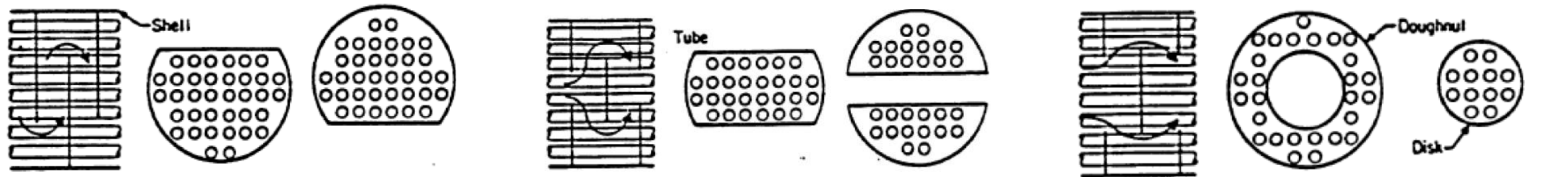
AES

- Ακριβή κατασκευή
- Ελεύθερες διαστολές
- Διάκενο δέσμης/κελύφους
- Εσωτερικές διαρροές

- ① Channel cover (bolted flat cover)
- ② Channel
- ③ Channel flange
- ④ Pass partition
- ⑤ Stationary tubesheet
- ⑥ Shell flange
- ⑦ Tubes
- ⑧ Shell
- ⑨ Baffles or support plates
- ⑩ Floating head backing device
- ⑪ Floating tubesheet
- ⑫ Floating head
- ⑬ Floating head flange
- ⑭ Shell cover
- ⑮ Expansion joint
- ⑯ Distribution or vapor belt

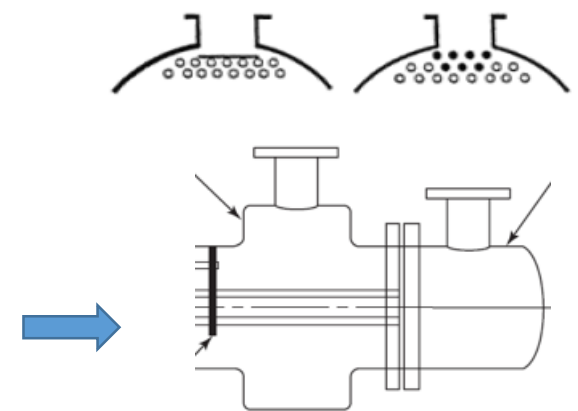


- Ενδεικτικό άνοιγμα: 15-30% της διατομής
- Ενδεικτική απόσταση: 40-60% της διαμέτρου κελύφους
- Καθοδήγηση ροής / στήριξη αυλών
- Αύξηση απόδοσης αλλά και πτώσης πίεσης



← Αποφυγή λιμνάζοντος ρευστού

→ Διαμορφώσεις εισόδου κελύφους



Διαμόρφωση εναλλάκτη

(με βάση την προκαταρκτική επιφάνεια εναλλαγής A)

Πλήθος αυλών ανά πέρασμα με επιλογή διαμέτρου, d_i, d_o , και ταχύτητας, u_t , αυλών

$$d_{ti}, u_t \Rightarrow N_{pass} = \frac{m_t / \rho}{u_t (\pi d_i^2 / 4)}$$

Μήκος αυλών με δοκιμή εναλλακτικού αριθμού περασμάτων, n_{pass}

$$A = \pi d_{to} L N_t = \pi d_{to} L n_{pass} N_{pass} \Rightarrow L = \frac{A}{\pi d_{to} n_{pass} N_{pass}}$$

Διόρθωση με κριτήριο τον λόγο L/D_{sh}

$$N_t = n_{pass} N_{pass}, \quad N_t \Rightarrow D_{sh} : 5 < \frac{L}{D_{sh}} < 15$$

Θερμο-υδραυλικός σχεδιασμός (μέθοδος Kern)

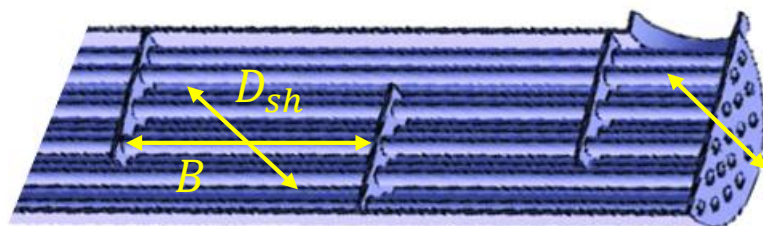
Πλευρά αυλών

$\Delta P_t, h_t$: όπως στον εναλλάκτη διπλού σωλήνα ,

$$\Delta P_r = 4n_{pass} \left(\frac{1}{2} \rho u^2 \right) : \text{πτώση πίεσης ανά πέρασμα}$$

Πλευρά κελύφους

Διατομή ροής: $A_{sh} = D_{sh} B \frac{C}{P_T}$



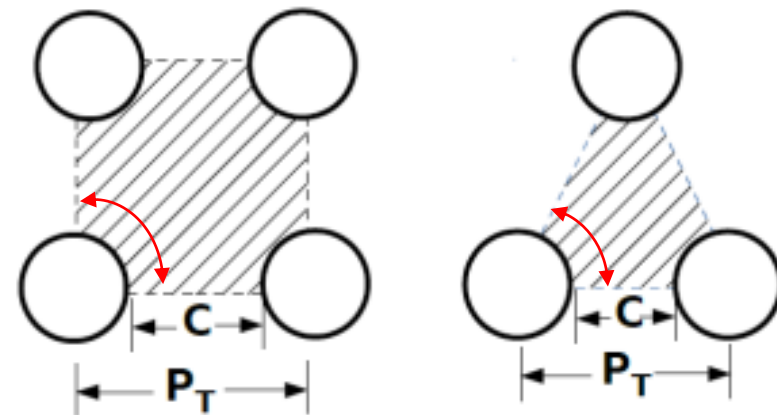
Μαζική ταχύτητα: $G = \rho u_{sh} = \frac{m_{sh}}{A_{sh}}$

Συντελεστής συναγωγής: $\frac{h_o D_h}{k} = 0.36 \left(\frac{D_h G}{\mu} \right)^{0.55} Pr^{0.33} \left(\frac{\mu}{\mu_w} \right)^{0.14}$

Πτώση πίεσης: $\Delta P_{sh} = f \frac{D_{sh} (N_B + 1) G^2}{D_h} \frac{1}{2\rho}, \quad f = 1.779 \left(\frac{D_h G}{\mu} \right)^{-0.19}$

$N_B = L/B - 1$: πλήθος ανακλαστήρων

Υδραυλική διάμετρος



$$D_h = \frac{4(P_T^2 \sin\theta - \pi d^2 / 4)}{\pi d}$$

Αξιολόγηση εναλλάκτη αυλών-κελύφους με τη μέθοδο ε-NTU

Υπενθύμιση της μεθόδου

$$C_h = m_h c_{ph}, \quad C_c = m_c c_{pc}$$

$$C_{min} = \min(C_h, C_c), \quad C_{max} = \max(C_h, C_c)$$

$$C_R = \frac{C_{min}}{C_{max}}, \quad NTU = \frac{UA}{C_{min}}$$

$$\varepsilon = \frac{Q}{Q_{max}} = \frac{C_h(T_{hi} - T_{ho})}{C_{min}(T_{hi} - T_{ci})} = \frac{C_c(T_{co} - T_{ci})}{C_{min}(T_{hi} - T_{ci})}$$

Ένα πέρασμα κελύφους και ζυγός αριθμός περασμάτων αυλών

$$\varepsilon \equiv \varepsilon_1 = 2 \left[1 + C_R + \sqrt{1 + C_R^2} \frac{1 + \exp(-NTU\sqrt{1 + C_R^2})}{1 - \exp(-NTU\sqrt{1 + C_R^2})} \right]^{-1}$$

n_{sh} περάσματα κελύφους και $n_{pass} = 2n_{sh}$ περάσματα αυλών

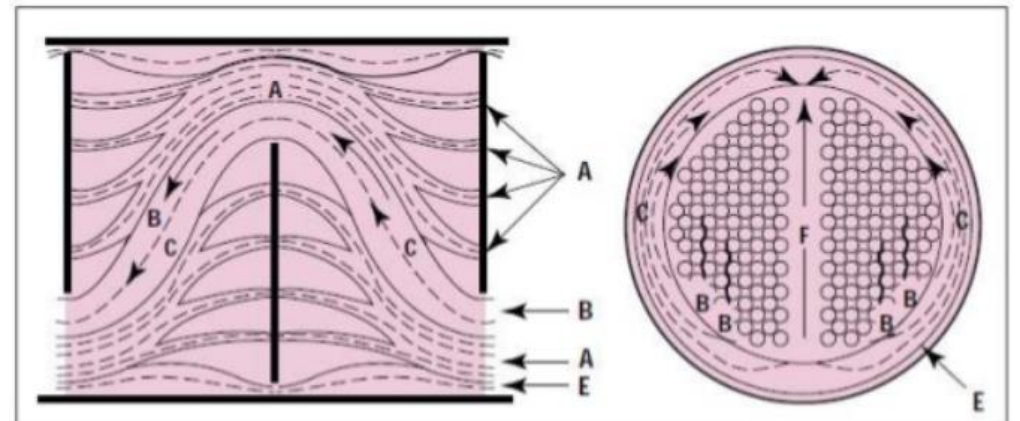
$$\varepsilon = \frac{[(1 - \varepsilon_1 C_R)/(1 - \varepsilon_1)]^{n_{sh}} - 1}{[(1 - \varepsilon_1 C_R)/(1 - \varepsilon_1)]^{n_{sh}} - C_R}$$

Μέθοδος Bell-Delaware

https://checalc.com/solved/heat_exchanger.html

$$h_o = h_{id} J_{cut} J_{leak} J_{pass} J_{temp}$$

$$\Delta P_{sh} = \Delta P_{cen} + \Delta P_{win} + \Delta P_{ee}$$



Χωροθέτηση ρευστών σε αυλούς και κέλυφος

Βασικά κριτήρια (συχνά αντικρουόμενα)

- **Ευκολία καθαρισμού:** Η εξωτερική επιφάνεια εναλλαγής καθαρίζεται δυσκολότερα
- **Διάβρωση:** Περισσότερο συμφέρουσα η χρήση ακριβών κραμάτων μόνον στους αυλούς
- **Πίεση:** Υψηλή πίεση αντιμετωπίζεται καλύτερα στους αυλούς (πάχος τοιχώματος δοχείου πίεσης)
- **Θερμοκρασία:** Υψηλή θερμοκρασία μειώνει την μέγιστη επιτρεπτή τάση του υλικού (στους αυλούς)
- **Επικίνδυνα ρευστά:** Στους αυλούς για μεγαλύτερη ασφάλεια σε περίπτωση διαρροής
- **Μικρή παροχή:** Είτε στους αυλούς με πολλά περάσματα, είτε στο κέλυφος όπου επιτυγχάνεται ευκολότερα τύρβη λόγω των ανακλαστήρων
- **Πτώση πίεσης:** Προβλέπεται με μεγαλύτερη ακρίβεια στους αυλούς. Στο κέλυφος μπορεί να ελαχιστοποιηθεί με κατάλληλη επιλογή τύπου κελύφους και μείωση/εξάλειψη των ανακλαστήρων

Κυλινδρικό δοχείο υπό εσωτερική πίεση

Περιμετρική φόρτιση
(διαμήκης σύνδεσμος) $t = \frac{PR}{SE - 0,6P}$

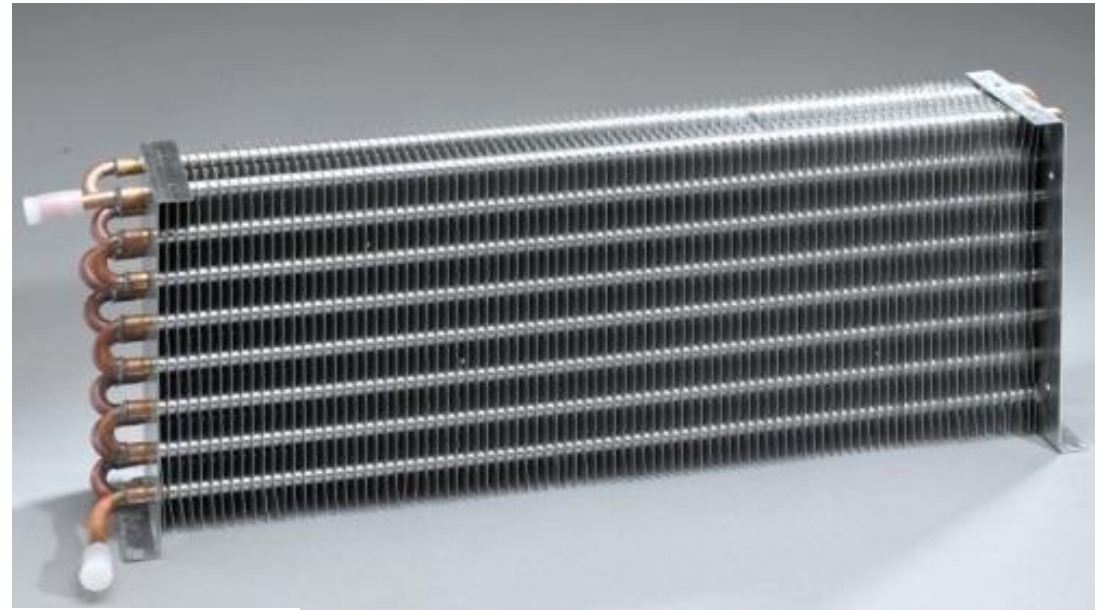
Διαμήκης φόρτιση
(περιμετρικός σύνδεσμος) $t = \frac{PR}{2SE + 0,4P}$

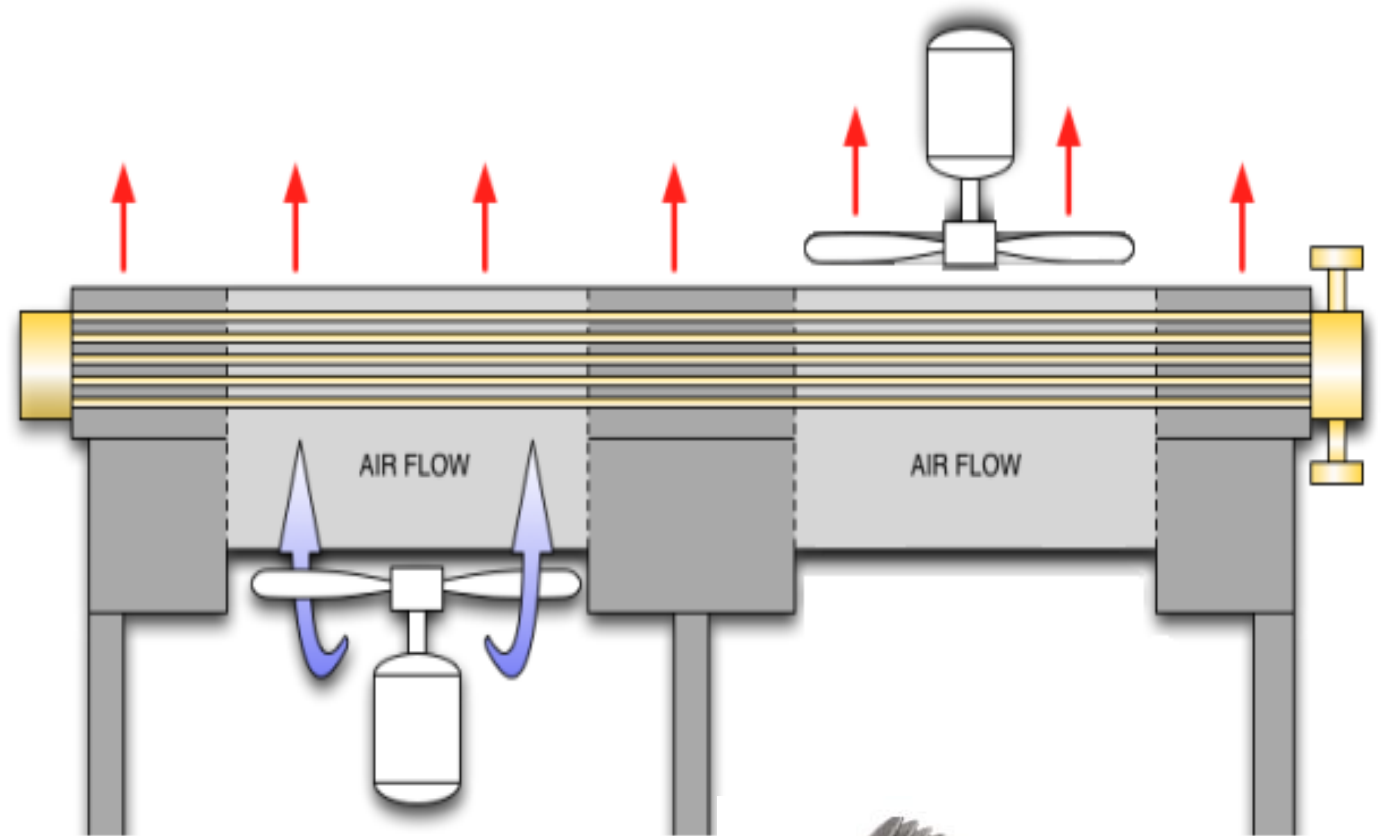
R : εσωτερική ακτίνα

S : μέγιστη επιτρεπτή τάση

E : απόδοση συνδέσμου

Εναλλάκτες αυλών-πτερυγίων





Βασικά χαρακτηριστικά

- Αερόψυκτοι εναλλάκτες
- Συχνά χρησιμοποιούνται ως συμπυκνωτές
- Χαμηλή θερμοχωρητικότητα αέρα, ισχυροί φουσητήρες
- Προσαγόμενος ή επαγόμενος ελκυσμός (forced or induced draft)
- Μεταβολές πυκνότητας αέρα (θερμοκρασία και πίεση περιβάλλοντος)





Ανάλυση τάξης μεγέθους

$$Q \sim u_{tip} A_{flow} \sim ND^3 \quad (\text{Ογκομετρικές συσκευές})$$

$$\Delta P = \rho_w g H_w \sim \rho u_{tip}^2 \sim \rho N^2 D^2$$

$$I = Q \Delta P \sim \rho N^3 D^5 \quad (\text{Ωφέλιμη ισχύς})$$

$$\eta = \frac{Q \Delta P}{(bhp)}$$

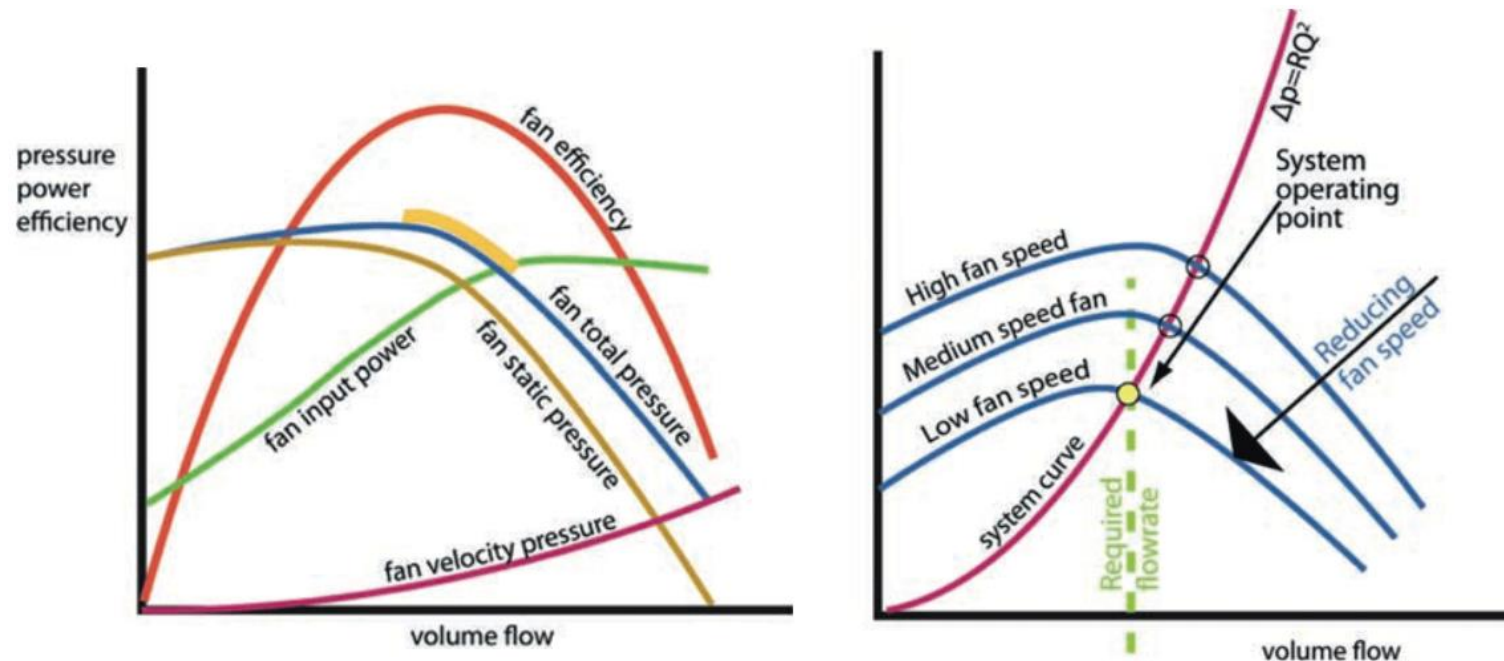
Καμπύλες λειτουργίας

$$\Delta P = f(Q), \quad \eta = g(Q)$$

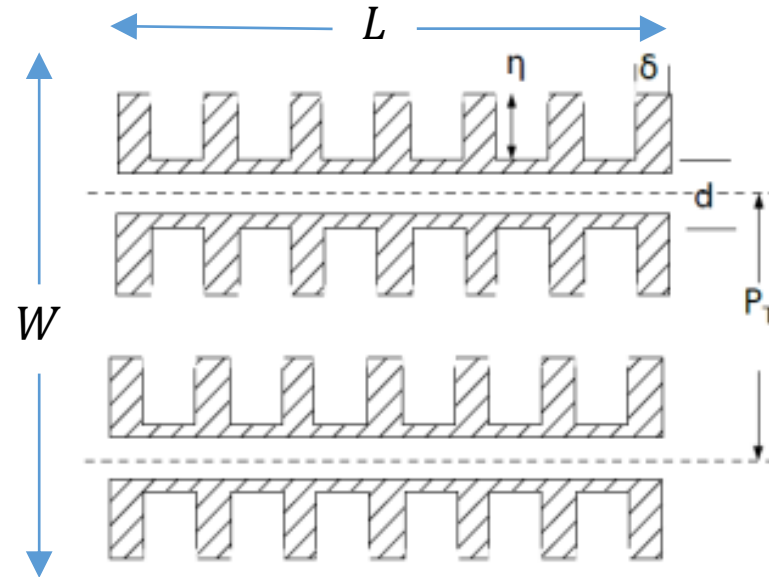
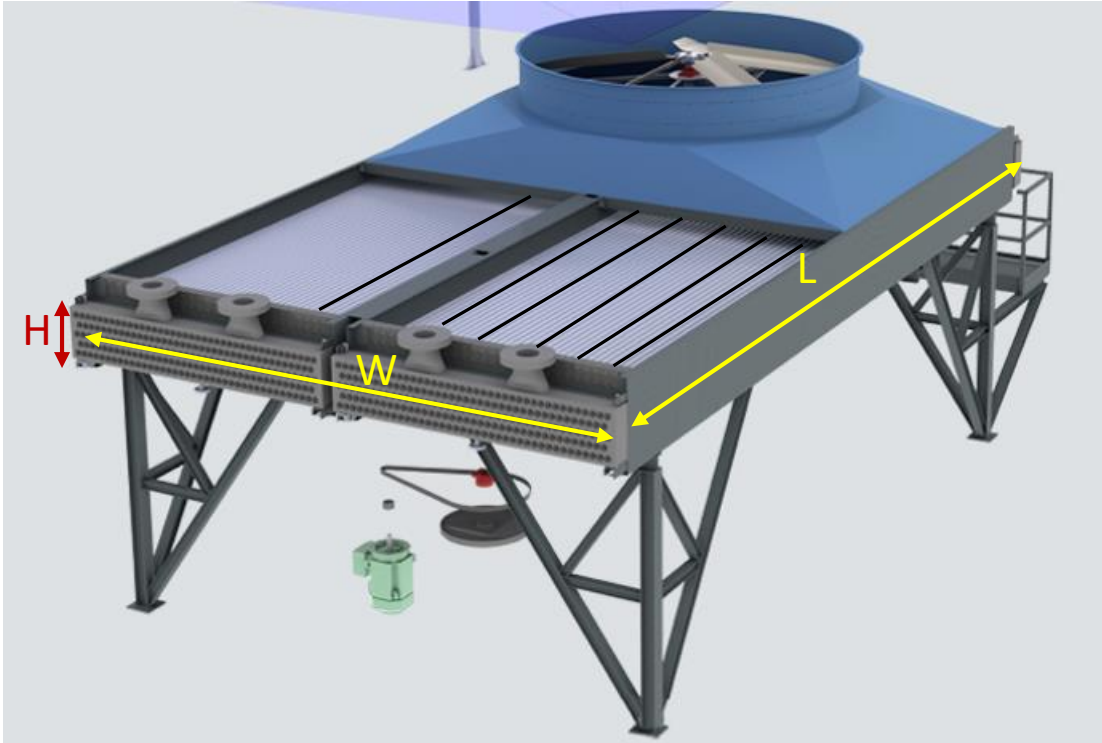
$$u_{tip} \sim ND$$

$$\Delta P \sim \rho u_{tip}^2$$

N : αριθμός στροφών
 D : διάμετρος φτερωτής
 u_{tip} : ταχύτητα ακμής



Γεωμετρικές παράμετροι συστοιχίας αυλών



Διατομή προσβολής: LW

L : Μήκος αυλών

$$W = N_T P_T$$

$$H = N_a P_a$$

Συνολικός αριθμός αυλών: $N = N_T N_a$

Πλήθος πτερυγίων ανά μέτρο μήκους: n_f

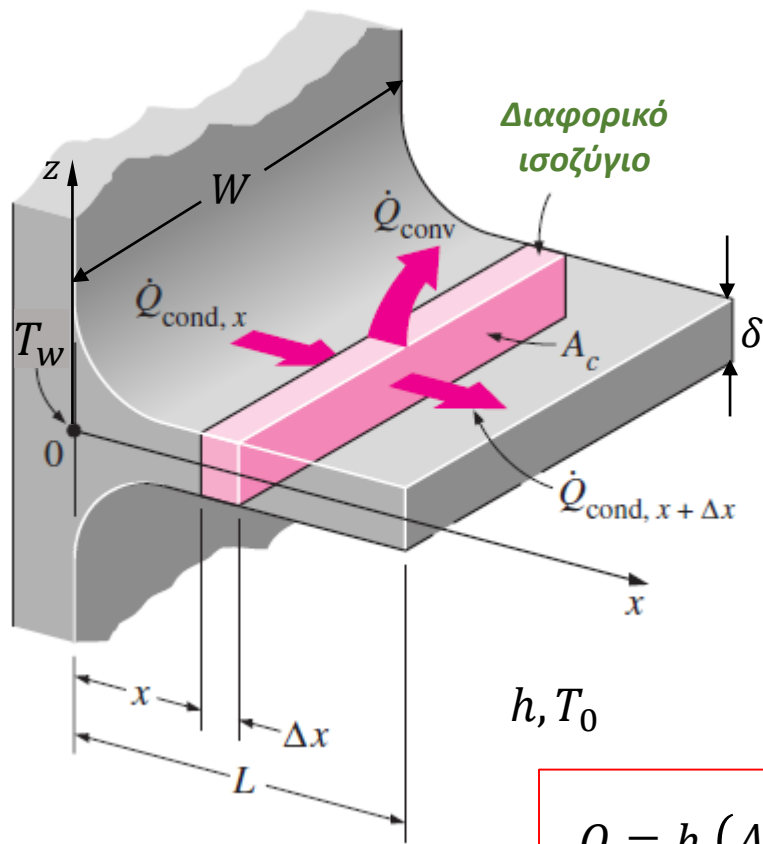
Εξωτερική επιφάνεια γυμνών αυλών: $A_o = (\pi d_o)LN$

Ακάλυπτη επιφάνεια αυλών: $A_r = \pi d_o LN(1 - n_f \delta)$

Επιφάνεια πτερυγίων: $A_f = (N n_f L) \left[\frac{\pi}{2} [(d_o + 2\eta)^2 - d_o^2] + \pi (d_o + 2\eta) \delta \right]$

Συνολική θερμικά ενεργή επιφάνεια: $A_t = A_f + A_r$

Αγωγή-συναγωγή σε πτερύγια



$$Bi_\delta \ll 1, Bi_L \sim 1 \Rightarrow T(x, z) \approx T(x)$$

Πτερύγια σταθερής διατομής

$$-d \left(-\delta W k \frac{dT}{dx} \right) = [(2W + 2\delta)dx] h (T - T_o) \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \frac{d^2\theta}{dx^2} - m^2\theta = 0, m = \sqrt{\frac{2h}{k\delta}}$$

$$\Rightarrow \theta(x) = \frac{T(x) - T_o}{T_w - T_o} = \frac{\cosh[m(L-x)]}{\cosh(mL)}$$

$$Q = h (A_w + \eta A_f) (T_w - T_o), \quad \eta = \frac{\tanh(mL)}{(mL)}$$

Εφαρμογές

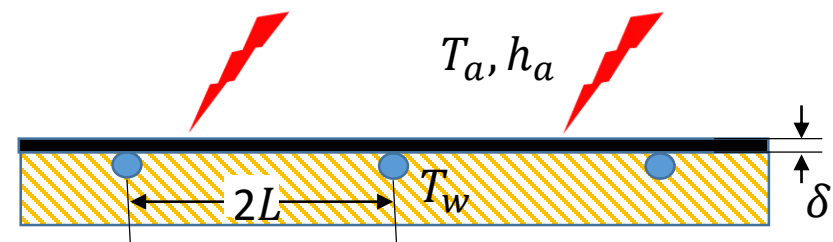
- Ηλιακός συλλέκτης
- Πάνελ ακτινοβολίας



$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = 0$$

$$\bar{T}(x) = \frac{2}{\delta} \int_0^{\delta/2} T dz$$

$$\Rightarrow \frac{d^2 \bar{T}}{dx^2} + \frac{2}{\delta} \left(\frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=\delta/2} - \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=0} \right) = 0 \Rightarrow \frac{d^2 \bar{T}}{dx^2} - \frac{2h_a}{\delta k} [T(x, \delta/2) - T_a] = 0$$



Βάση σχεδιασμού

Φαινομενική ταχύτητα αέρα: $u_0 = \frac{\dot{m}/\rho}{LW}$

$$u_0 = 3 - 3,5 \text{ m/s} \rightarrow$$

$$N_a = 6 - 3 \text{ σειρές αυλών}$$

Συντελεστής συναγωγής αέρα

Μέγιστη ταχύτητα: $u_{max} = \frac{\dot{m}/\rho}{S_{min}}$, $S_{min} = N_T(P_T - d_o - 2n_f\delta\eta)L$

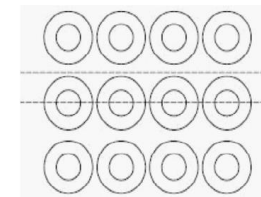
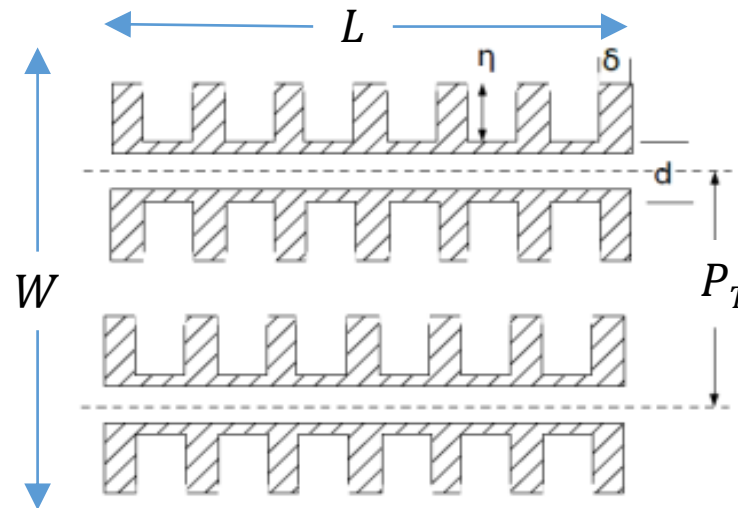
$$Re = \frac{\rho u_{max} d_o}{\mu} \Rightarrow Nu = \frac{h d_o}{k} = a Re^{0.633} \varepsilon^{-0.17} Pr^{1/3} \left(\frac{N_a}{10}\right)^{0.18} \quad \varepsilon = \frac{A_t}{A_o}$$

Βαθμός απόδοσης πτερυγίων (μορφής δίσκου)

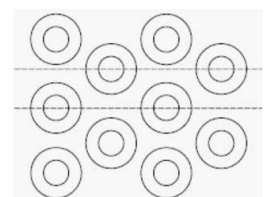
$$\Omega_f = \frac{\tanh(m\eta_e)}{(m\eta_e)} [1 - 0.058(m\eta_e)]$$

$$m = \sqrt{2h/(k_f\delta)}$$

$$\eta_e = \left(\eta + \frac{\delta}{2}\right) \left(1 + 0.35 \ln \frac{d + 2\eta}{d}\right)$$



$$a = 0.201$$



$$a = 0.290$$

ΠΡΟΣΟΧΗ

$$Q = h(A_r + \Omega_f A_f)(T_w - T_o) = h_t A_t (T_w - T_o) \Rightarrow$$

$$h_t = h \left[1 - (1 - \Omega_f) \left(\frac{A_f}{A_t}\right) \right]$$

Σύνθεση θερμικών αντιστάσεων

Θερμικό καθήκον εναλλάκτη

$$Q = U_t A_t (\Delta T)_{Mean}$$

Εσωτερικό των αυλών: $h_i, A_i = N\pi d_i L$

$$Q = h_i A_i (T_i - T_{wi})$$

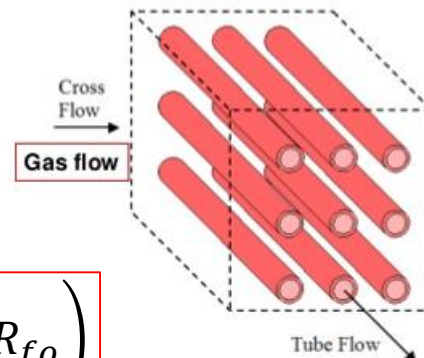
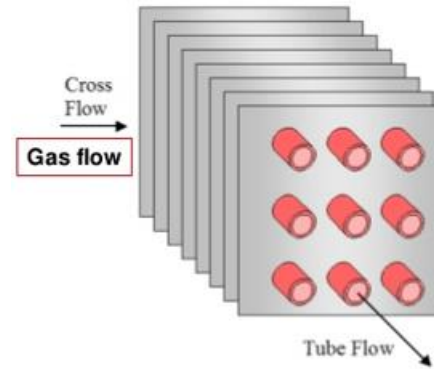
Τοίχωμα αυλών:

$$Q = A_o k_w \frac{(T_{wi} - T_{wo})}{r_o \ln(r_o/r_i)}$$

Εξωτερική επιφάνεια αυλών:

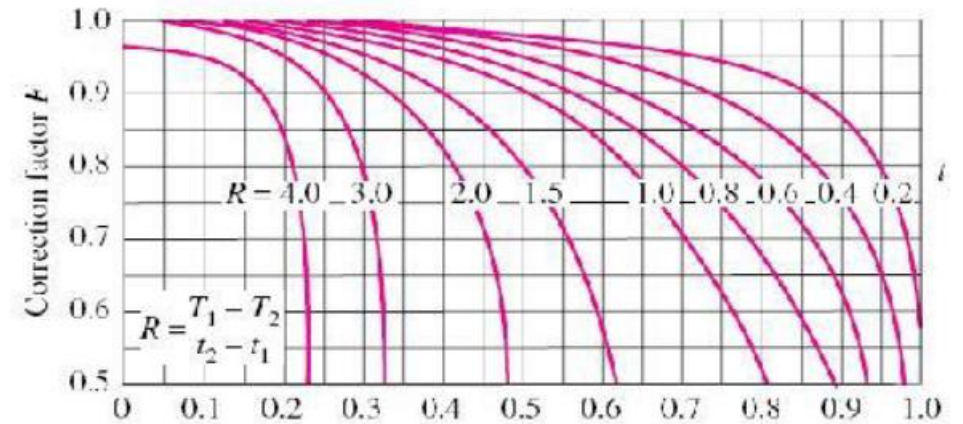
$$Q = h_t A_t (T_{wo} - T_o)$$

$$\frac{1}{U_t} = \left(\frac{A_t}{A_i}\right) \left(\frac{1}{h_i} + R_{fi}\right) + \left(\frac{A_t}{A_o}\right) \frac{d \ln(d/d_i)}{2k_w} + \left(\frac{1}{h_t} + R_{fo}\right)$$

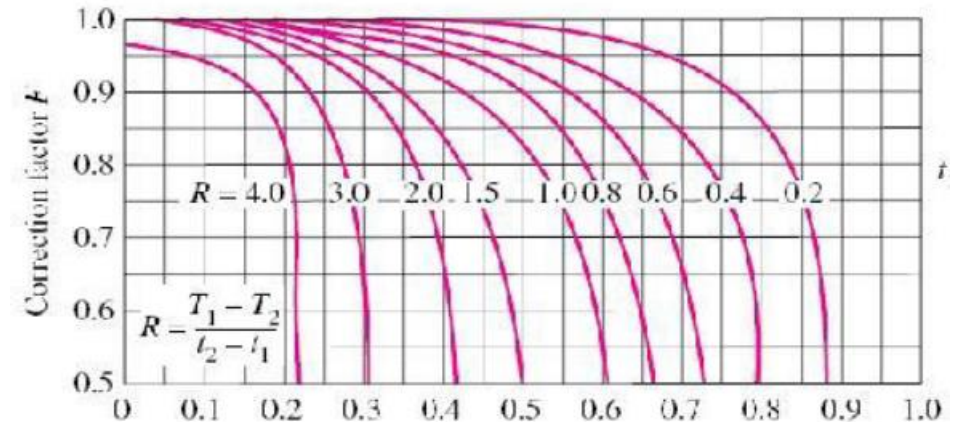


Μέση διαφορά θερμοκρασίας

$$(\Delta T)_{Mean} = F \Delta T_{LM}$$



Σταυρωτή ροή χωρίς ανάμιξη



Σταυρωτή ροή με ανάμιξη του εξωτερικού ρευστού

Μέθοδος ε-NTU

Ανάμιξη στο ρεύμα με C_{max} (και όχι σε αυτό με C_{min}):

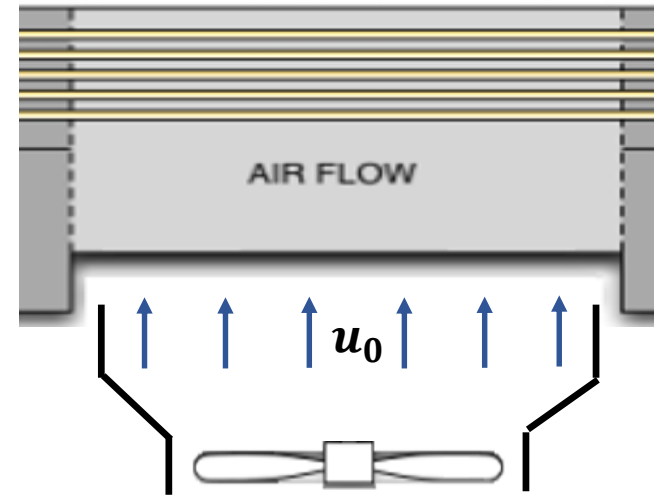
$$\varepsilon = \frac{1}{C_R} \left[1 - \exp \left[-C_R (1 - \exp(-NTU)) \right] \right]$$

Ανάμιξη στο ρεύμα με C_{min} (και όχι σε αυτό με C_{max}):

$$\varepsilon = 1 - \exp \left[-\frac{1}{C_R} [1 - \exp(-C_R NTU)] \right]$$

Χωρίς ανάμιξη

$$\varepsilon = 1 - \exp \left[\frac{1}{C_R} NTU^{0.22} [\exp(-C_R NTU^{0.78}) - 1] \right]$$



Πτώση πίεσης

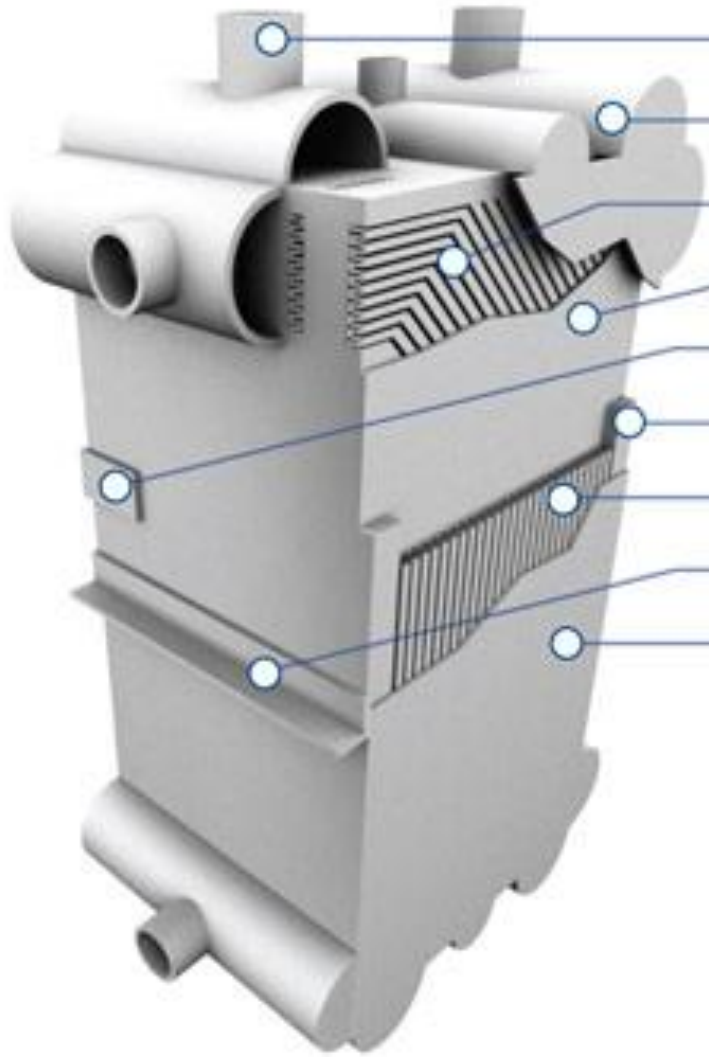
$$\Delta P = 4f \left(\frac{\rho u_{max}^2}{2} \right) N_a + \frac{1}{2} \rho \left(\frac{u_0}{0.4} \right)^2$$

Ορθογωνική διάταξη αυλών: $f = \left(\frac{d_o + 2\eta}{d_o} \right) C_1 C_2 C_3$,

Τριγωνική διάταξη αυλών: $f = \sqrt{\frac{(d_o + 2\eta)}{d_o}} C_1 C_2' C_3'$

(Τα C_i , C_i' εξαρτώνται από: Re , P_T , P_a , d_o , n_f , η , δ , N_a)

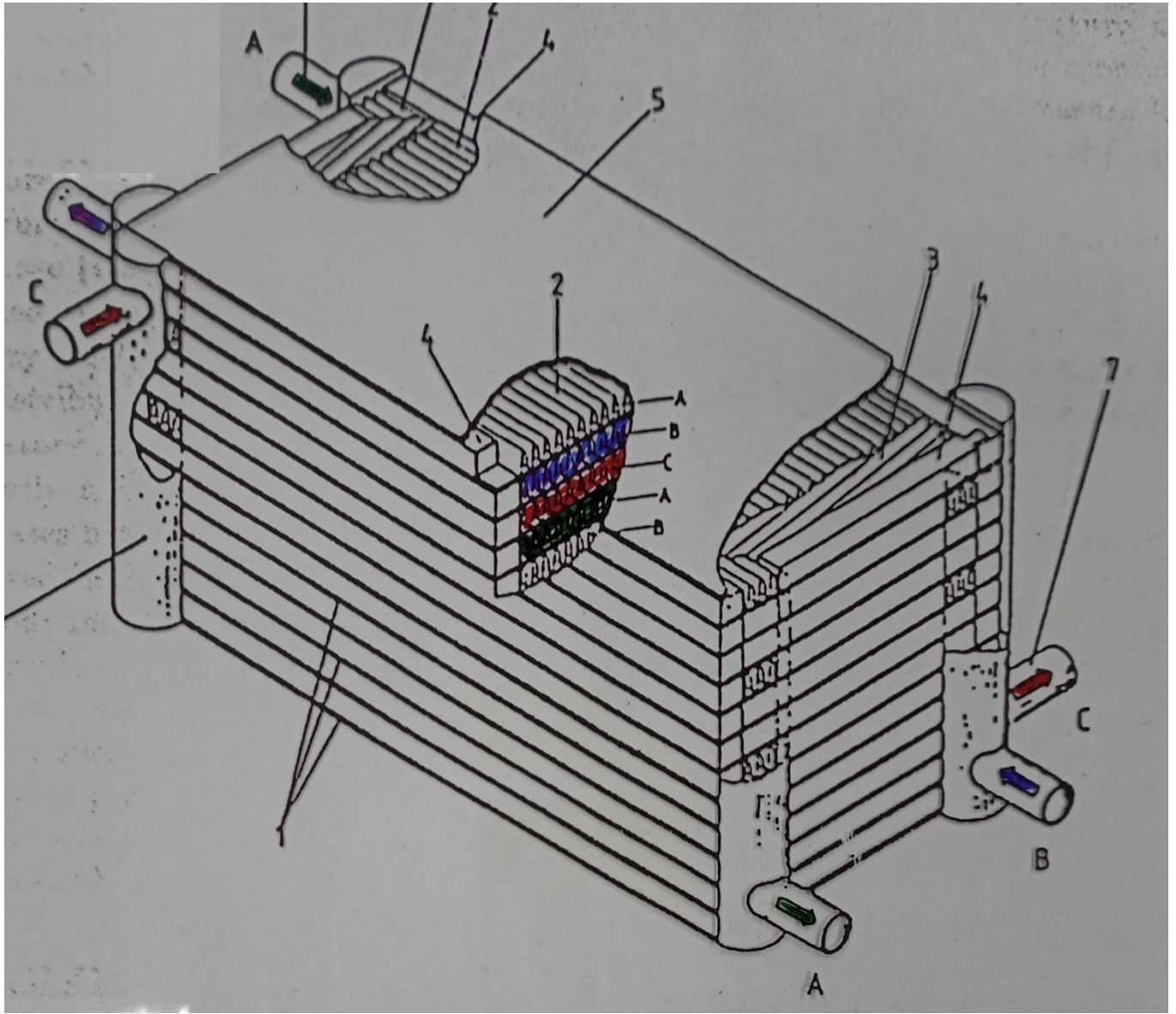
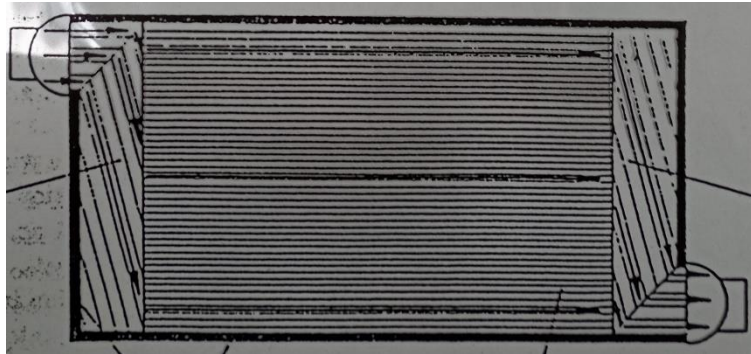
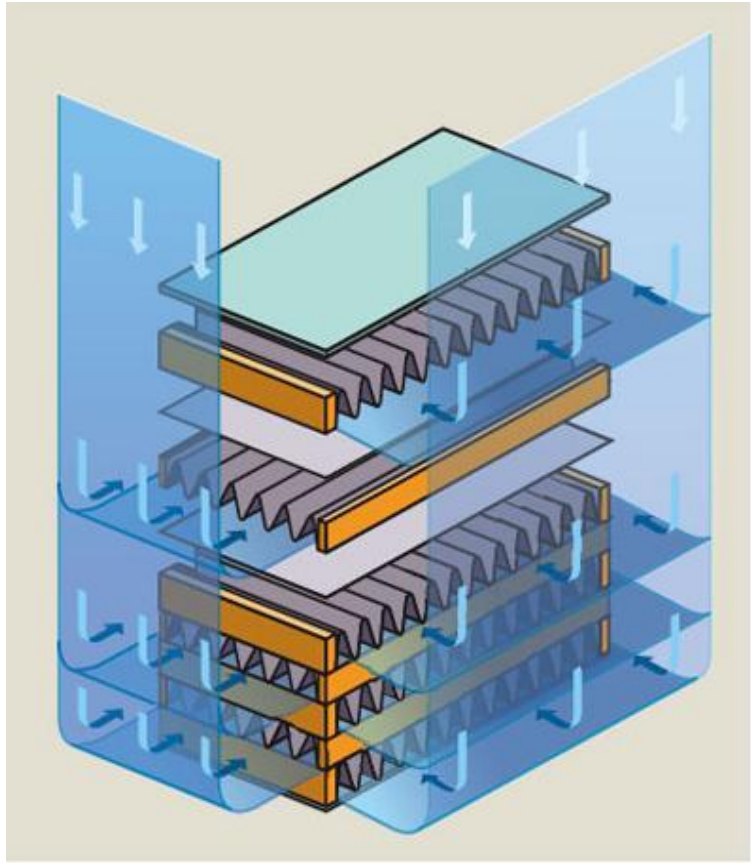




Εναλλάκτες πλακών-πτερυγίων



Δομή του εναλλάκτη





Πτώση πίεσης

$$\Delta P = \frac{4fLG^2}{2\rho D_h}$$

$$f = [0,051^5 + (2,39Re^{-0.51})^5]^{0,2}$$

$$Re = \frac{\rho u d_h}{\mu} = \frac{GD_h}{\mu}$$

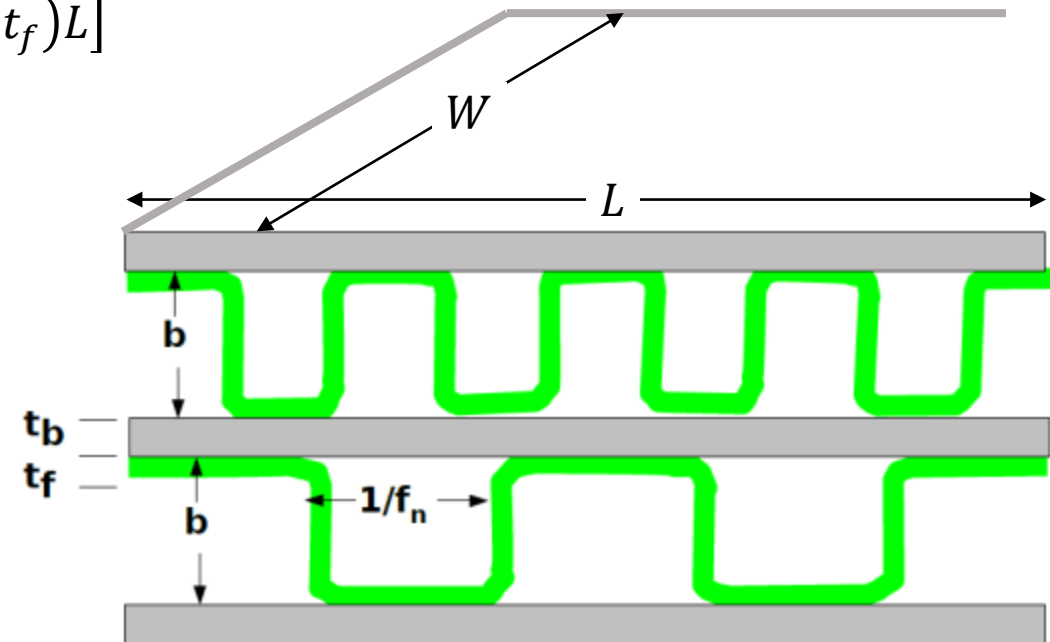
$$G = \frac{\dot{m}}{(b - t_f)(1 - f_n t_f)L}$$

Υδραυλική διάμετρος: $D_h = \frac{4(b - t_f)(L - f_n t_f L)}{[2(L - f_n t_f L) + 2f_n(b - t_f)L]}$

$$= \frac{2(b - t_f)(1 - f_n t_f)}{[1 + f_n(b - 2t_f)]}$$

Συντελεστές συναγωγής

$$Nu = \frac{hD_h}{k} = \begin{cases} 0,49Re^{0,516}Pr^{1/3}, & Re < 1500 \\ 0,151Re^{0,487}Pr^{1/3}, & 1500 < Re < 6000 \\ 0,755Re^{0,501}Pr^{1/3}, & Re > 6000 \end{cases}$$



Σύνθεση θερμικών αντιστάσεων

Εμβαδόν γυμνής επιφάνειας: $A_r = WL(1 - f_n t_f) = WLa_r$

Εμβαδόν πτερυγίων: $A_f = WLf_n(b - t_f) = WLa_f$

(a_r, a_f Εμβαδόν ανά μονάδα επιφάνειας WL)

Βαθμός απόδοσης πτερυγίων

$$\Omega_f = \frac{\tanh(ml)}{ml} \quad m = \left(\frac{2h}{kt_f}\right)^{1/2} \quad l = \frac{b}{2} - t_f$$

$$\Rightarrow \begin{aligned} Q &= h_1(A_{r1} + \Omega_{f1}A_{f1})(T_w - T_1) = \\ &h_1(WL)(a_{r1} + \Omega_{f1}a_{f1})(T_w - T_1) = \\ &h_2(WL)(a_{r2} + \Omega_{f2}a_{f2})(T_2 - T_w) \end{aligned}$$

Ολικός συντελεστής μεταφοράς θερμότητας

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{(a_{r1} + \Omega_{f1}a_{f1})h_1} + \frac{t_b + (t_{f1} + t_{f2})/2}{k_w} + \frac{1}{(a_{r2} + \Omega_{f2}a_{f2})h_2}$$

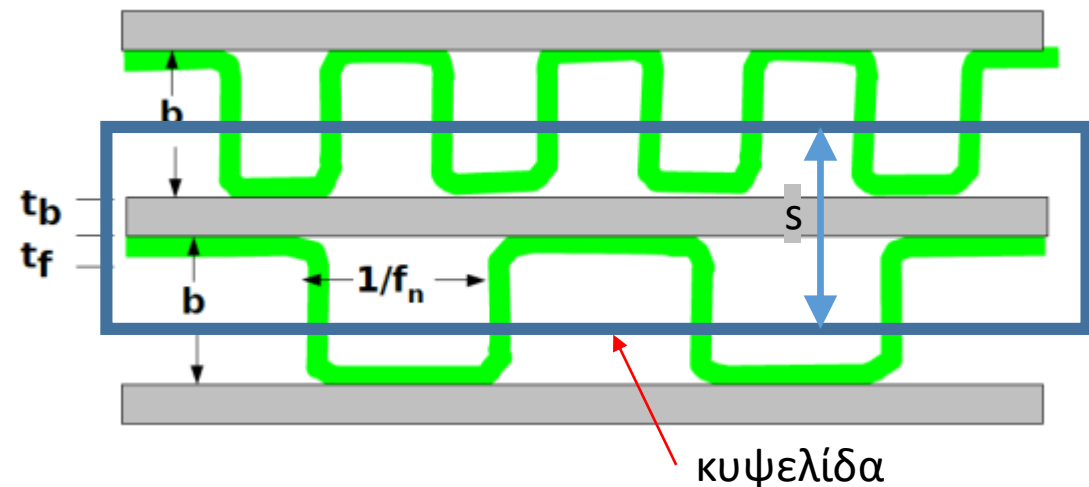
Ολική θερμορροή

Πάχος κυψελίδας: $s = (b_1 + b_2)/2 + t_p$

Αριθμός κυψελίδων: N

$$Q = NU(WL)\Delta T_m = \frac{U}{s}(WLN s)\Delta T_m = BV\Delta T_m$$

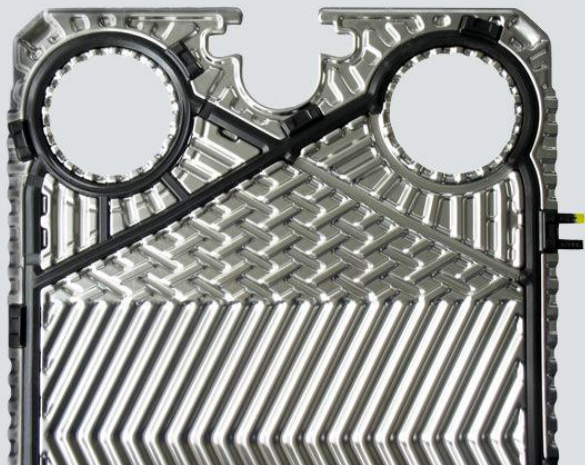
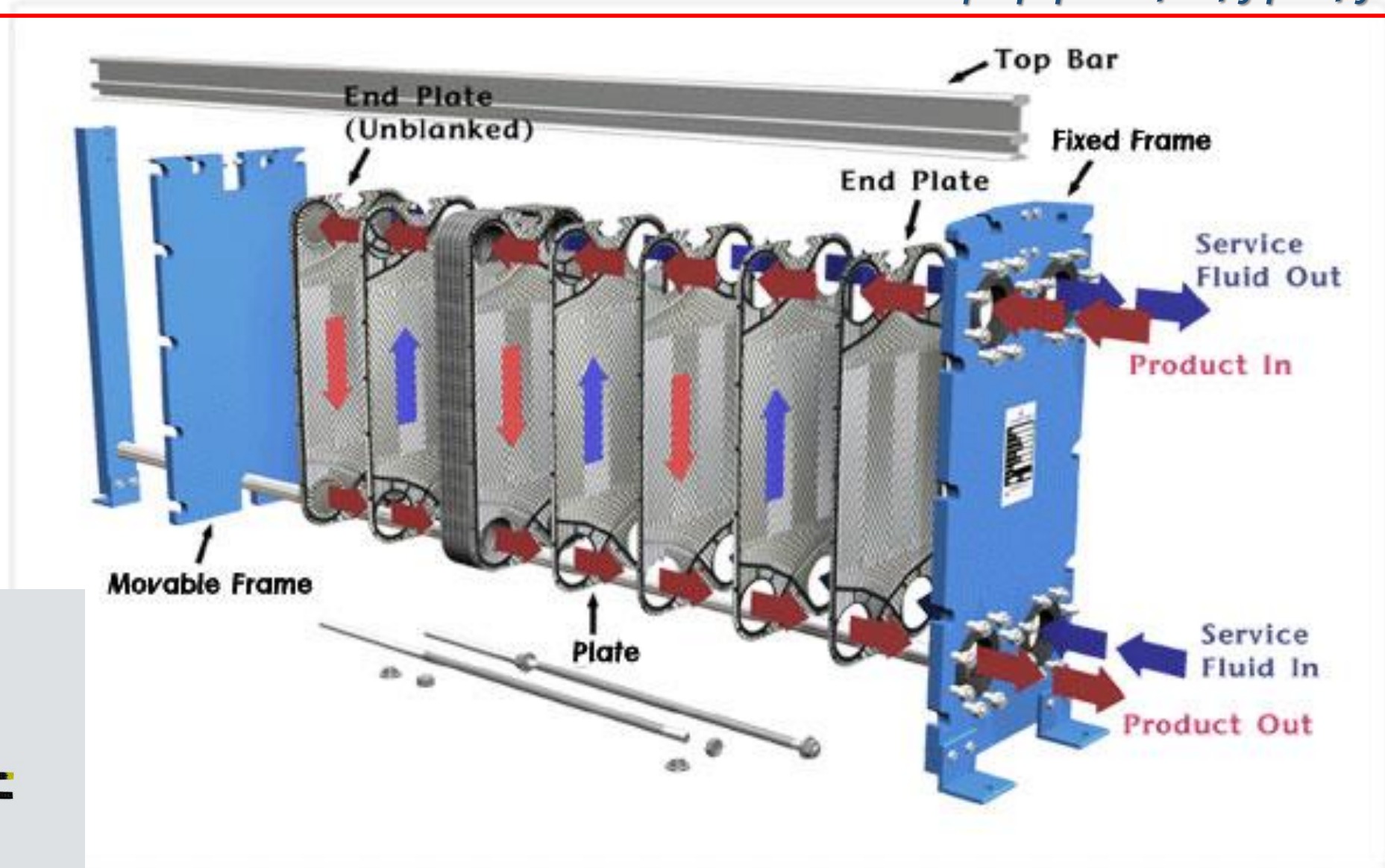
Ογκομετρικός συντελεστής μεταφοράς [=] $W/(m^3K)$





Εναλλάκτες πλακών-πλαισίου

Διαμόρφωση της ροής



Θερμο-υδραυλικός σχεδιασμός

Μαζική παροχή ανά κανάλι ροής
Για N πλάκες, (N-1)/2 κανάλια
ροής ανά ρευστό.

Απόσταση μεταξύ πλακών: b

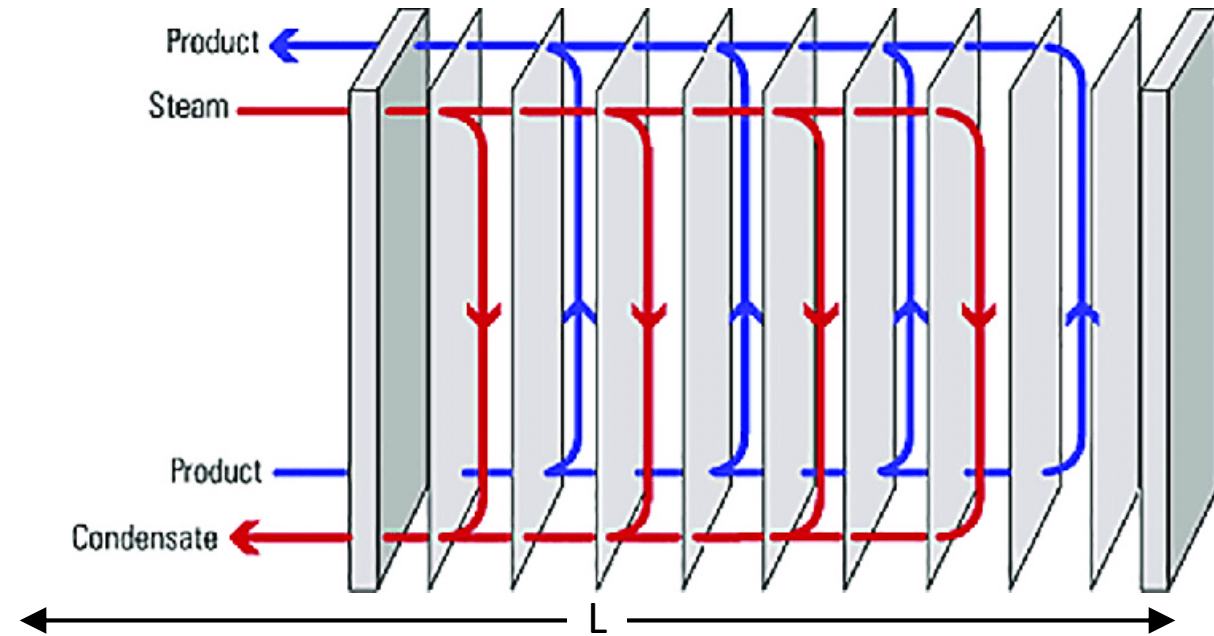
Υδραυλική διάμετρος: $D_e = 2b$

Χαρακτηριστική ταχύτητα: $u_e = \frac{m_e}{\rho W b}$

Συντελεστής συναγωγής: $\frac{hD_e}{k} = A(\beta) \left(\frac{\rho u_e D_e}{\mu} \right)^{0.64} Pr^{0.4}$

Πτώση πίεσης: $\Delta P = 4f \frac{L}{D_e} \frac{\rho u_e^2}{2}$ $f = B(\beta) \left(\frac{\rho u_e D_e}{\mu} \right)^{-0.18}$

β	A	B
30°	0.40	2.78
45°	0.56	8.90



Εκτίμηση κόστους εναλλακτών

Κόστος βάσης ($A[=]ft^2$, $C_B(2000)$: $I_B=394$)

Διπλού σωλήνα: $C_B = \exp[7,1248 + 0,16(\ln A)]$

Σταθερής κεφαλής: $C_B = \exp[11,0545 - 0,9228(\ln A) + 0,09861(\ln A)^2]$

Πλωτής κεφαλής: $C_B = \exp[11,667 - 0,8709(\ln A) + 0,09005(\ln A)^2]$

Τύπου U: $C_B = \exp[11,147 - 0,9186(\ln A) + 0,0979(\ln A)^2]$

Κόστος προμήθειας

$$C_P = F_P F_M F_L C_B (I/I_B)$$

$$F_P = 0.9803 + 0.018 \left(\frac{P}{100} \right) + 0.0017 \left(\frac{P}{100} \right)^2, P[=]psia > 100 psia$$

$$F_L = \frac{17 - 0.25L}{12}, L[=]ft < 20 ft$$

$$F_M = a + \left(\frac{A}{100} \right)^b$$

Material of construction Shell/Tube	a in Eq. (7.14)	b in Eq. (7.14)
Carbon steel/Carbon steel	0.00	0.00
Carbon steel/Brass	1.08	0.05
Carbon steel/Stainless steel	1.75	0.13
Carbon steel/Monel	2.1	0.13
Carbon steel/Titanium	5.2	0.16
Carbon steel/Cr-Mo steel	1.55	0.05
Cr-Mo steel/Cr-Mo steel	1.70	0.07
Stainless steel/Stainless steel	2.70	0.07
Monel/Monel	3.3	0.08
Titanium/Titanium	9.6	0.06

CHEMICAL ENGINEERING PLANT COST INDEX (CEPCI)

(1957–59 = 100)	June '20 Prelim.	May '20 Final	June '19 Final	Annual Index:
CEIndex _____	591.1	593.5	609.5	2012 = 584.6
Equipment _____	715.7	720.3	743.2	2013 = 567.3
Heat exchangers & tanks _____	610.6	616.1	659.7	2014 = 576.1
Process machinery _____	719.0	721.1	727.0	2015 = 556.8
Pipe, valves & fittings _____	934.2	942.2	955.7	2016 = 541.7
Process instruments _____	411.8	409.6	416.4	2017 = 567.5
Pumps & compressors _____	1084.1	1086.3	1068.5	2018 = 603.1
Electrical equipment _____	561.3	561.1	557.7	2019 = 607.5
Structural supports & misc. _____	764.7	774.0	810.9	
Construction labor _____	335.4	333.8	335.4	
Buildings _____	591.3	587.4	595.8	
Engineering & supervision _____	313.0	312.6	313.8	

Κόστος εγκατεστημένης συσκευής

	Cost (\$)	Total Costs (\$)	Fraction of f.o.b. Purchase Cost (C_p)
Direct module expenses			
Equipment purchase price, f.o.b., C_p		10,000	1.00 C_p
Field materials used for installation			
Piping	4,560		
Concrete	510		
Steel	310		
Instruments and controllers	1,020		
Electrical	200		
Insulation	490		
Paint	50		
Total of direct field materials, C_M		7,140	$C_M = 0.714 C_p$
Direct field labor for installation			
Material erection	5,540		
Equipment setting	760		
Total of direct field labor, C_L		6,300	$C_L = 0.63 C_p$
Indirect module expenses			
Freight, insurance, taxes, C_{FIT}	800		$C_{FIT} = 0.08 C_p$
Construction overhead, C_O	5,710		$C_O = 0.571 C_p$
Contractor engineering expenses, C_E	2,960		$C_E = 0.296 C_p$
Total indirect expenses, C_{IE}		9,470	$C_{IE} = 0.947 C_p$
Bare-module cost, C_{BM}		32,910	$C_{BM} = 3.291 C_p$
			$F_{BM} = 3.291$

$$C_{BM} = F_{BM} C_p$$

Εναλλάκτης διπλού σωλήνα

$$F_{BM} = 1,8$$

Εναλλάκτης αυλών-κελύφους

$$F_{BM} = 3,17$$

Εναλλάκτης αυλών-πτερυγίων

$$F_{BM} = 2,17$$