

ΕΘ ΕΝΑΛΛΑΚΤΕΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ

Θοδωρής Καραπάντσιος

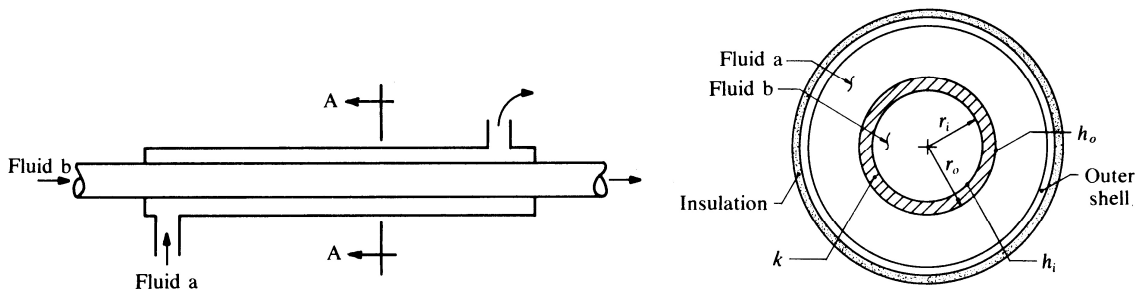
ΕΘ.1 Εισαγωγή

Σε πολλές εφαρμογές απαιτείται η μετάδοση θερμότητας μεταξύ δυο ρευστών. Οι διεργασίες αυτές λαμβάνουν χώρα σε συσκευές που καλούνται *εναλλάκτες θερμότητας* (heat exchangers). Ως εναλλάκτης θερμότητας ορίζεται μια συσκευή που διευκολύνει την μετάδοση του θερμικού φορτίου από ένα ρευστό σε ένα άλλο και συναντάται σε συστήματα θέρμανσης, ψύξης και κλιματισμού, σε κύκλους παραγωγής ισχύος, σε συσκευές ανάκτησης θερμότητας, σε χημικές διεργασίες και αλλού.

Στους πιο απλούς εναλλάκτες το θερμό και το ψυχρό ρευστό αναμιγνύονται απευθείας. Πιο συνηθισμένοι ωστόσο είναι οι εναλλάκτες στους οποίους τα δυο ρευστά δεν έρχονται σε επαφή εξαιτίας της ύπαρξης κάποιου παρεμβαλλόμενου τοιχώματος. Αυτός ο τύπος εναλλάκτη μπορεί να φέρει είτε ένα απλό επίπεδο τοίχωμα, ώστε να επιτυγχάνεται η απομόνωση των δυο ρευστών, είτε πιο πολύπλοκες γεωμετρίες με πολλαπλές διαδρομές, όπως *περύγια* (fins) και *ανακλαστήρες* (baffles). Σε αυτήν την περίπτωση για την περιγραφή της μεταφοράς ενέργειας χρησιμοποιούνται οι αρχές μετάδοσης της θερμότητας με αγωγή, συναγωγή και σπαινότωση με ακτινοβολία. Πολλοί παράγοντες υπεισέρχονται στον σχεδιασμό των εναλλακτών, όπως η θερμική ανάλυση, το μέγεθος, το βάρος, η κατασκευαστική αντοχή, η πτώση πίεσης και το κόστος. Το συγκεκριμένο κεφάλαιο αναφέρεται μόνο στην θερμική ανάλυση.

ΕΘ.2 Είδη Εναλλακτών Θερμότητας

Οι εναλλάκτες θερμότητας μπορούν να ταξινομηθούν με βάση την μορφή της ροής των ρευστών ή με βάση τις κατασκευαστικές ιδιαιτερότητες τους. Τυπικοί εναλλάκτες θερμότητας είναι οι *πλακοειδείς* (plate & frame), *αυλών-κελύφους* (shell & tube) και οι εναλλάκτες *σταυρωτής ροής* (crossflow). Την πιο απλή μορφή εναλλάκτη αυλών-κελύφους αποτελεί ο απεικονιζόμενος στο σχήμα ΕΘ-1 εναλλάκτης διπλού σωλήνα.

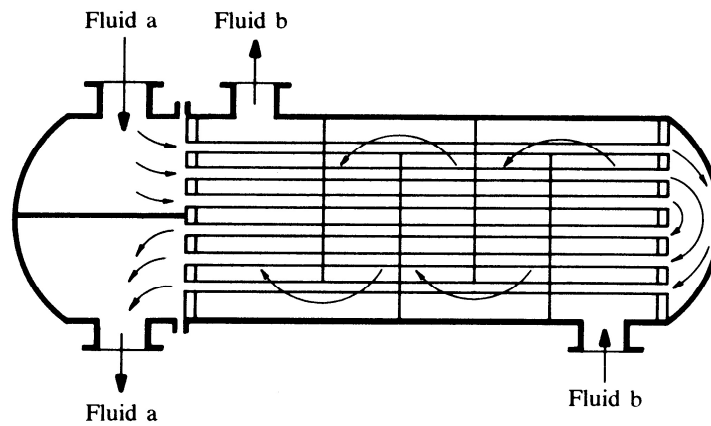


Σχήμα ΕΘ-1. Πλάγια όψη και τομή ενός εναλλάκτη διπλού σωλήνα

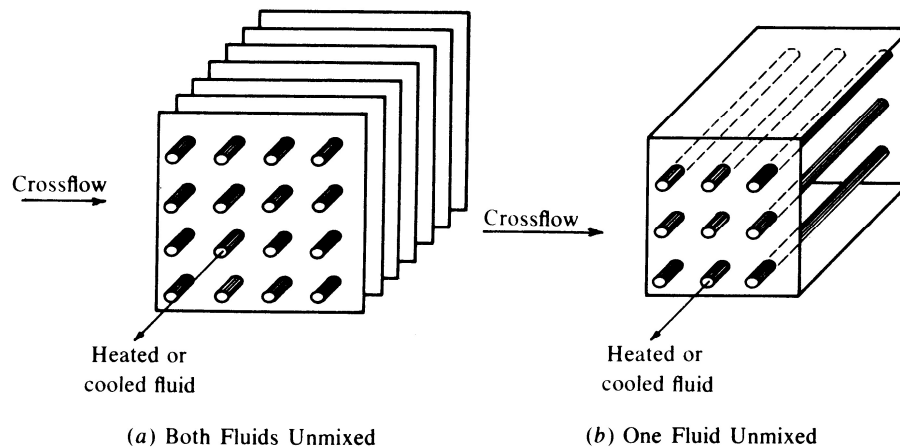
Αν και τα δυο ρευστά κινούνται προς την ίδια κατεύθυνση, έχουμε παράλληλη ροή αυτών, δηλαδή *ομορροή* (parallel-flow). Αν κινούνται σε αντίθετες κατευθύνσεις η πραγματοποιούμενη διεργασία λαμβάνει τον χαρακτηρισμό της *αντιρροής* (counter-flow).

Στο σχήμα ΕΘ-2 φαίνεται ένας εναλλάκτης δέσμης σωλήνων με ανακλαστήρες, διπλής διαδρομής, όπου έχουμε συνδυασμό ομορροής, αντιρροής και σταυρωτής ροής. Σε εναλλάκτες θερμότητας σταυρωτής ροής τα ρευστά κινούνται κάθετα το ένα ως προς το άλλο, όπως γίνεται αντιληπτό από την παρατήρηση του σχήματος ΕΘ-3. Αν το ρευστό μπορεί να κινηθεί ελεύθερα καθώς διαρρέει τον εναλλάκτη, τότε υπάρχει *ανάμιξη* (mixing) του ρευστού. Σταυρωτή ροή

μπορούμε να έχουμε με την χρήση ή μη πτερυγίων. Για να γίνουν τα παραπάνω περισσότερο κατανοητά, κρίνεται σκόπιμη η παράθεση ενός συγκεκριμένου παραδείγματος, εξ ου και η εκ νέου αναφορά στο σχήμα ΕΘ-3. Από το σχήμα ΕΘ-3α απορρέει ότι δεν πραγματοποιείται ανάμιξη, επειδή τα πτερύγια εμποδίζουν την κίνηση του ρευστού στην διεύθυνση y , που είναι κάθετη στην διεύθυνση x της κύριας ροής. Αντίθετα στο σχήμα ΕΘ-3β λαμβάνει χώρα ανάμιξη στο ρευστό που ρέει εκτός των σωλήνων.



Σχήμα ΕΘ-2. Εναλλάκτης δέσμης σωλήνων με ανακλαστήρες (αυλών-κελύφους)



Σχήμα ΕΘ-3. Εναλλάκτες σταυρωτής ροής: (α) με πτερύγια και χωρίς ανάμιξη, (β) χωρίς πτερύγια και με ανάμιξη του ρευστού εκτός σωλήνα

ΕΘ.3 Υπολογισμοί Μετάδοσης Θερμότητας

Ο κύριος στόχος στην θερμική ανάλυση των εναλλακτών θερμότητας είναι ο υπολογισμός της επιφάνειας που χρειάζεται για την μετάδοση θερμότητας με δεδομένο ρυθμό και για δεδομένες θερμοκρασίες και παροχές ρευστών. Αυτό επιτυγχάνεται με την χρήση του *ολικού συντελεστή μετάδοσης θερμότητας* (overall heat-transfer coefficient) U , που βρίσκεται στην θεμελιώδη σχέση για τον υπολογισμό του ρυθμού μετάδοσης θερμότητας, q ,

$$q = UA\Delta T \quad (\text{ΕΘ.1})$$

όπου $\overline{\Delta T}$ είναι η μέση θερμοκρασιακή διαφορά για ολόκληρο τον εναλλάκτη και A : η επιφάνεια που είναι κάθετη στην κατεύθυνση της θερμορροής.

ΕΘ.3.1 ΟΛΙΚΟΣ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ

Ο ολικός συντελεστής μετάδοσης θερμότητας U ισούται με το αντίστροφο του αθροίσματος των θερμικών αντιστάσεων. Στις πλέον συνήθεις περιπτώσεις που συναντώνται ισχύουν οι ακόλουθες σχέσεις, οι οποίες συμπεριλαμβάνουν την εξίσωση για επίπεδο τοίχωμα (ΕΘ.2) και τις εξισώσεις για κυλινδρικό τοίχωμα (ΕΘ.3) και (ΕΘ.4),

$$U = \frac{1}{1/h_o + L/k + 1/h_i} \quad (\text{ΕΘ.2})$$

$$U_o = \frac{1}{r_o/r_i h_i + [r_o \ln(r_o/r_i)]/k + 1/h_o} \quad (\text{ΕΘ.3})$$

$$U_i = \frac{1}{1/h_i + [r_i \ln(r_o/r_i)]/k + r_i/r_o h_o} \quad (\text{ΕΘ.4})$$

όπου r , L , k και h : η ακτίνα του σωλήνα, το πάχος του τοιχώματος, η θερμική αγωγιμότητα του τοιχώματος και ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας (υμενίου) αντίστοιχα. Οι δείκτες i και o αντιπροσωπεύουν τις εσωτερικές και εξωτερικές επιφάνειες του τοιχώματος αντίστοιχως. Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι η επιφάνεια της συναγωγής δεν ταυτίζεται για τα δυο ρευστά στην περίπτωση του κυλινδρικού τοιχώματος, γι' αυτό ο ολικός συντελεστής μετάδοσης θερμότητας και η επιφάνεια μετάδοσης πρέπει να είναι συμβατοί, π.χ. $q = U_o A_o \overline{\Delta T} = U_i A_i \overline{\Delta T}$.

Για τον προκαταρκτικό σχεδιασμό των εναλλακτών θερμότητας είναι προτιμότερη η θεώρηση προσεγγιστικής τιμής του ολικού συντελεστή μετάδοσης θερμότητας από σχετικούς πίνακες. Ο πίνακας ΕΘ-1 δίνει προσεγγιστικές τιμές του U για κάποια κοινά ρευστά. Το μεγάλο εύρος τιμών του πίνακα προήλθε από την εφαρμογή διαφορετικών συνθηκών ροής (που επηρεάζουν τους συντελεστές υμενίου, h), καθώς και από την χρήση διαφόρων υλικών στους εναλλάκτες (με διαφορετικές θερμοαγωγιμότητες, k) και ποικίλων γεωμετρικών διατάξεων.

Στις περισσότερες πρακτικές εφαρμογές η θερμική αντίσταση του τοιχώματος μπορεί να αγνοηθεί, ενώ συχνά υπάρχει σημαντική διαφορά στο μέγεθος των συντελεστών συναγωγής, οπότε ο ολικός συντελεστής μετάδοσης θερμότητας προσδιορίζεται κατά κύριο λόγο από τον χαμηλότερο συντελεστή συναγωγής.

Για την βελτιστοποίηση της απόδοσης του εναλλάκτη πρέπει να μεριμνούμε για την πλευρά του ρευστού με τον χαμηλότερο συντελεστή συναγωγής. Για παράδειγμα, αν από την μια πλευρά εκτυλίσσονται φαινόμενα συμπύκνωσης ή βρασμού και από την άλλη θέρμανση ή ψύξη ενός αερίου, η κρίσιμη πλευρά είναι αυτή του αερίου. Στην πλευρά αυτή είναι πιθανώς σκόπιμη η πρόβλεψη της χρήσης πτερυγίων για την εντατικοποίηση της μετάδοσης θερμότητας.

ΕΘ.3.2 ΜΕΣΗ ΛΟΓΑΡΙΘΜΙΚΗ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΚΗ ΔΙΑΦΟΡΑ

Πριν γίνουν οι υπολογισμοί της μετάδοσης θερμότητας είναι απαραίτητο να ορισθεί ο όρος $\overline{\Delta T}$ στην εξίσωση (ΕΘ.1). Θεωρούμε έναν εναλλάκτη πλακών ομορροής, το θερμοκρασιακό προφίλ του οποίου παρατίθεται στο σχήμα ΕΘ-4. Κάνουμε τις εξής υποθέσεις:

1. Ο παράγοντας U είναι σταθερός σε ολόκληρο τον εναλλάκτη.
2. Το σύστημα παρουσιάζει αδιαβατική συμπεριφορά. Η μετάδοση θερμότητας γίνεται μόνο μεταξύ των δυο ρευστών (τέλεια μόνωση των εξωτερικών τοιχωμάτων του εναλλάκτη).