

Τ.Ε.Ι. ΠΑΤΡΑΣ
ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΑΣ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
«ΘΕΩΡΗΤΙΚΗ ΚΑΙ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΕΚΤΙΜΗΣΗ
ΕΝΑΛΛΑΚΤΩΝ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ»



ΜΠΙΝΙΑΡΗΣ ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ
ΦΙΝΕΤΗΣ ΚΑΝΕΛΛΟΣ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΤΣΑΒΟΣ ΑΛΕΞΑΝΔΟΣ
ΚΑΜΒΥΣΑΣ ΓΡΗΓΟΡΙΟΣ

ΠΑΤΡΑ, 2012

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Εναλλάκτες θερμότητας είναι οι συσκευές στις οποίες έχουμε μεταφορά ενέργειας, με τη μορφή θερμότητας, μεταξύ δύο ρευστών που βρίσκονται σε διαφορετικές θερμοκρασίες και διαχωρίζονται συνήθως από κάποιο τοίχωμα.

Οι εναλλάκτες θερμότητας χωρίζονται σε κατηγορίες ανάλογα με τον τρόπο μεταφοράς θερμότητας, τον τύπο της ροής και την κατασκευαστική τους διάταξη.

Τα βασικά προβλήματα στους εναλλάκτες θερμότητας είναι είτε ο υπολογισμός της απαραίτητης επιφάνειας συναλλαγής θερμότητας έτσι ώστε να έχουμε επιθυμητές θερμοκρασίες εξόδου των ρευστών (*σχεδιασμός εναλλάκτη*) είτε ο υπολογισμός της θερμοροής και των θερμοκρασιών εξόδου των ρευστών σε δοσμένο εναλλάκτη με καθορισμένες ροές μάζας και θερμοκρασίες εισόδου των ρευστών (*λειτουργία εναλλάκτη*).

Πρωταρχικά, επιλέγουμε να ευχαριστήσουμε τους καθηγητές του τμήματος μας κύριο Καμβύσα Γρηγόριο και κύριο Καλογήρου Ιωάννη για την πολύτιμη συνεισφορά και υποστήριξη τους.

Επίσης θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε τον καθηγητή κύριο Τσάβο Αλέξανδρο με τη συνεισφορά του οποίου πραγματοποιήθηκε το ερευνητικό-πειραματικό μέρος την πτυχιακής μας εργασίας στο Πανεπιστήμιο Πατρών.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στο πρώτο κεφάλαιο της παρούσας πτυχιακής εργασίας παρουσιάζεται η θερμοδυναμική της καύσης και μεταφορά θερμότητας σε διεργασίες ενώ γίνεται αναφορά στη θερμοκρασία τη μεταφορά και τις θεωρίες της.

Στο δεύτερο κεφάλαιο γίνεται γενική εισαγωγή στους εναλλάκτες θερμότητας και διαχωρίζονται οι βασικοί και βιομηχανικοί τύποι εναλλακτών.

Στο τρίτο κεφάλαιο γίνεται η ειδική θεώρηση των εναλλακτών θερμότητας. Παρουσιάζονται τα είδη των εναλλακτών κάθε τύπου ροής που απορρέουν από τη μέθοδο μέση λογαριθμική θερμοκρασιακή διαφορά.

Στο τέταρτο και τελευταίο κεφάλαιο παρουσιάζεται η πειραματική διάταξη της ερευνητικής προσέγγισης των εναλλακτών θερμότητας όπως αυτή πραγματοποιήθηκε στο πανεπιστήμιο Πατρών.

Τέλος παρατίθενται συμπεράσματα καθώς και η εκτενής βιβλιογραφία και οι διαδικτυακές πηγές που χρησιμοποιήθηκαν σαν βάση βιβλιογραφικής ανασκόπησης κατά την εκπόνηση της παρούσας πτυχιακής εργασίας.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΡΟΛΟΓΟΣ	iv
ΠΕΡΙΛΗΨΗ	v
ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	1
ΕΙΔΗ ΕΝΑΛΛΑΚΤΩΝ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ	1
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1.....	4
ΜΕΤΑΔΟΣΗ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ.....	4
1.2 ΘΕΩΡΙΕΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ.....	4
1.3 ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΙ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ.....	5
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2.....	13
ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΟΥΣ ΕΝΑΛΛΑΚΤΕΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ - ΓΕΝΙΚΑ	13
2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	13
2.2 ΒΑΣΙΚΟΙ ΤΥΠΟΙ ΕΝΑΛΛΑΚΤΩΝ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ	14
2.3 ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΟΙ ΕΝΑΛΛΑΚΤΕΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ.....	18
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3.....	21
ΕΝΑΛΛΑΚΤΕΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ (HEAT EXCHANGERS).....	21
3.1 ΕΝΑΛΛΑΚΤΕΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ	21
3.2 ΕΝΑΛΛΑΚΤΕΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ ΜΕ ΔΙΑΧΩΡΙΣΤΙΚΟ ΤΟΙΧΩΜΑ ΑΝΑΜΕΣΑ ΣΤΑ ΔΥΟ ΡΕΥΣΤΑ.....	26
3.3. ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΕΝΑΛΛΑΚΤΩΝ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ.....	28
3.3.1 ΜΕΘΟΔΟΣ ΜΕΣΗΣ ΛΟΓΑΡΙΘΜΙΚΗΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΚΗΣ ΔΙΑΦΟΡΑΣ (Μ.Λ.Θ.Δ).....	28
3.3.1.1 ΑΠΛΟΣ ΕΝΑΛΛΑΚΤΗΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ ΠΑΡΑΛΛΗΛΗΣ ΡΟΗΣ.....	28
3.3.1.2 ΑΠΛΟΣ ΕΝΑΛΛΑΚΤΗΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ ΚΑΤΑ ΑΝΤΙΡΡΟΗ	32
3.4 ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ ΡΕΥΣΤΩΝ	33
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4.....	35
ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΕΦΑΡΜΟΓΗ.....	35
4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	35
4.2 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ	36
4.3 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ	42
4.3.1 ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΠΑΡΑΛΛΗΛΗΣ ΡΟΗΣ.....	42
4.3.1.1 ΣΚΟΠΟΣ.....	42
4.3.1.2 ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ.....	43

4.3.1.3 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΙ.....	43
4.3.2 ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΑΝΤΙΠΑΡΑΛΛΗΛΗΣ ΡΟΗΣ.....	50
4.3.2.1 ΣΚΟΠΟΣ.....	50
4.3.2.2 ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ.....	50
4.3.2.3 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΙ.....	51
4.3.3 ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΕΣ ΛΕΠΤΟΥ ΣΤΡΩΜΑΤΟΣ ΚΑΙ ΟΛΙΚΩΝ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΩΝ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ.....	56
4.3.3.1 ΣΚΟΠΟΣ.....	56
4.3.3.2 ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ.....	56
4.3.3.3 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΙ.....	57
4.3.4 ΟΛΙΚΗ ΜΟΝΑΔΙΑΙΑ ΘΕΡΜΙΚΗ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ.....	65
4.3.4.1 ΣΚΟΠΟΣ.....	65
4.3.4.2 ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ.....	65
4.3.4.3 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΙ.....	65
4.3.5 ΡΥΘΜΟΣ ΡΟΗΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ ΚΑΙ ΑΠΟΔΟΣΗΣ.....	71
4.3.5.1 ΣΚΟΠΟΣ.....	71
4.3.5.2 ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ.....	71
4.3.5.3 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΙ.....	71
4.3.6 ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΚΕΣ ΑΠΟΔΟΤΙΚΟΤΗΤΕΣ ΚΑΙ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΩΝ.....	79
4.3.6.1 ΣΚΟΠΟΣ.....	79
4.3.6.2 ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ.....	80
4.3.6.3 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΙ.....	80
ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	85
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	87
ΔΙΑΔΙΚΤΥΑΚΕΣ ΠΗΓΕΣ.....	88

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Σε πολλές εφαρμογές απαιτείται η μετάδοση θερμότητας μεταξύ δυο ρευστών. Οι διεργασίες αυτές λαμβάνουν χώρα σε συσκευές που καλούνται εναλλάκτες θερμότητας (heat exchangers).

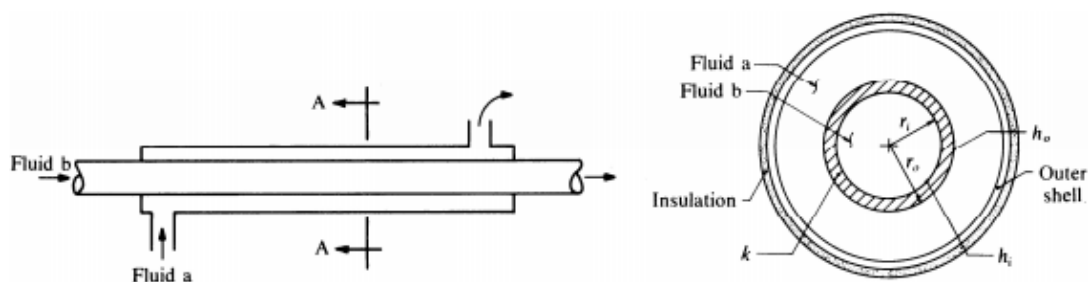
Ως εναλλάκτης θερμότητας ορίζεται μια συσκευή που διευκολύνει την μετάδοση του θερμικού φορτίου από ένα ρευστό σε ένα άλλο και συναντάται σε συστήματα θέρμανσης, ψύξης και κλιματισμού, σε κύκλους παραγωγής ισχύος, σε συσκευές ανάκτησης θερμότητας, σε χημικές διεργασίες και αλλού.

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 πτερύγια (fins) και ανακλαστήρες (baffles). Σε αυτήν την περίπτωση για την περιγραφή της μεταφοράς ενέργειας χρησιμοποιούνται οι αρχές μετάδοσης της θερμότητας με αγωγή, συναγωγή και σπανιότερα 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.

ΕΙΔΗ ΕΝΑΛΛΑΚΤΩΝ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ

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 1 εναλλάκτης διπλού σωλήνα.

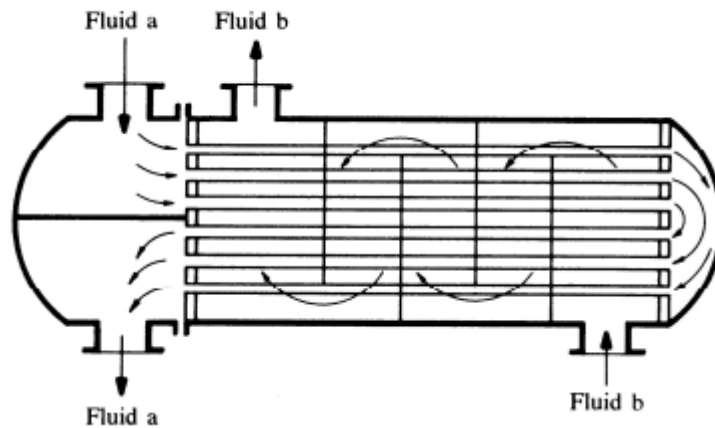


Σχήμα 1 : Πλάγια όψη και τομή ενός εναλλάκτη διπλού σωλήνα [7]

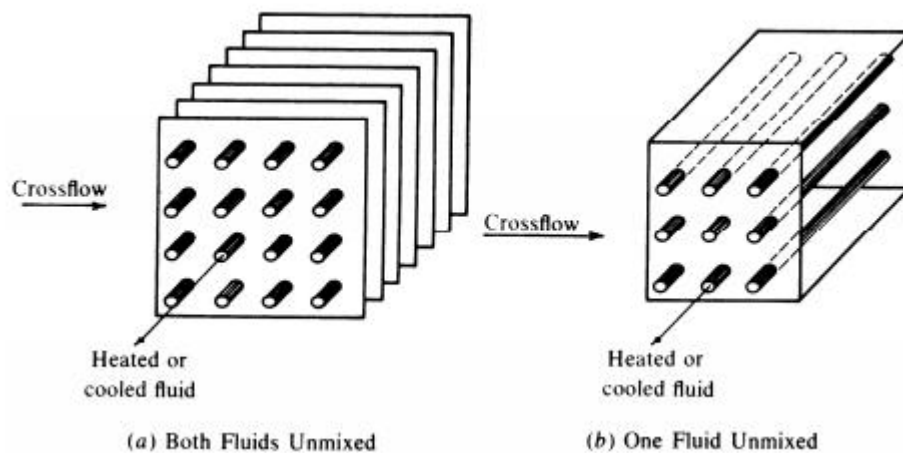
Αν και τα δυο ρευστά κινούνται προς την ίδια κατεύθυνση, έχουμε παράλληλη ροή αυτών, δηλαδή ομοροή (parallel-flow). Αν κινούνται σε αντίθετες κατευθύνσεις η πραγματοποιούμενη διεργασία λαμβάνει τον χαρακτηρισμό της αντιροής (counter-flow).

Στο σχήμα 2 φαίνεται ένας εναλλάκτης δέσμης σωλήνων με ανακλαστήρες, διπλής διαδρομής, όπου έχουμε συνδυασμό ομοροής, αντιροής 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 3. Αν το ρευστό μπορεί να κινηθεί ελεύθερα καθώς διαρρέει τον εναλλάκτη, τότε υπάρχει ανάμιξη (mixing) του ρευστού. Σταυρωτή ροή 2 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 -3. Από το

σχήμα 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 3β λαμβάνει χώρα ανάμιξη στο ρευστό που ρέει εκτός των σωλήνων.



Σχήμα 2 : Εναλλάκτης δέσμης σωλήνων με ανακλαστήρες (αυλών-κελύφους) [7]



Σχήμα 3: Εναλλάκτες σταυρωτής ροής: (α) με πτερύγια και χωρίς ανάμιξη, (β) χωρίς πτερύγια και με ανάμιξη του ρευστού εκτός σωλήνα [7]

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΜΕΤΑΔΟΣΗ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ

1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η μετάδοση θερμότητας είναι η επιστήμη η οποία ασχολείται με τους ρυθμούς ανταλλαγής θερμότητας μεταξύ θερμών και ψυχρών σωμάτων, που χαρακτηρίζονται αντίστοιχα ως πηγή και δέκτης. Όταν ένα χιλιόγραμμο νερού ατμοποιείται ή συμπυκνώνεται, η αλλαγή της ενέργειας σε κάθε μια διαδικασία είναι η ίδια. Οι ρυθμοί με τους οποίους μπορεί να εξελιχθεί μια τέτοια διαδικασία με μια ανεξάρτητη πηγή ή δέκτη, είναι ωστόσο πολύ διαφορετικοί. Η ατμοποίηση είναι γενικά ένα φαινόμενο πολύ πιο γρήγορο από τη συμπύκνωση.

1.2 ΘΕΩΡΙΕΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ

Η μελέτη μεταφοράς θερμότητας θα μπορούσε να βελτιωθεί πολύ μετά από μια βαθιά κατανόηση της φύσης της θερμότητας. Οι θεωρίες οι οποίες ισχύουν δεν καλύπτουν όλα τα φαινόμενα μεταφοράς. Νόμοι οι οποίοι μπορεί να εφαρμόζονται στην μεταφορά μάζας μπορεί να μην ισχύουν στην μοριακή ή ατομική μεταφορά, και εκείνοι οι νόμοι που είναι εφαρμόσιμοι σε χαμηλές θερμοκρασίες μπορεί να μην εφαρμόζονται σε υψηλές θερμοκρασίες. Οι φάσεις μιας απλής ουσίας, στερεής, υγρής ή αέριας είναι συνδεδεμένες με το θερμικό τους περιεχόμενο. Στην στερεή φάση τα μόρια ή τα άτομα είναι πολύ κοντά εξασφαλίζοντας στερεότητα. Στην υγρή φάση ικανή θερμική ενέργεια είναι παρούσα για να μεγαλώσει την απόσταση των γειτονικών μορίων οπότε η στερεότητα χάνεται. Στην αέρια φάση η παρουσία πρόσθετης θερμικής ενέργειας έχουν καταλήξει σε σχετικά πλήρη διαχωρισμό των

ατόμων και μορίων έτσι ώστε αυτά να μπορούν να περιπλανηθούν οπουδήποτε σε ένα περιορισμένο χώρο. Είναι γνωστό ότι οποτεδήποτε συμβαίνει αλλαγή φάσης έξω από την κρίσιμη περιοχή, μια μεγάλη ποσότητα ενέργειας ανταλλάσσεται κατά την διάρκεια της μετάβασης.

Για την ίδια ουσία στις διαφορετικές της φάσεις οι διαφορετικές θερμικές ιδιότητες έχουν διαφορετικές τάξεις μεγέθους. Ως παράδειγμα, η ειδική θερμότητα ανά μονάδα μάζας είναι πολύ χαμηλή για στερεά, υψηλή για υγρά, και συνήθως ενδιάμεση για τα αέρια. Ομοίως για κάθε σώμα που απορροφά ή χάνει ενέργεια, πρέπει να ληφθεί υπ' όψη εάν αυτή η αλλαγή έχει σχέση με αισθητή ή λανθάνουσα θερμότητα ή και με τα δύο. Επί πλέον, είναι επίσης γνωστό ότι μια θερμή πηγή είναι ικανή εξ αιτίας της υποατομικής της διέγερσης να εκπέμπει ενέργεια χωρίς κάποια άμεση επαφή με τον δέκτη και αυτή η διαδικασία είναι γνωστή ως ακτινοβολία.

1.3 ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΙ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ

Υπάρχουν τρεις διακεκριμένοι τρόποι με τους οποίους η θερμότητα μπορεί να περάσει από μια πηγή σε ένα δέκτη, αν και οι περισσότερες μηχανικές εφαρμογές είναι συνδυασμοί των δύο ή τριών. Αυτοί είναι: *η αγωγή, η συναγωγή και η ακτινοβολία.*

Αγωγή. Αγωγή είναι η μεταφορά θερμότητας δια μέσου στερεάς ύλης όπως ένα σταθερό τοίχωμα. Η κατεύθυνση της ροής θερμότητας θα είναι σε ορθή γωνία ως προς το τοίχωμα εάν οι επιφάνειες του τοιχώματος είναι ισόθερμες και το σώμα ισότροπο και ομογενές. Ας υποθέσουμε ότι μια πηγή θερμότητας υπάρχει στην αριστερή επιφάνεια του τοιχώματος και ένας δέκτης θερμότητας υπάρχει στη δεξιά επιφάνεια. Η ροή θερμότητας τότε είναι ανάλογη προς την έκταση της επιφάνειας του τοιχώματος A και την μεταβολή της θερμοκρασίας δια μέσου του

τοιχώματος. Εάν θ είναι η θερμοκρασία σε κάποιο σημείο του τοιχώματος και x είναι το πάχος του τοιχώματος στην κατεύθυνση της ροής της θερμότητας η ποσότητα της ροής της θερμότητας δίνεται από την σχέση (νόμος Fourier):

$$Q = k A(- d\theta/dx) \quad \text{kcal/hr}$$

Ο όρος $- d\theta/dx$ ονομάζεται *κλίση της θερμοκρασίας* και έχει αρνητικό σημείο εάν η θερμοκρασία έχει υποτεθεί υψηλότερη στην επιφάνεια του τοιχώματος με $x = 0$ και μικρότερη στην επιφάνεια με $x = X$. Με άλλα λόγια η στιγμιαία ποσότητα μεταφοράς θερμότητας είναι ανάλογη προς την επιφάνεια και την διαφορά θερμοκρασίας $d\theta$, η οποία οδηγεί την θερμότητα δια μέσου του τοιχώματος πάχους dx . Η σταθερά αναλογίας k είναι χαρακτηριστική στην μεταφορά θερμότητας με αγωγή και είναι γνωστή ως *θερμική αγωγιμότητα*. Υπολογίζεται πειραματικά και ορίζεται βασικά με την εξίσωση. Οι θερμικές αγωγιμότητες των στερεών έχουν τιμές που κυμαίνονται σε ευρύτατα όρια εξαρτώμενες από το εάν το στερεό είναι σχετικά καλός αγωγός της θερμότητας όπως τα μέταλλα ή κακός αγωγός όπως ο αμίαντος. Τα τελευταία χρησιμοποιούνται ως *μονωτικά*. Αν και η αγωγή θερμότητας συνδέεται συνήθως με την μεταφορά θερμότητας στα στερεά, είναι επίσης εφαρμόσιμη με περιορισμούς στα αέρια και τα υγρά.

Σε σταθερή κατάσταση $Q = \text{σταθ.}$ και γράφεται:

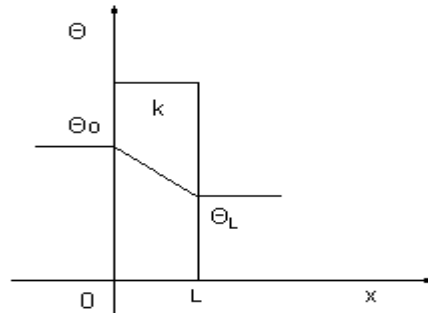
$$d\theta = -Q dx / (k A) \quad \text{ή} \quad \theta = - Q x / (k A) + C$$

$$1^{\text{η}} \text{ οριακή συνθήκη : } x = 0, \quad \theta = \theta_0.$$

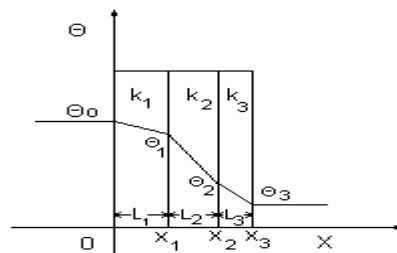
$$2^{\text{η}} \text{ οριακή συνθήκη: } x = L, \quad \theta = \theta_L.$$

Από (3.2) προκύπτει $C = \theta_0$ και τελικά $\theta = -Q x / (k A) + \theta_0$ και $\theta_L = -Q L / (k A) + \theta_0$ ή $LQ / k A = \theta_0 - \theta_L$ ή $(\theta_0 - \theta_L) = Q / (k A)$.

Οδηγούσα δύναμη $\theta_0 - \theta_L$



Σχήμα 1.2 Κατανομή θερμοκρασίας στο τοίχωμα κλιβάνου σε σταθερή κατάσταση[4]



Σχήμα 1.3 Κατανομή θερμοκρασίας στο τοίχωμα κλιβάνου σε σταθερή κατάσταση.[4]

Το τοίχωμα είναι τριπλό με πάχη L_1 , L_2 , L_3 και θερμικές αγωγιμότητες αντίστοιχα k_1 , k_2 , k_3 .

Συναγωγή. Συναγωγή είναι η μεταφορά θερμότητας μεταξύ σχετικά θερμών και ψυχρών τμημάτων του ρευστού με ανάμιξη. Ας υποθέσουμε ότι ένα δοχείο υγρού τοποθετήθηκε πάνω από θερμή φλόγα. Το υγρό στο πυθμένα του δοχείου θερμαίνεται και η πυκνότητά του γίνεται μικρότερη από πριν λόγω της θερμικής του διαστολής. Το υγρό στη γειτονία του πυθμένα είναι επίσης λιγότερο πυκνό από το ψυχρό ανώτερο τμήμα και ανέρχεται δια μέσου αυτού, μεταφέροντας την θερμότητά του με ανάμιξη

καθώς αυτό ανέρχεται. Η μεταφορά θερμότητας από το θερμό υγρό στο πυθμένα του δοχείου στο υπόλοιπο είναι *φυσική ή ελεύθερη συναγωγή*. Εάν συμβεί κάποια άλλη ανάδευση, όπως αυτή με αναδευτήρα, είναι εκβιασμένη συναγωγή. Αυτός ο τύπος μεταφοράς θερμότητας περιγράφεται με μια εξίσωση, η οποία μιμείται την μορφή της εξίσωσης αγωγής και δίδεται από την σχέση (νόμος του Νεύτωνα για την ψύξη):

$$Q = h A \Delta\theta$$

Η σταθερά αναλογίας h είναι ένας όρος ο οποίος επηρεάζεται από την φύση του ρευστού και τη φύση της ανάδευσης και πρέπει να εκτιμηθεί πειραματικά. Ονομάζεται *συντελεστής μεταφοράς θερμότητας*.

Ακτινοβολία. Η ακτινοβολία περιλαμβάνει την μεταφορά ακτινοβολούμενης ενέργειας από μια πηγή σε ένα δέκτη. Όταν η ακτινοβολία εκπέμπεται από την πηγή στο δέκτη ένα μέρος της ενέργειας απορροφάται από τον δέκτη και ένα μέρος ανακλάται από αυτόν. Με βάση τον δεύτερο νόμο της θερμοδυναμικής ο Boltzmann προσδιόρισε ότι ο ρυθμός με τον οποίο μια πηγή εκπέμπει θερμότητα είναι:

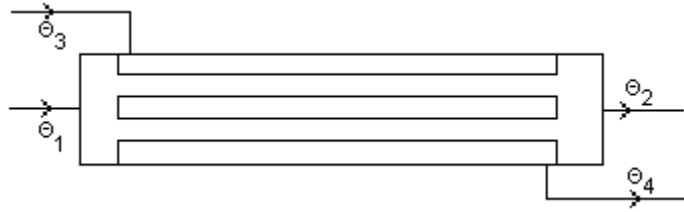
$$Q = \sigma \varepsilon A T^4$$

Αυτός είναι γνωστός ως ο νόμος της τέταρτης δύναμης στον οποίο T είναι η απόλυτη θερμοκρασία, σ είναι μια διαστατική σταθερά, και ε είναι ένας παράγων χαρακτηριστικός για την ακτινοβολία και ονομάζεται *συντελεστής εκπομπής*. Ο συντελεστής εκπομπής, όπως η θερμική αγωγιμότητα k , ή ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας h , πρέπει να προσδιορισθούν πειραματικά.

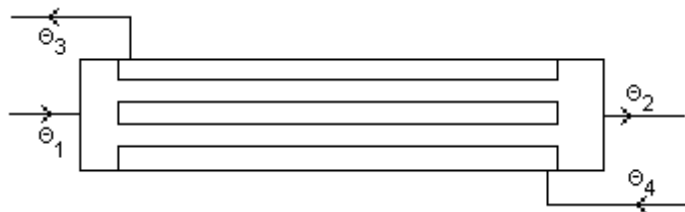
Υπάρχουν συσκευές στις οποίες η θερμότητα ενός θερμού ρευστού μεταφέρεται σε ένα άλλο ψυχρό ρευστό. Αποτελούνται συνήθως από ένα κέλυφος που περιβάλλει ένα θύσανο σωλήνων ή διαθέτουν μια

επιφάνεια εναλλαγής κάποιας άλλης μορφής (Σχήμα 1.3 και 1.4). Τα ρευστά εναλλαγής (θερμό και ψυχρό) ρέουν μέσα από τους σωλήνες και γύρω από αυτούς, ώστε να μπορούν να ανταλλάξουν μεταξύ τους θερμότητα. Ο ρυθμός εναλλαγής θερμότητας εξαρτάται από την επιφάνεια της εναλλαγής, τους επί μέρους συντελεστές μεταφοράς των δύο ρευστών και του πάχους, της θερμικής αγωγιμότητας του τοιχώματος του εναλλάκτη και της μέσης διαφοράς θερμοκρασίας των δύο ρευστών. Στη περίπτωση των εναλλακτών, επειδή οι θερμοκρασίες των ρευστών αλλάζουν, επιλέγονται οι μέσες θερμοκρασίες εισόδου – εξόδου για τον υπολογισμό των συντελεστών μεταφοράς με τη βοήθεια εμπειρικών ως επί το πλείστον σχέσεων. Με την βοήθεια των συντελεστών αυτών υπολογίζονται οι ολικοί συντελεστές μεταφοράς θερμότητας. Η κατάσταση ενός ισοζυγίου ενέργειας γίνεται με την βοήθεια του ολικού συντελεστή μεταφοράς θερμότητας, της επιφάνειας εναλλαγής και μιας λογαριθμικής μέσης διαφοράς θερμοκρασίας στις εισόδους και εξόδους του εναλλάκτη.

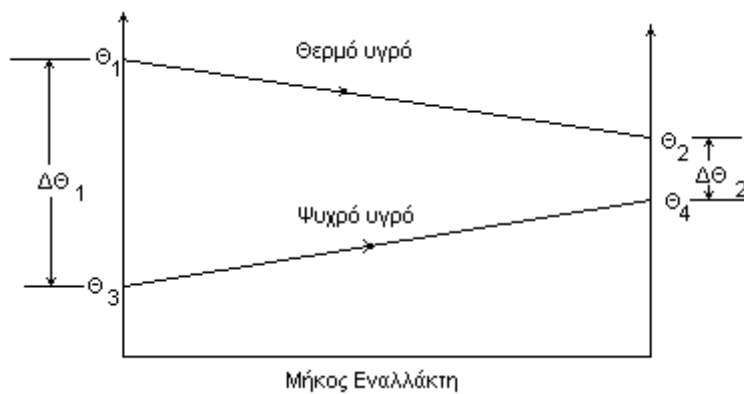
Στο Σχήμα 1.4 και 1.5 παρουσιάζονται δύο εναλλάκτες θερμότητας και οι σχετικές θερμοκρασιακές διαφορές των ρευστών στην είσοδο και έξοδο. Σημειώνεται ότι η κατεύθυνση των ρευστών που ανταλλάσσουν θερμότητα μπορεί να είναι παράλληλη (**ομορροή**) ή αντιπαράλληλη (**αντιρροή**). Το ισοζύγιο θερμότητας περιλαμβάνει τρεις σχέσεις και αφορά τον ρυθμό της θερμότητας, η οποία αποδίδεται από το ρευστό που ψύχεται, τον ρυθμό της θερμότητας, η οποία προσλαμβάνεται από το ρευστό που θερμαίνεται, και τον ρυθμό ανταλλαγής της θερμότητας δια μέσου του εσωτερικού τοιχώματος του εναλλάκτη.



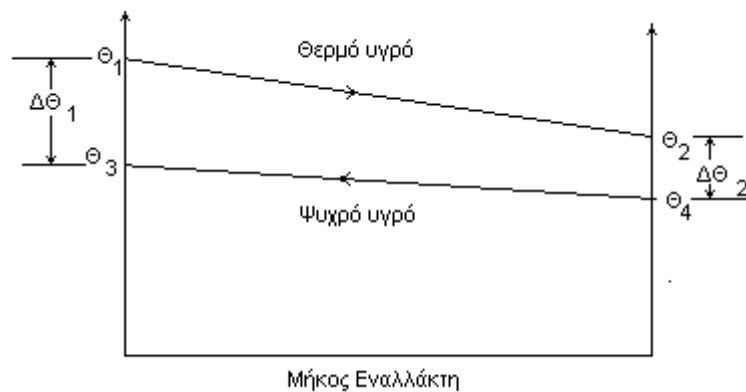
Σχήμα 1.4 Εναλλάκτης θερμότητας. Λειτουργία με ομορροή.[4]



Σχήμα 1.5 Εναλλάκτης θερμότητας. Λειτουργία με αντιρροή[4]



Σχήμα 1.6 Κατανομή θερμοκρασιών. Λειτουργία εναλλάκτη με ομορροή [4]



Σχήμα 1.7 Κατανομή θερμοκρασιών. Λειτουργία εναλλάκτη με αντιρροή[4]

Θερμό ρευστό: $Q' = m_1' C_1 (\theta_1 - \theta_2)$

Ψυχρό ρευστό: $Q' = m_2' C_2 (\theta_4 - \theta_3)$ **ομορροή** ή $Q' = m_2' C_2 (\theta_3 - \theta_4)$ **αντιρροή**

Ανταλλασσόμενη θερμότητα: $Q' = A U LMTD$

Q' : Ρυθμός μεταφοράς θερμότητας, kcal / hr

m_1 : Παροχή ρευστού 1 (θερμού), kg/hr

m_2 : Παροχή ρευστού 2 (ψυχρού), kg/hr

C_1, C_2 : Ειδικές θερμότητες ρευστού 1 και 2 αντίστοιχα, kcal/kg/°C

A : Επιφάνεια εναλλαγής, m²

U : Ολικός συντελεστής μεταφοράς θερμότητας, kcal /((hr) (m²) (°C))

και ισχύει με επαρκή ακρίβεια $\frac{1}{U} = \frac{1}{h_1} + \frac{L}{k} + \frac{1}{h_2}$

$LMTD = (\Delta\theta_1 - \Delta\theta_2) / \ln(\Delta\theta_1/\Delta\theta_2)$ (Σχήμα 3.5 και 3.6), °C

L : Πάχος τοιχώματος σωλήνων εναλλαγής

h_1, h_2 : συντελεστές μεταφοράς θερμότητας για τα ρευστά 1 και 2 αντίστοιχα

k : θερμική αγωγιμότητα του τοιχώματος των σωλήνων του εναλλάκτη.

και $Q' = \frac{A LMTD}{\frac{1}{h_1} + \frac{L}{k} + \frac{1}{h_2}} = A U LMTD \quad kcal / hr$

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΟΥΣ ΕΝΑΛΛΑΚΤΕΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ - ΓΕΝΙΚΑ

2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Όταν ένας εναλλάκτης θερμότητας τοποθετείται σε ένα σύστημα μετάδοσης θερμότητας, μια πτώση της θερμοκρασίας απαιτείται για να μεταφερθεί η θερμότητα. Το κυρίως μέρος αυτής της πτώσης της θερμοκρασίας μπορεί να μειωθεί χρησιμοποιώντας έναν μεγαλύτερο εναλλάκτη θερμότητας αλλά αυτό θα αυξήσει το κόστος του εναλλάκτη θερμότητας. Οικονομικές μελέτες είναι απαραίτητες στην μηχανολογική σχεδίαση των εναλλακτών θερμότητας, καθώς και μια πλήρης μηχανολογική σχεδίαση του υλικού που αναφέρεται σε εναλλάκτες θερμότητας, αφού όχι μόνο τα χαρακτηριστικά της θερμικής συμπεριφοράς αλλά επίσης και τα απαιτούμενα χαρακτηριστικά της αντοχής των σωλήνων καθώς και η οικονομία του συστήματος είναι σημαντικές παράμετροι. Ο ρόλος των εναλλακτών θερμότητας έχει λάβει μια αυξανόμενη σημασία πρόσφατα καθώς οι μηχανικοί έγιναν *ενεργειακά- ευαίσθητοι* (ενδιαφέρονται για το πώς και που ξοδεύεται η ενέργεια γενικά) και κατά συνέπεια θέλουν να βελτιστοποιήσουν σχεδιάσεις όχι μόνο σε όρους που έχουν σχέση με την διαδικασία κατά την οποία ανατροφοδοτούμε ένα σύστημα. Επομένως από οικονομική άποψη, καθώς και άλλες μελέτες όπως η μελέτη της διαθεσιμότητας και το ποσό της ενέργειας και η ροή των υλικών που είναι απαραίτητες για να φέρουν εις πέρας έναν συγκεκριμένο σκοπό για τους εναλλάκτες θερμότητας, θα ληφθούν υπόψη σε αυτό το κεφάλαιο.

2.2 ΒΑΣΙΚΟΙ ΤΥΠΟΙ ΕΝΑΛΛΑΚΤΩΝ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ

Ένας εναλλάκτης θερμότητας είναι μια συσκευή στην οποία θερμότητα μεταφέρεται μεταξύ μιας θερμής και μιας ψυχρής ουσίας, οι οποίες είναι συνήθως ρευστά. Υπάρχουν τρεις βασικοί τύποι εναλλακτών θερμότητας.

A. Αναδιανεμητές (Recuperators): Σε αυτόν τον τύπο εναλλακτών θερμότητας το θερμό και το ψυχρό ρευστό διαχωρίζονται από ένα τοίχιο και θερμότητα μεταφέρεται από έναν συνδυασμό συναγωγής, διαχωριστικού και αγωγής διαμέσου του διαχωριστικού. Το διαχωριστικό μπορεί να περιλαμβάνει προεκτεινόμενες επιφάνειες, όπως λεπτά στρώματα χαλκού, ή άλλους εξελιγμένους μηχανισμούς μεταφοράς θερμότητας.

B. Αναγεννητές (Regenerators): Σε έναν αναγεννητή το θερμό και το ψυχρό ρευστό εναλλακτικά καταλαμβάνουν τον ίδιο χώρο στον πυρήνα του εναλλάκτη. Ο πυρήνας του εναλλάκτη ή "πίνακας" ('matrix') λειτουργεί ως μια συσκευή αποθήκευσης θερμότητας η οποία και περιοδικά θερμαίνεται από την θερμότητα του πιο θερμού από τα δυο ρευστά και έπειτα μεταφέρει θερμότητα στο ψυχρότερο ρευστό. Σε μια διάταξη σταθερού πίνακα (fixed matrix configuration), το θερμό και το ψυχρό ρευστό περνάει εναλλακτικά μέσω ενός σταθεροποιημένου εναλλάκτη, και για μια συνεχή διαδικασία δυο η περισσότεροι πίνακες είναι απαραίτητοι.

Γ. Εναλλάκτες θερμότητας άμεσης επαφής (Direct Contact Heat Exchangers): Σε αυτόν τον τύπο εναλλακτών θερμότητας το θερμό και το ψυχρό ρευστό επικοινωνούν μεταξύ τους απευθείας. Ένα παράδειγμα τέτοιας συσκευής είναι ένας πύργος ψύξης στον οποίο το νερό που ψεκάζεται πέφτει από την κορυφή του πύργου έρχεται σε επαφή απευθείας και ψύχεται ταυτόχρονα από ένα στρώμα ροής αέρα με φορά

προς τα πάνω. Άλλα συστήματα απευθείας επικοινωνίας χρησιμοποιούν αναμιγνυόμενα υγρά ή εναλλάκτη στερεού-προς αέριο. Ένα παράδειγμα ενός εναλλάκτη θερμότητας άμεσης επαφής που χρησιμοποιείται για την μεταφορά θερμότητας μεταξύ υγροποιημένου άλατος και αέρα μπορεί να αποτελέσει αντικείμενο μελέτης.

Ένας πιο συνηθισμένος τύπος εναλλάκτη θερμότητας ο οποίος και χρησιμοποιείται ευρύτατα στην χημική βιομηχανία καθώς και σε άλλες διαδικασίες είναι ο εναλλάκτης θερμότητας «κελύφους – σωλήνα». Σε αυτόν τον τύπο εναλλάκτη θερμότητας ένα ρευστό διέρχεται μέσα από τους σωλήνες ενώ το άλλο ρευστό (το θερμό) ωθείται διαμέσου του κελύφους αλλά και από την εξωτερική επιφάνεια των σωλήνων. Το ρευστό ωθείται (εξαναγκάζεται) να διαρρέει πάνω από τους σωλήνες και όχι κατά μήκος των σωλήνων επειδή ένας υψηλότερος συντελεστής αποτελεσματικότητας εναλλάκτη θερμότητας μπορεί να επιτευχθεί στην διασταυρούμενη ροή από ότι στην παράλληλη ροή προς τους σωλήνες. Προκειμένου να επιτύχουμε διασταυρούμενη ροή στην πλευρά των σωλήνων, διαχωριστικά τοιχώματα τοποθετούνται μέσα στο κέλυφος. Αυτά τα διαχωριστικά μας βεβαιώνουν ότι η ροή διέρχεται διαμέσου των σωλήνων σε κάθε τμήμα, καθοδικά αρχικά, ανοδικά μετέπειτα, και ούτω καθεξής. Βασιζόμενοι στην αρχική μας εξέταση στις δυο άκρες του εναλλάκτη θερμότητας, μπορούν να γίνουν ένα ή περισσότερα περάσματα του ρευστού μέσα από τον σωλήνα του εναλλάκτη θερμότητας. Για την μελέτη ενός εναλλάκτη θερμότητας δυο περασμάτων των σωλήνων, ο εσωτερικός αρχικός σωλήνας χωρίζεται έτσι ώστε το ρευστό που ρέει στους σωλήνες να περάσει μέσα από το μισό των σωλήνων σε μια κατεύθυνση, έπειτα να γυρίσει και να επιστρέψει μέσα από το άλλο μισό των σωλήνων από εκεί που ξεκίνησε. Τρία και τέσσερα περάσματα των σωλήνων μπορούν να γίνουν με διευθέτηση του χώρου που βρίσκεται στην αρχή του σωλήνα.

Στην θέρμανση με αέριο η στην ψύξη με αέριο είναι συχνά προτεινόμενο να χρησιμοποιείται εναλλάκτης θερμότητας διασταυρούμενης ροής. Σε έναν τέτοιο εναλλάκτη θερμότητας, ένα από τα ρευστά διαρρέει μέσα από τους σωλήνες (αυλούς) καθώς το αεριοποιημένο ρευστό διαρρέει έξω από το κύριο σώμα του σωλήνα. Η ροή του εξωτερικού ρευστού μπορεί να ωθηθεί από μόνο του η με φυσική συμβατική μέθοδο. Σε αυτόν τον τύπο του εναλλάκτη θερμότητας το αέριο που ρέει έξω από τον σωλήνα θεωρείται ότι είναι *αναμεμιγμένο*, ενώ το ρευστό στον σωλήνα θεωρείται ότι είναι *μη αναμεμιγμένο*. Η εξωτερική ροή του αερίου αναμιγνύεται γιατί μπορεί να κινηθεί με αυτόν τον τρόπο κανονικά με ελευθερία μεταξύ των σωλήνων καθώς ανταλλάσσει θερμότητα, ενώ παράλληλα το ρευστό το οποίο και βρίσκεται μέσα στους σωλήνες απομονώνεται και δεν μπορεί να αναμιχθεί με οποιοδήποτε άλλο στρώμα ρευστού κατά την διάρκεια της διαδικασίας ανταλλαγής θερμότητας. Η αναμεμιγμένη ροή υπαγορεύει ότι όλα το ρευστό σε οποιοδήποτε δοσμένο επίπεδο και να το λάβουμε που είναι κανονικό ως προς τη ροή έχει την ίδια θερμοκρασία. Η μη αναμεμιγμένη ροή μας υπαγορεύει ότι παρόλο που οι διαφορές θερμοκρασίας μαζί με το ρευστό μπορεί να υπάρχουν τουλάχιστον σε μια κατεύθυνση κανονική ως προς τη ροή, αφού καμία μεταφορά θερμότητας δεν αποφέρει αποτέλεσμα σε αυτήν την κλίση όπου έχουμε μεταφορά θερμότητας για αυτόν τον τύπο εναλλάκτη θερμότητας.

Ένας άλλος τύπος εναλλάκτη θερμότητας διασταυρούμενης ροής ο οποίος και είναι ευρέως χρησιμοποιούμενος στην θέρμανση, στον εξαερισμό και στην βιομηχανία των ανανεωτών αέρα σε κτίρια. Σε αυτήν την περίπτωση το αέριο διαρρέει κατά μήκος ενός σώματος σωλήνα λεπτού φύλλου και δεν αναμιγνύεται επειδή ο σωλήνας είναι έτσι κατασκευασμένος ώστε να διαχωρίζει τις διόδους ροής.

Στην σχεδίαση των εναλλακτών θερμότητας είναι σημαντικό να κάνουμε συγκεκριμένο εάν και κατά πόσο τα ρευστά είναι αναμεμιγμένα ή μη αναμεμιγμένα, και πιο από τα ρευστά είναι αναμεμιγμένο. Είναι επίσης σημαντικό να σταθεροποιήσουμε την πτώση της θερμοκρασίας θεωρώντας προσεγγιστικά ισοδύναμους συντελεστές μεταφοράς θερμότητας στο εξωτερικό μέρος και στο εσωτερικό μέρος των σωλήνων. Εάν αυτό δεν γίνει, τότε μια από τις θερμικές αντιστάσεις μπορεί να είναι αρκετά μεγάλη και να προκαλέσει μια μη επιθυμητή υψηλή πτώση της ολικής θερμοκρασίας για έναν δοσμένο ρυθμό μεταφοράς θερμότητας.

Ο εναλλάκτης θερμότητας κελύφους-και-σωλήνα έχει σταθεροποιημένα τα φύλλα του σωλήνα σε κάθε τέλος τους, και οι σωλήνες καταλήγουν η προεκτείνονται η επιμηκύνονται στο εσωτερικό των φύλλων. Αυτός ο τύπος κατασκευής έχει το πιο μικρό αρχικό κόστος αλλά μπορεί να χρησιμοποιηθεί μόνο για μικρές διαφορές θερμοκρασίας μεταξύ του θερμού και του ψυχρού ρευστού καθώς καμία μέριμνα δεν γίνεται προκειμένου να προλάβουμε την θερμική απρόβλεπτη συμπεριφορά στην προέκταση μεταξύ των σωλήνων και του κελύφους. Ένα άλλο μειονέκτημα είναι ότι το εξωτερικό περίβλημα των σωλήνων δεν μπορεί να μετακινηθεί για να καθαριστεί. Αυτά τα αδύνατα σημεία μπορούν να υπερκεραστούν με την τροποποίηση της βασικής σχεδίασης. Σε αυτήν την κατάσταση το ένα άκρο σωλήνα σταθεροποιείται αλλά το άλλο άκρο συνδέεται σε ένα κάλυμμα κινητής κεφαλής το οποίο επιτρέπει στο κυρίως σώμα του σωλήνα να κινείται σχετικά με το κέλυφος. Το κινούμενο άκρο του σωλήνα είναι προσαρμοσμένο μεταξύ της κινούμενης κεφαλής και μιας βαλβίδας ώστε να είναι δυνατό να μετακινήσουμε το κυρίως σώμα του σωλήνα για καθαρισμό.

2.3 ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΟΙ ΕΝΑΛΛΑΚΤΕΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ

Στην σχεδίαση και στην επιλογή ενός εναλλάκτη θερμότητας κελύφους- και- σωλήνα η ισχύς η οποία απαιτείται και το αρχικό κόστος του συστήματος πρέπει να ληφθούν υπόψη. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι το μικρότερο δυνατό σφάλμα σε κάθε κατεύθυνση έχει άμεσο αποτέλεσμα στην ελάχιστη απαίτηση ισχύος για έναν συγκεκριμένο ρυθμό μεταφοράς θερμότητας. Καθώς μικρότερα ποσά απαίτησης ισχύος επιτρέπουν επίσης τη χρησιμοποίηση ενός μικρότερου κελύφους, το κόστος της μονάδας μειώνεται όταν οι σωλήνες είναι τοποθετημένοι κοντά. Υπάρχει μια μικρή διαφορά στην συμπεριφορά μεταξύ άμεσα διαθέσιμης και κλιμακούμενης διαμόρφωσης της κατάστασης των εναλλακτών θερμότητας, αλλά αυτοί που εξετάστηκαν αρχικά είναι πιο εύκολοι (πιο βολικοί) στον καθαρισμό τους από προσμίξεις που επικάθονται πάνω στην επιφάνειά τους. Η Ένωση Κατασκευαστών Σωλήνων Εναλλακτών Θερμότητας μας πληροφορεί ότι οι σωληνώσεις θα πρέπει να βρίσκονται σε μια απόσταση μεταξύ τους, με μια ελάχιστη απόσταση κέντρου με κέντρο των σωλήνων της τάξεως των 1.25 φορές της εξωτερικής διαμέτρου κάθε σωλήνα, όταν οι σωλήνες βρίσκονται σε τετραγωνική απόσταση, ώστε μια ελάχιστη δίοδος για τον καθαρισμό των σωλήνων της τάξεως των 0,65 cm να μπορεί να επιτευχθεί.

Η ροή του ρευστού που βρίσκεται στην πλευρά του κελύφους στους εναλλάκτες θερμότητας που έχουν διαχωριστικά τοιχεία είναι κατά ένα τμήμα κάθετη και κατά ένα τμήμα παράλληλη με τις σωληνώσεις. Ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας στην πλευρά του κελύφους σε αυτόν τον τύπο του συστήματος εξαρτάται όχι μόνο από το μέγεθος και από την απόσταση των σωλήνων και από την ταχύτητα και τις φυσικές ιδιότητες του ρευστού αλλά επίσης από την απόσταση και το σχήμα των διαχωριστικών. Επιπρόσθετα υπάρχει πάντα μια παροχή από τις οπές των

σωλήνων στο διαχωριστικό και μεταξύ διαχωριστικού και του εσωτερικού του κελύφους, και υπάρχει μια παράκαμψη μεταξύ της κατασκευής του σωλήνα και του κελύφους. Εξαιτίας αυτής της πολυπλοκότητας, ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας μπορεί να υπολογιστεί μόνο με προσεγγιστικές μεθόδους ή από την εμπειρία σε παρόμοια συστήματα. Σύμφωνα με μια προσεγγιστική μέθοδο, η οποία και χρησιμοποιείται ευρέως για σχεδιαστικούς υπολογισμούς, ο μέσος συντελεστής μεταφοράς θερμότητας ο οποίος και υπολογίζεται για την κατάσταση απόκρισης του σωλήνα σε απλή διασταυρούμενη ροή πολλαπλασιάζεται με 0.6 προκειμένου να επιτρέψει την διαρροή και άλλες διαβαθμίσεις για το απλοποιημένο μοντέλο.

Σε ορισμένες εφαρμογές εναλλακτών θερμότητας, το μέγεθος και το βάρος του εναλλάκτη θερμότητας είναι κύριας σημασίας. Αυτό μπορεί να είναι ιδιαίτερα αληθές για εναλλάκτες θερμότητας στους οποίους το ένα ή και τα δυο ρευστά είναι αέρια, καθόσον οι συντελεστές θερμότητας στην πλευρά του αερίου είναι μικροί ενώ μια μεγάλη περιοχή της επιφάνειας μεταφοράς θερμότητας μπορεί να είναι αποτελεσματική. Οι συμπαγείς εναλλάκτες θερμότητας (*Compact heat exchangers*) αναφέρονται σε εκείνες τις σχεδιάσεις εναλλακτών θερμότητας στις οποίες αναπτύσσονται μεγάλες περιοχές επιφάνειας μεταφοράς θερμότητας σε όσο δυνατό μικρό διάστημα γίνεται. Εφαρμογές στις οποίες απαιτούνται συμπαγείς εναλλάκτες θερμότητας αυτοί περιλαμβάνουν (α) τα ψυγεία των αυτοκινήτων και (β) τους συμπιεστές των ψυγείων.

Τα φύλλα του περιβλήματος των σωλήνων προσδένονται με την βοήθεια ενός σύρματος στους σωλήνες ψύξης και βοηθούν τη μεταφορά θερμότητας από την εξωτερική επιφάνεια των σωλήνων προς το στρώμα του αέρα. Πειραματικά δεδομένα απαιτούνται για να επιτρέψουν σε

οποιοδήποτε το επιχειρήσει να υπολογίσει τον συντελεστή μεταφοράς θερμότητας της πλευράς του αερίου καθώς και την πτώση της πίεσης για τον πυρήνα των συμπαγών εναλλακτών θερμότητας. Οι παράμετροι σχεδίασης του φύλλου της εξωτερικής επιφάνειας των σωλήνων οι οποίοι και αποτρέπουν την μεταφορά θερμότητας και την πτώση της πίεσης στην πλευρά του αερίου ρευστού εξαρτώνται από την λεπτότητα του φύλλου, το κενό που υπάρχει μεταξύ φύλλου υλικού και σωλήνα, από το υλικό από το οποίο είναι κατασκευασμένο το φύλλο αυτό καθώς και από το μήκος του. Οι Kays και London έχουν προσαρμόσει δεδομένα μεταφοράς θερμότητας και πτώσης πίεσης για έναν μεγάλο αριθμό πυρήνων συμπαγών εναλλακτών θερμότητας. Για κάθε πυρήνα, οι παράμετροι των φύλλων που καλύπτουν τους σωλήνες σε έναν εναλλάκτη θερμότητας που δόθηκαν παραπάνω, κατά την αναφορά μας στους εναλλάκτες θερμότητας δίνονται σε αναλογία με την υδραυλική διάμετρο της πλευράς του αερίου ρευστού που υπάρχει μέσα στους σωλήνες, την ολική περιοχή επιφάνειας μεταφοράς θερμότητας ανά μονάδα μεγέθους, και τον κλασματικό αριθμό της ολικής περιοχής μεταφοράς θερμότητας η οποία και είναι περιοχή των φύλλων αυτών που καλύπτουν την επιφάνεια των σωλήνων. Τα δεδομένα μπορεί να δοθούν ως μορφή του αριθμού Staton και του κλασματικού αριθμού της τριβής ως μια συνάρτηση του αριθμού Reynolds που αναφέρεται στην πλευρά του αερίου ρευστού. Όταν μας δίνονται αυτά τα απαιτούμενα μεγέθη για έναν εναλλάκτη θερμότητας, ο σχεδιαστής μπορεί να υπολογίσει (να εκτιμήσει) την συμπεριφορά πολλών ανάλογων πυρήνων εναλλακτών θερμότητας προκειμένου να καθορίσει την βέλτιστη σχεδίαση αυτών των πυρήνων.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΕΝΑΛΛΑΚΤΕΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ (HEAT EXCHANGERS)

3.1 ΕΝΑΛΛΑΚΤΕΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ

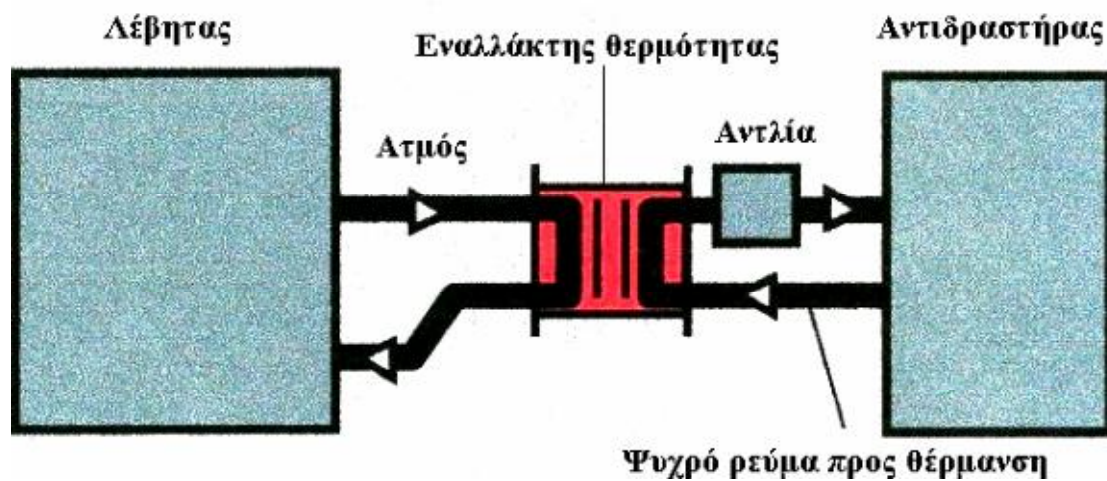
Οι εναλλάκτες θερμότητας είναι συσκευές με τις οποίες επιτυγχάνεται η μεταφορά ενέργειας από ένα ρευστό υψηλής θερμοκρασίας σε ένα άλλο ρευστό χαμηλότερης θερμοκρασίας. Το πολύ αυξημένο ενδιαφέρον για τη μείωση της κατανάλωσης ενέργειας σε παγκόσμιο επίπεδο τις τελευταίες δεκαετίες του 20ου αιώνα σε συνδυασμό με τα οικονομικά κίνητρα που έδωσαν οι περισσότερες κεντρικές κυβερνήσεις σε όλο το κόσμο οδήγησε τις παραγωγικές εταιρείες ανεξαρτήτως μεγέθους να αναπτύξουν τεχνολογίες αποτελεσματικότερης αξιοποίησης της ενέργειας. Σημαντικό ρόλο για την επίτευξη του παραπάνω στόχου έπαιξαν και συνεχίζουν να παίζουν οι συσκευές εναλλαγής θερμότητας. Οι εναλλάκτες θερμότητας βρίσκουν πολλές εφαρμογές σε όλους τους βιομηχανικούς τομείς, ανάμεσα σε αυτούς εξέχουσα θέση έχουν η χημική και η μεταλλουργική βιομηχανία.

Οι τυπικές εφαρμογές των εναλλακτών θερμότητας στη χημική και μεταλλουργική βιομηχανία διακρίνονται σε τρεις κυρίως κατηγορίες:

α. Ενεργειακά και οικονομικά αποδοτικοί τρόποι θέρμανσης (Heating).

Η θέρμανση οποιουδήποτε ρεύματος ρευστού που οδεύει σε βιομηχανικό χημικό αντιδραστήρα γίνεται συνήθως με χαμηλής πίεσης ατμό με εξαίρεση τις περιπτώσεις που απαιτείται θέρμανση σε σχετικά υψηλές θερμοκρασίες. Το ρευστό το οποίο πρέπει να εισέλθει στον αντιδραστήρα θερμαίνεται μέσα σε ένα εναλλάκτη θερμότητας έως την επιθυμητή θερμοκρασία από χαμηλής πίεσης ατμό ή σε ορισμένες περιπτώσεις από άλλα μέσα θέρμανσης όπως θερμό νερό και ειδικά λάδια.

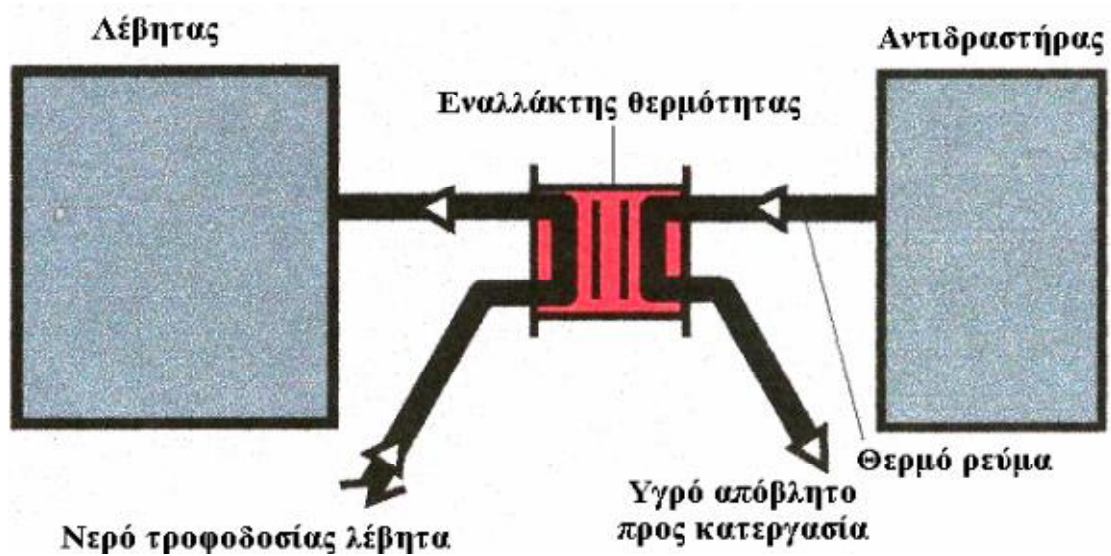
Ένα απλοποιημένο διάγραμμα ροής μιας τέτοιας εφαρμογής δίνεται στο σχήμα 3.1.



Σχήμα 3.1. Θέρμανση με χαμηλής πίεσης ατμό[14]

β. Ανάκτηση θερμότητας από θερμά ρεύματα (Heat Recovery).

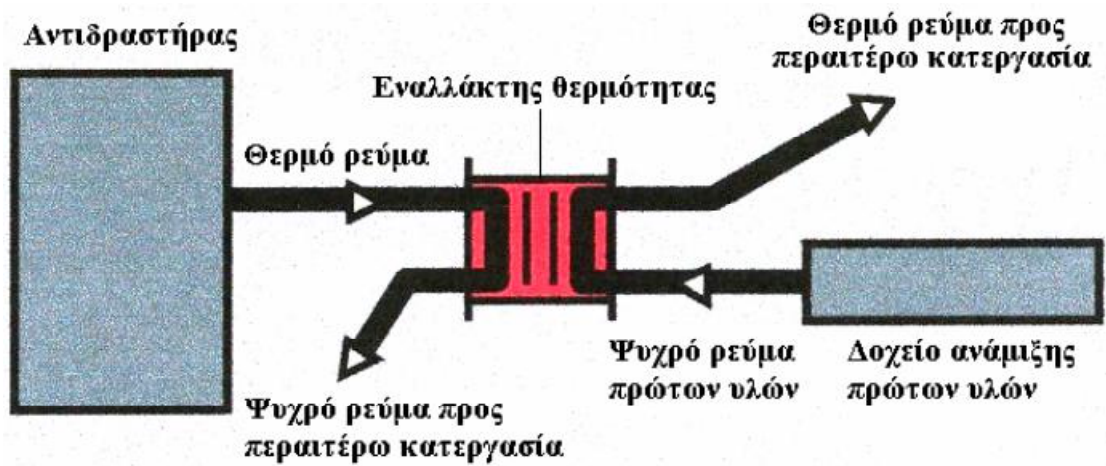
Κάθε βιομηχανική δραστηριότητα χαρακτηρίζεται από ένα μεγάλο αριθμό θερμών ρευμάτων τα οποία πρέπει να ψυχθούν ή θερμών ρευστών αποβλήτων τα οποία πριν υποστούν κατεργασία προς απόρριψη πρέπει επίσης να ψυχθούν για να ανακτηθεί η περιεχόμενη σε αυτά ενέργεια. Ο αποτελεσματικότερος τρόπος ανάκτησης της θερμότητας είναι μέσω ενός εναλλάκτη θερμότητας, ο οποίος όπως φαίνεται στο σχήμα 3.2 χρησιμοποιείται συνήθως για την προθέρμανση του νερού που τροφοδοτεί ένα λέβητα παραγωγής ατμού μειώνοντας με αυτό το τρόπο την κατανάλωση ενέργειας στο λέβητα.



Σχήμα 3.2. Τυπικό διάγραμμα ανάκτησης θερμότητας από θερμό ρεύμα[14]

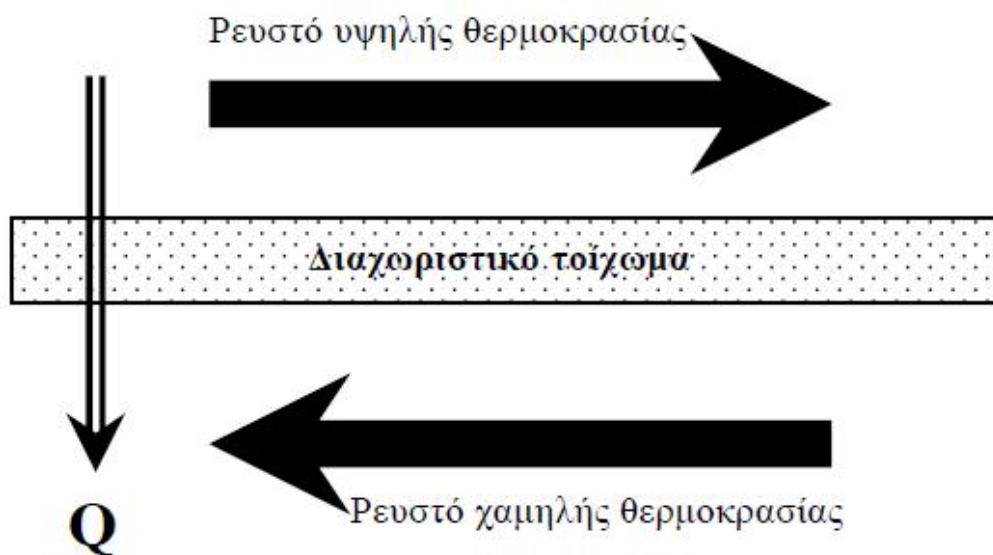
γ. Αναγέννηση θερμότητας (Regenerative Heat Exchange).

Η φιλοσοφία της αναγέννησης θερμότητας είναι η ανάκτηση της ενέργειας ενός θερμού ρεύματος μιας παραγωγικής διαδικασίας που απαιτεί ψύξη για την άμεση θέρμανση ενός άλλου ψυχρού ρεύματος της ίδιας παραγωγικής διαδικασίας, το οποίο απαιτεί θέρμανση πριν την περαιτέρω κατεργασία του (Σχήμα 3.3). Ονομάζεται αναγέννηση θερμότητας διότι μεταφέρει άμεσα ένα ποσό ενέργειας από ένα θερμό ρεύμα εξόδου σε ένα ψυχρό ρεύμα εισόδου της ίδιας παραγωγικής διαδικασίας.



Σχήμα 3.3. Τυπικό διάγραμμα αναγέννησης θερμότητας[14]

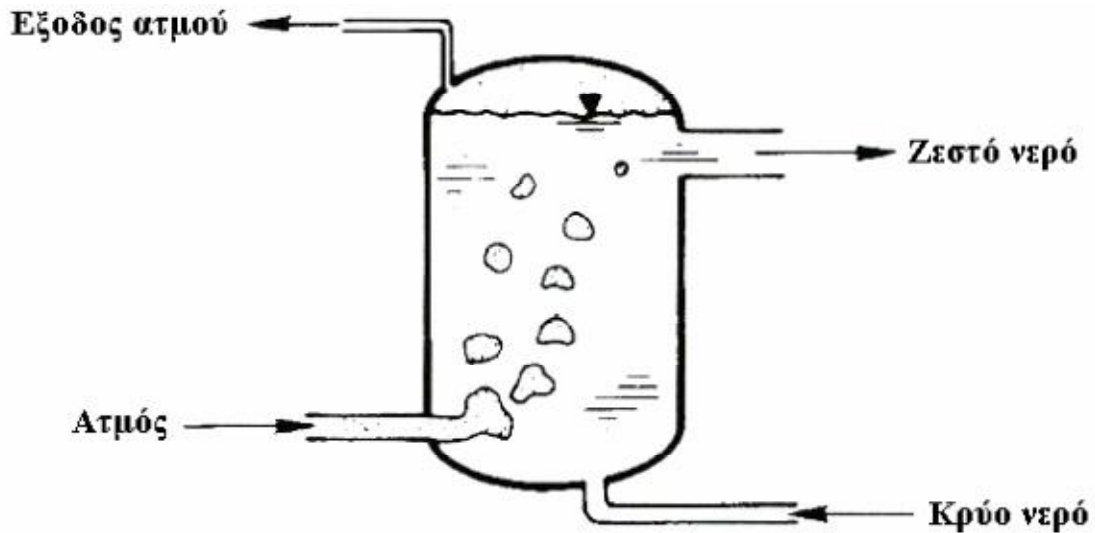
Ανεξαρτήτως του τρόπου εφαρμογής των εναλλακτών θερμότητας, η αρχή λειτουργίας τους φαίνεται παραστατικά στο σχήμα 3.4.



Σχήμα 3.4. Αρχή λειτουργίας εναλλακτών θερμότητας[14]

Οι ροές των δύο ρευστών συνήθως διαχωρίζονται μεταξύ τους μέσω ενός μη διαπερατού θερμοαγώγιμου διαχωριστικού τοιχώματος. Λόγω της διαφοράς θερμοκρασίας ανάμεσα στα δυο ρευστά, υπάρχει ωθούσα δύναμη για μεταφορά ενέργειας υπό μορφή θερμότητας από το ρευστό υψηλής θερμοκρασίας προς το ρευστό χαμηλής θερμοκρασίας μέσω του διαχωριστικού τοιχώματος που έχει ως άμεση συνέπεια την αύξηση του ενεργειακού περιεχομένου του ψυχρού ρευστού και προφανώς της θερμοκρασίας του. Εκτός από το μηχανισμό μεταφοράς ενέργειας που περιγράφεται απλοϊκά στο σχήμα 3.4, υπάρχουν και διατάξεις εναλλαγής ενέργειας όπου υπάρχει άμεση επαφή μεταξύ των δύο ρευστών όπως φαίνεται στο σχήμα 3.5.

Οι εναλλάκτες θερμότητας αυτού του τύπου ονομάζονται “άμεσης επαφής” και περιέχουν είτε δύο πλήρως μη-αναμίξιμα ρευστά, είτε ένα μη-υγροποιήσιμο αέριο στις συνθήκες λειτουργίας της συσκευής που διέρχεται μέσω ενός ρευστού, είτε τέλος ατμό που διασπείρεται σε ψυχρό νερό. Στο σχήμα 3.5 φαίνεται ένας εναλλάκτης θερμότητας άμεσης επαφής στον οποίο κορεσμένος ατμός έρχεται σε άμεση επαφή με κρύο νερό με συνέπεια ο ατμός να υγροποιείται αποβάλλοντας ενέργεια υπό μορφή θερμότητας ενώ ταυτοχρόνως το νερό να θερμαίνεται.

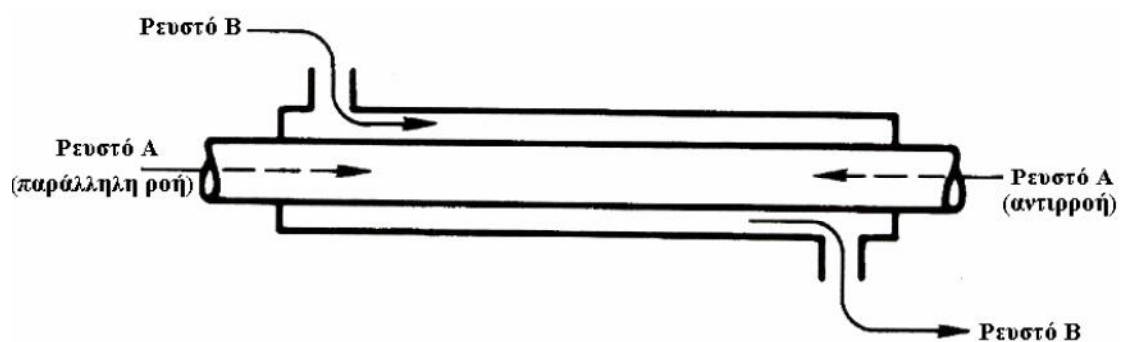


Σχήμα 3.5. Εναλλάκτης θερμότητας άμεσης επαφής[14]

3.2 ΕΝΑΛΛΑΚΤΕΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ ΜΕ ΔΙΑΧΩΡΙΣΤΙΚΟ ΤΟΙΧΩΜΑ ΑΝΑΜΕΣΑ ΣΤΑ ΔΥΟ ΡΕΥΣΤΑ

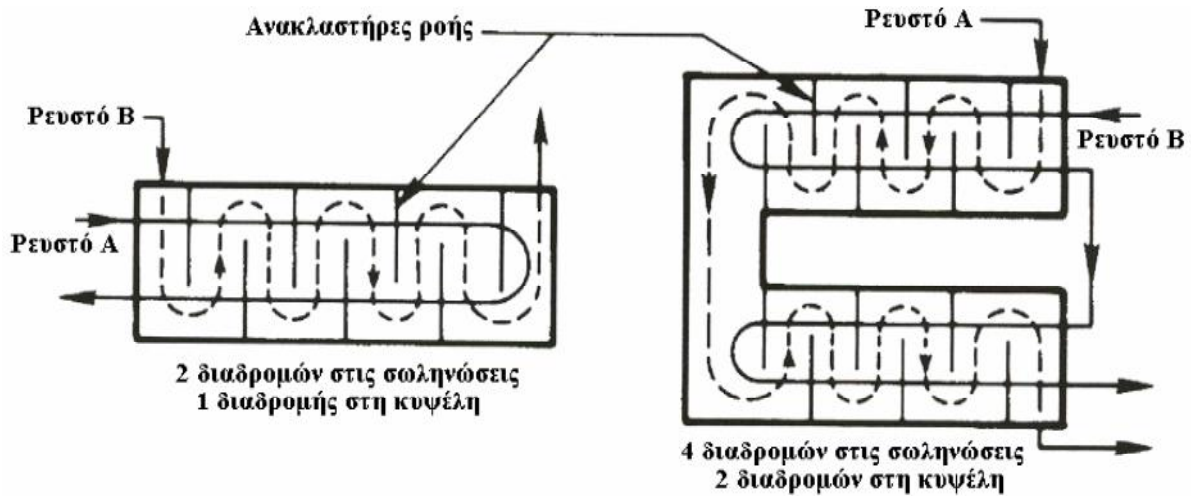
Οι εναλλάκτες θερμότητας με διαχωριστικό τοίχωμα ανάμεσα στα δυο ρευστά αποτελούν την πλειοψηφία των εμπορικών συσκευών εναλλαγής θερμότητας. Αυτού του είδους οι εναλλάκτες θερμότητας διακρίνονται σε τρεις βασικούς τύπους:

A) Απλοί εναλλάκτες θερμότητας παράλληλης ροής ή κατά αντιρροή (Parallel flow or counterflow heat exchangers).



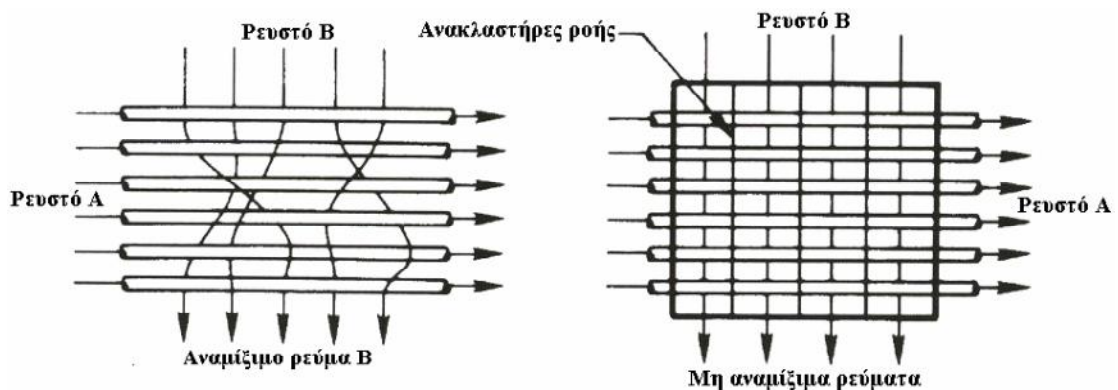
Σχήμα 3.6. Διατάξεις απλών εναλλακτών θερμότητας[14]

β) Εναλλάκτες θερμότητας με κυψέλη και σωληνώσεις (Shell-and-tube heat exchangers).



Σχήμα 3.7. Διατάξεις εναλλακτών θερμότητας με κυψέλη και σωληνώσεις[14]

γ) Εναλλάκτες θερμότητας εγκάρσιας ροής (Cross-flow heat exchangers).



Σχήμα 3.8. Διατάξεις εναλλακτών θερμότητας εγκάρσιας ροής[14]

Οι περισσότεροι μεγάλης κλίμακας βιομηχανικοί εναλλάκτες θερμότητας ανήκουν στη κατηγορία των εναλλακτών θερμότητας με κυψέλη και σωληνώσεις επειδή εξαιτίας του ιδιαίτερου σχεδιασμού τους (ροή ρευστού Β εγκάρσια προς τις σωληνώσεις) εξασφαλίζουν υψηλή απόδοση εναλλαγής θερμότητας ανάμεσα στα δύο ρευστά.

3.3. ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΕΝΑΛΛΑΚΤΩΝ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ

Ένας εναλλάκτης θερμότητας μπορεί να μελετηθεί μέσω των παρακάτω δύο διαφορετικών προσεγγίσεων.

- α) Τη μέθοδο της μέσης λογαριθμικής θερμοκρασιακής διαφοράς,
- β) Τη μέθοδο της αποδοτικότητας εναλλάκτη.

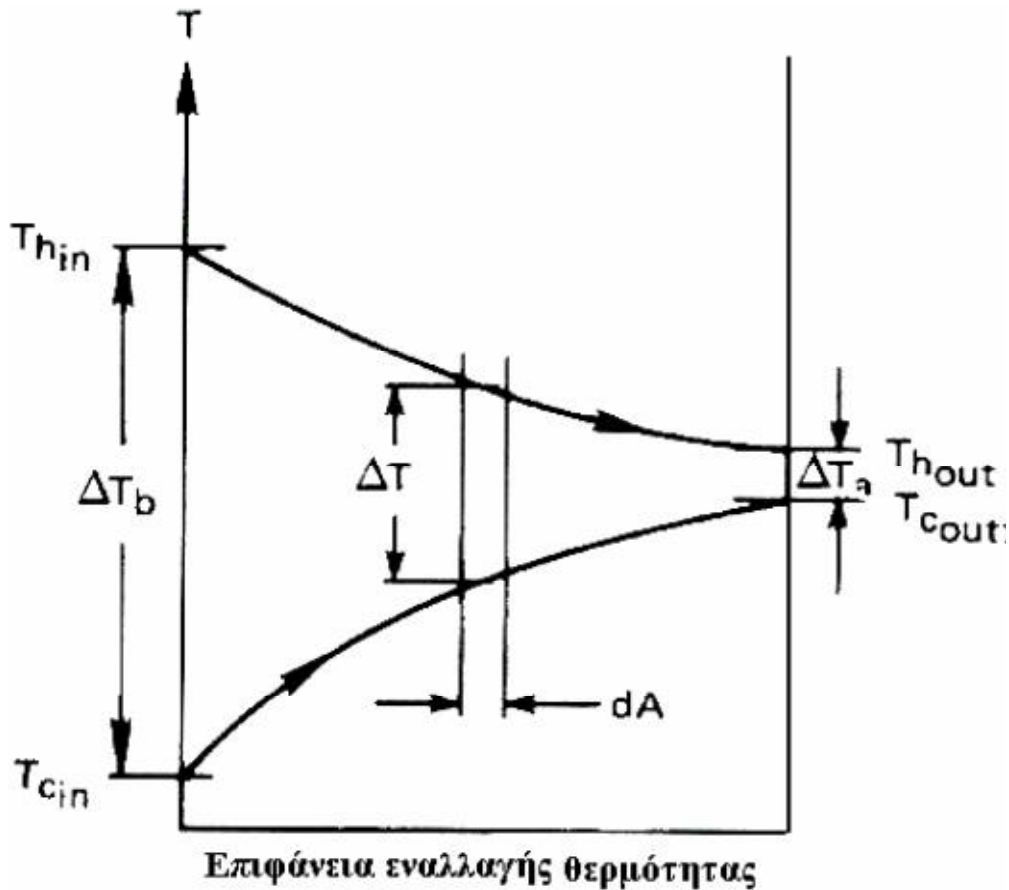
3.3.1 ΜΕΘΟΔΟΣ ΜΕΣΗΣ ΛΟΓΑΡΙΘΜΙΚΗΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΚΗΣ ΔΙΑΦΟΡΑΣ (Μ.Λ.Θ.Δ)

Για τη κατανόηση αυτής της μεθόδου θα αναλυθεί η περίπτωση των απλών εναλλακτών θερμότητας παράλληλης ροής και κατά αντιρροή.

3.3.1.1 ΑΠΛΟΣ ΕΝΑΛΛΑΚΤΗΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ ΠΑΡΑΛΛΗΛΗΣ ΡΟΗΣ

Ο απλός εναλλάκτης θερμότητας παράλληλης ροής αποτελείται από δύο ομόκεντρους κυλινδρικούς αγωγούς όπου στον εσωτερικό αγωγό ρέει το ρευστό υψηλής θερμοκρασίας (θερμό ρεύμα) και στον εξωτερικό αγωγό ρέει το ρευστό χαμηλής θερμοκρασίας (ψυχρό ρεύμα). Καθώς τα δύο ρευστά ρέουν μέσα στη συσκευή προς την ίδια κατεύθυνση (παράλληλη ροή) μεταφέρεται ενέργεια από το θερμό προς το ψυχρό ρεύμα με συνέπεια να αυξάνεται η θερμοκρασία του ψυχρού ρεύματος (T_c) και να μειώνεται η θερμοκρασία του θερμού (T_h), όπως φαίνεται στο σχήμα 2.9.

Τονίζεται ότι σε αυτούς τους εναλλάκτες θερμότητας δεν είναι δυνατό να λάβει χώρα αλλαγή της φυσικής κατάστασης των δύο ρευστών (υγροποίηση ή εξάτμιση) πράγμα που σημαίνει ότι όλο το ποσό της μεταφερόμενης ενέργειας χρησιμοποιείται για τη μεταβολή της θερμοκρασίας των δύο ρευστών.



Σχήμα 3.9. Θερμοκρασιακή κατανομή στα ρευστά απλού εναλλάκτη θερμότητας παράλληλης ροής[14]

Η μέθοδος της μέσης λογαριθμικής θερμοκρασιακής διαφοράς δέχεται ότι ο ολικός ρυθμός μεταφοράς θερμότητας (q) από το θερμό στο ψυχρό

ρεύμα μέσω της συνολικής επιφάνειας του εναλλάκτη θερμότητας (A) υπολογίζεται από τη σχέση (3.1).

$$q = U \cdot A \cdot \Delta T_{\mu} \quad (1.1)$$

όπου, U είναι ο ολικός συντελεστής μεταφοράς θερμότητας, ΔT_{μ} είναι η μέση θερμοκρασιακή διαφορά ανάμεσα στα δύο ρευστά.

Συνεπώς, το πρόβλημα του υπολογισμού του εναλλάκτη θερμότητας ανάγεται σε πρόβλημα προσδιορισμού της μέσης θερμοκρασιακής διαφοράς ανάμεσα στα δύο ρευστά του εναλλάκτη.

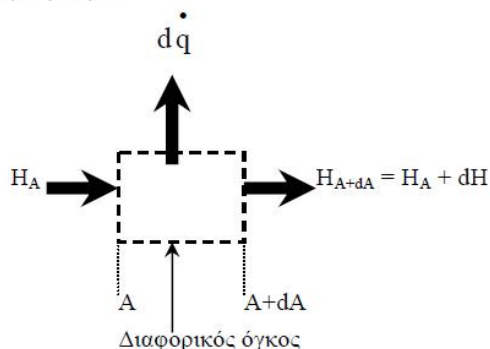
Εάν θεωρήσουμε ένα διαφορικό όγκο ελέγχου με επιφάνεια μεταφοράς θερμότητας dA όπως φαίνεται στο σχήμα 3.9, τότε ο διαφορικός ρυθμός μεταφοράς θερμότητας q d από το θερμό στο ψυχρό ρεύμα μέσα από τη διαφορική επιφάνεια δίνεται από την εξίσωση (3.2)

$$dq = U \cdot \Delta T \cdot dA \quad (3.2)$$

όπου, ΔT είναι η θερμοκρασιακή διαφορά ανάμεσα στα δύο ρευστά μέσα στο διαφορικό όγκο ελέγχου.

Εφαρμόζοντας την αρχή διατήρησης ενέργειας για κάθε ρευστό χωριστά προκύπτουν οι παρακάτω σχέσεις:

Θερμό ρεύμα

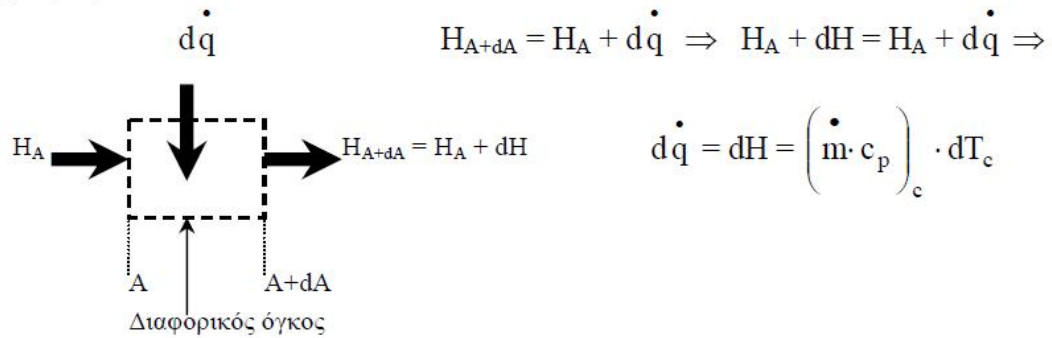


$$\begin{aligned} H_{A+dA} + d\dot{q} &= H_A \Rightarrow \\ H_A + dH + d\dot{q} &= H_A \Rightarrow \\ d\dot{q} &= -dH = -\left(\dot{m} \cdot c_p\right)_h \cdot dT_h \end{aligned}$$

$$dp = U \cdot \Delta T \cdot dA = - (m \cdot c_p)_h \cdot dT_h \quad (3.3)$$

όπου $(m)_h$, είναι ο ρυθμός μεταφοράς μάζας του θερμού ρευστού και dT_h η μεταβολή της θερμοκρασίας του κατά τη διεύθυνση ροής του.

Ψυχρό ρεύμα



$$dp = U \cdot \Delta T \cdot dA = - (m \cdot c_p)_c \cdot dT_c \quad (3.4)$$

όπου $(m)_c$, είναι ο ρυθμός μεταφοράς μάζας του ψυχρού ρευστού και dT_c η μεταβολή της θερμοκρασίας του κατά τη διεύθυνση ροής του.

3.3.1.2 ΑΠΛΟΣ ΕΝΑΛΛΑΚΤΗΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ ΚΑΤΑ ΑΝΤΙΡΡΟΗ

Η διαφορά του εναλλάκτη θερμότητας κατά αντιρροή από τον εναλλάκτη θερμότητας παράλληλης ροής έγκειται στην αντίθετη κατεύθυνση ροής των δύο ρευστών όπως φαίνεται στο σχήμα 3.10. Η διάταξη αυτού του είδους έχει ως συνέπεια την αποτελεσματικότερη εναλλαγή θερμότητας ανάμεσα στο θερμό και το ψυχρό ρευστό έχοντας εν γένει μεγαλύτερο μήκος από τους αντίστοιχους εναλλάκτες παράλληλης ροής.

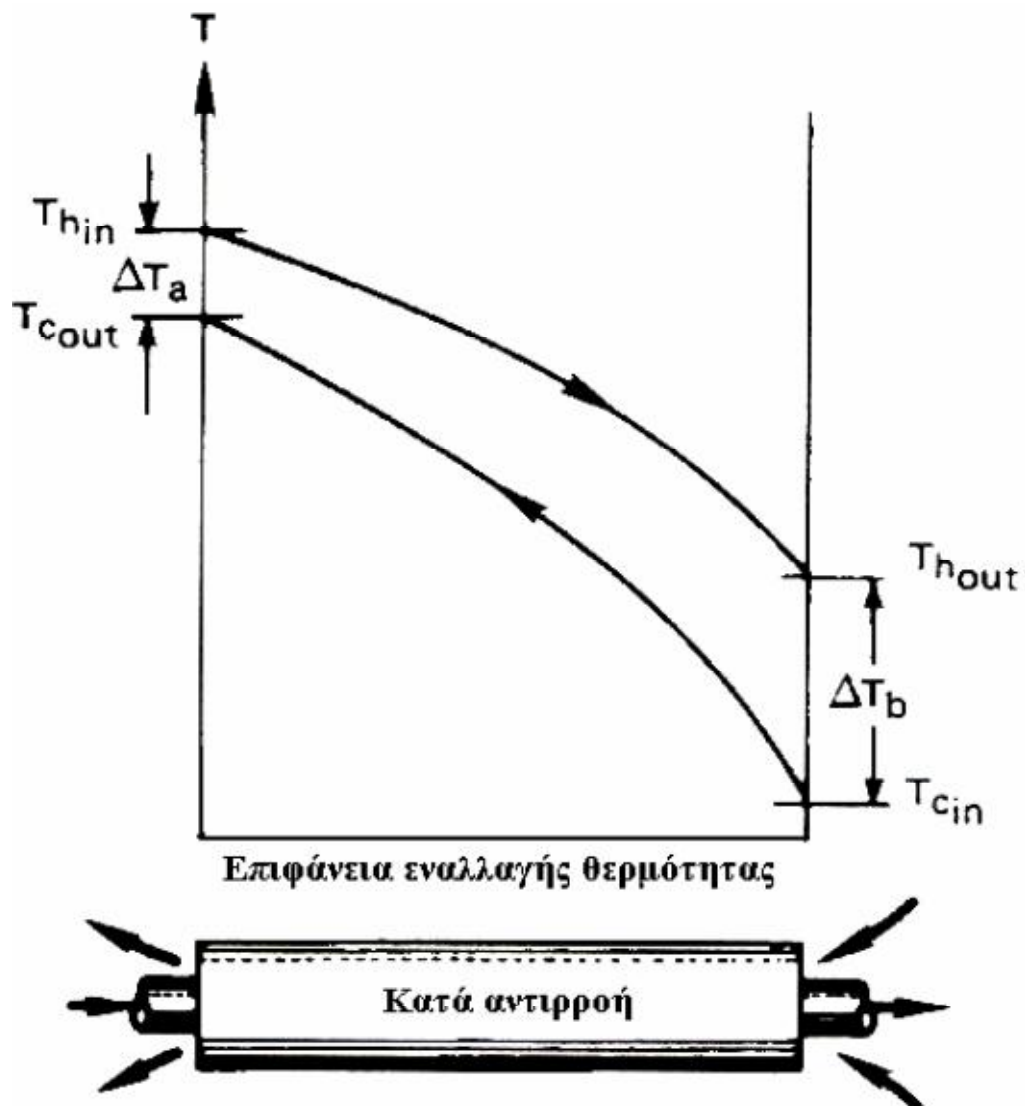
Η ανάλυση των εναλλακτών θερμότητας κατά αντιρροή ακολουθεί την ίδια λογική με αυτή των εναλλακτών θερμότητας παράλληλης ροής. Καταλήγει στην εξίσωση ορισμού της μέσης λογαριθμικής θερμοκρασιακής διαφοράς (εξίσωση 3.5), με τα μεγέθη ΔT_a και ΔT_b που φαίνονται στο σχήμα (3.10) ορίζονται όπως φαίνεται από τις εξισώσεις (3.6) και (3.7).

ΕΞΙΣΩΣΗ ΟΡΙΣΜΟΥ ΤΗΣ ΜΕΣΗΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΚΗΣ ΔΙΑΦΟΡΑΣ

$$\Delta T_{\mu} = \frac{\Delta T_a - \Delta T_b}{\ln \left(\frac{\Delta T_a}{\Delta T_b} \right)} \quad (3.5)$$

$$T_a = T_{h \text{ in}} - T_{c \text{ out}} \quad (3.6)$$

$$T_b = T_{c \text{ out}} - T_{h \text{ in}} \quad (3.7)$$



Σχήμα 3.10. Θερμοκρασιακή κατανομή στα ρευστά απλού εναλλάκτη θερμότητας κατά αντιρροή[14]

3.4 ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ ΡΕΥΣΤΩΝ

Τα γεωμετρικά μοτίβα ροής προσδίδουν χαρακτηριστικές διακυμάνσεις στη θερμοκρασία εντός του εναλλάκτη.

Ο εναλλάκτης παράλληλης ροής μεταβάλλει τη θερμοκρασία κατά μήκος του σωλήνα. Είναι προφανές ότι η θερμοκρασία στο ψυχρό ρεύμα δε μπορεί να υπερβεί τη θερμοκρασία στο θερμό ρεύμα .

Στον εναλλάκτη αντιπαράλληλης ροής η κίνηση είναι πιο πολύπλοκη δεδομένου ότι η θερμοκρασία κυμαίνεται σε δύο κατευθύνσεις.

Στο σημείο αυτό είναι χρήσιμο να αναφερθεί η περίπτωση στην οποία στον εναλλάκτη υπάρχει άμεση επαφή μεταξύ των δύο ρευστών. Οι εναλλάκτες αυτοί χρησιμοποιούνται πιο συχνά για τη μεταφορά μάζας και την ταυτόχρονη μεταφορά θερμότητας. Μία απλή μορφή του ανταλλάκτη θερμότητας άμεσης επαφής είναι ένας θερμαντήρας νερού στο οποίο ατμός διοχετεύεται μέσα από το νερό. Ο ατμός σε αυτή την περίπτωση εμφανίζεται συμπυκνώμενος.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΕΦΑΡΜΟΓΗ

4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Όπως προαναφέρθηκε και στο κεφάλαιο 1 αγωγή ονομάζεται η διαδικασία μετάδοσης θερμότητας κατά την οποία, σε μοριακό επίπεδο, μεταφέρεται θερμότητα μέσα σ' ένα σώμα ή μεταξύ σωμάτων σε επαφή λόγω θερμοκρασιακών διαφορών. Ο ρυθμός ροής της θερμότητας Φ δίδεται από το νόμο του Fourier :

$$\Phi = -K A \frac{\partial q}{\partial x}$$

όπου K είναι ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας σε $W/ m \text{ } ^\circ C$. Εξαρτάται από την θερμοκρασία και ασθενώς από την πίεση.

Μεταφορά είναι η ροή θερμότητας από ένα ρευστό σε ένα στερεό ή αντίθετα. Ο ρυθμός της ροής θερμότητας δίδεται από το νόμο του Newton :

$$\Phi = h A \Delta\theta$$

όπου h είναι ο συντελεστής λεπτού στρώματος σε $W/ m \text{ } ^\circ C$. Εξαρτάται από την ταχύτητα του ρευστού, το ιξώδες, την θερμική αγωγιμότητα, την ειδική θερμοχωρητικότητα σε σταθερή πίεση, τη μορφή και το μέγεθος της ροής και σαφώς σε μικρότερο βαθμό εξαρτάται από την ποιότητα της επιφανείας του τοιχώματος.

Ο πίνακας 4.1 που ακολουθεί παραθέτει τους συμβολισμούς και τις μονάδες των ποσοτήτων που χρησιμοποιήθηκαν κατά τη διάρκεια διεξαγωγής των πειραμάτων.

ΠΟΣΟΤΗΤΑ	ΜΟΝΑΔΕΣ	ΣΥΜΒΟΛΟ
Ρυθμός ροής θερμότητας, απαγόμενη	q_a	w
Ρυθμός ροής θερμότητας, απορροφούμενη	q_u	W
Ρυθμός ροής θερμότητας, απώλειες	q_f	w
Ειδική θερμότητα σε σταθερή πίεση	c_p	W.s/kg ⁰ C
Συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας, σωλήνας ή κελύφους	$K_{cu} = 395$	W/m.°C
Συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας, μόνωσης	$K_{is} = 0,048$	W/m.°C
Θερμική αγωγιμότητα	C	W/m ² .°C
Συντελεστής λεπτού στρώματος	h	W/m ² .°C
Ολικός συντελεστής μετάδοσης θερμότητας	U	W/m ² .°C
Θερμική αντίσταση, ολική	R_t	°C/W
Συντελεστής θερμικής αντίστασης, σωλήνα ή κελύφους	μ_{cu}	m°C/W
Συντελεστής θερμικής αντίστασης/ μόνωσης	μ_{is}	m°C/W
Μοναδιαία θερμική αντίσταση στρώματος, σωλήνα ή κελύφους	m	m ² °C/W
Μοναδιαία θερμική αντίσταση στρώματος, μόνωσης	m_{is}	m ² °C/W
Μοναδιαία θερμική αντίσταση τοιχώματος	R	m ² °C/W
Μοναδιαία θερμική αντίσταση λεπτού στρώματος	m_h	m ² °C/W
Ολική μοναδιαία θερμική αντίσταση	R_o	m ² °C/W
Ενεργό μήκος μετάδοσης θερμότητας	L	m
Λόγος ακτίνων, σωλήνα	r2/r1	m/m
Λόγος ακτίνων, κελύφους	r2/r1	m/m
Λόγος ακτίνων, μόνωσης	r2/r1	m/m
Διάμετρος	D	m

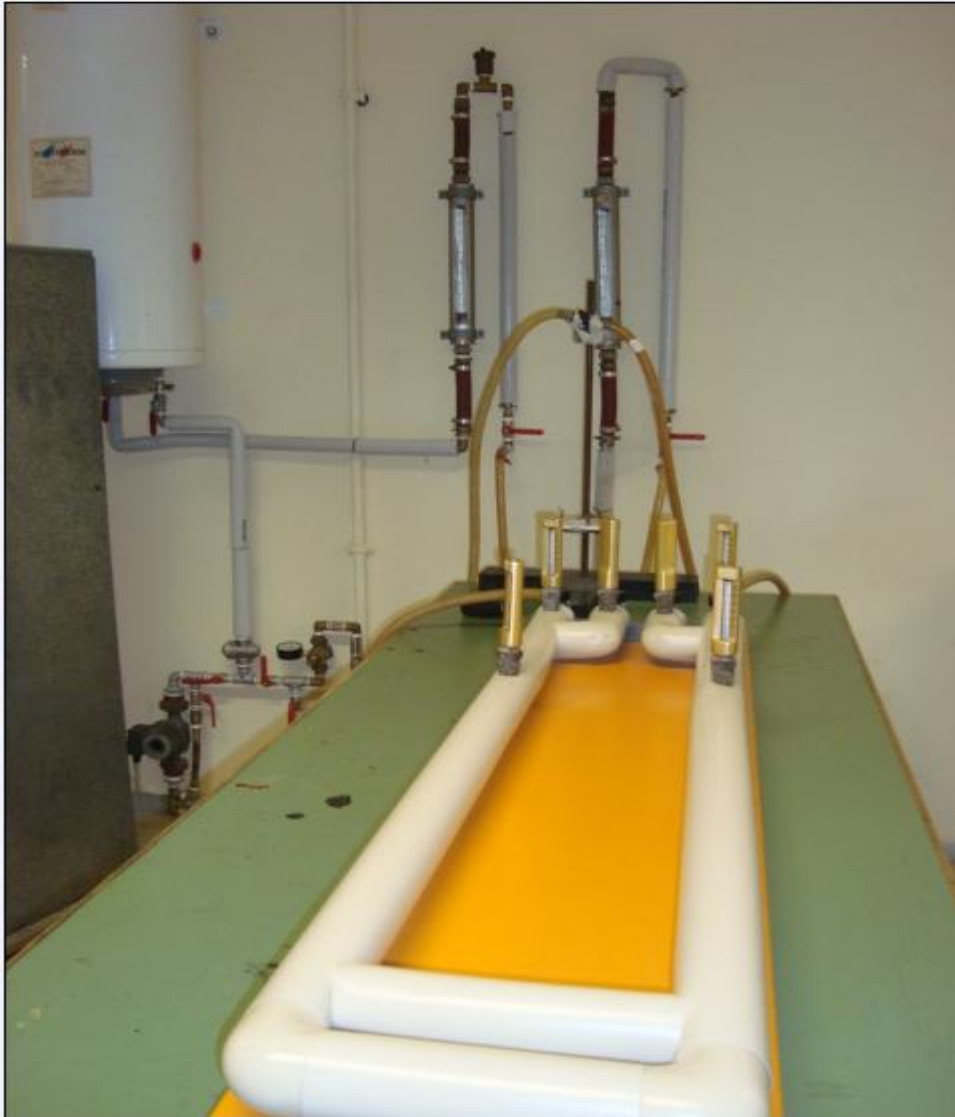
Επιφάνεια μετάδοσης θερμότητας, σωλήνα	A_t	m
Επιφάνεια μετάδοσης θερμότητας, σωλήνα	A_m	m^2
Επιφάνεια μετάδοσης θερμότητας, μόνωσης	A_{is}	m^2
Πάχος υλικού, σωλήνα	δ_t	m
Πάχος υλικού, κελύφους	δ_s	m
Πάχος υλικού, μόνωσης	δ_{is}	m
Θερμοκρασία	θ	$^{\circ}C$
Διαφορά θερμοκρασίας	$\Delta\theta$	$^{\circ}C$
Λογαριθμική μέση διαφορά θερμοκρασίας	$\Delta\theta_m$	$^{\circ}C$
Παροχή μάζας	M	Kg/s
Παροχή όγκου	V	m^3/s
Ταχύτητα ροής	c	m/s
Επιφάνεια ροής	A_s	m^2
Πυκνότητα	ρ	Kg/m^3
Χρόνος	t	s
Απόδοση, εναλλάκτη	n	%
Θερμοκρασιακή αποδοτικότητα, ψυχρού ρευστού	P_K	%
Θερμοκρασιακή αποδοτικότητα, θερμού ρευστού	P_V	%
Μέση θερμοκρασιακή αποδοτικότητα	P_m	%

Πίνακας 4.1: επεξήγηση/ μονάδες συμβόλων

4.2 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ

Στο εργαστήριο χρησιμοποιούμε εναλλάκτη θερμότητας τύπου κελύφους – σωλήνα (εικόνα 4.1). Αποτελείται από χάλκινους σωλήνες κατάλληλα συνδεδεμένους και στερεωμένους σε μία μεταλλική βάση. Είναι μονωμένος με “ Porolon ”. Τέσσερις πλαστικοί σωλήνες επιτρέπουν τη σύνδεσή του με παροχές ψυχρού και θερμού νερού και αποχέτευσης. Η ρύθμιση της ροής γίνεται με τέσσερις βαλβίδες και η

κατανομή της θερμοκρασίας μετριέται σε έξι θερμομέτρα. Οι παροχές μετρούνται με κατάλληλα ροόμετρα.



Εικόνα 4.1: εναλλάκτης θερμότητας

Προδιαγραφές του εναλλάκτη θερμότητας:

Σωλήνας (εξωτερική διάμετρος)..... $D = 10 \text{ mm}$

πάχος $\delta = 1 \text{ mm}$

Κέλυφος (εξωτερική διάμετρος)..... $D = 15 \text{ mm}$

πάχος $\delta = 1 \text{ mm}$

Μόνωση (εξωτερική διάμετρος)..... $D = 55 \text{ mm}$

πάχος $\delta = 20 \text{ mm}$

Ενεργό μήκος μετάδοσης θερμότητας..... $L = 2 \text{ m}$
Ανοιγμένη επιφάνεια μετάδοσης θερμότητας $A_t = 0,057 \text{ m}^2$
Μέγιστη πίεση λειτουργίας..... $P_{\max} = 1000 \text{ kPa}$
Μέγιστη θερμοκρασία λειτουργίας..... $\theta_{\max} = 80^\circ \text{ C}$.

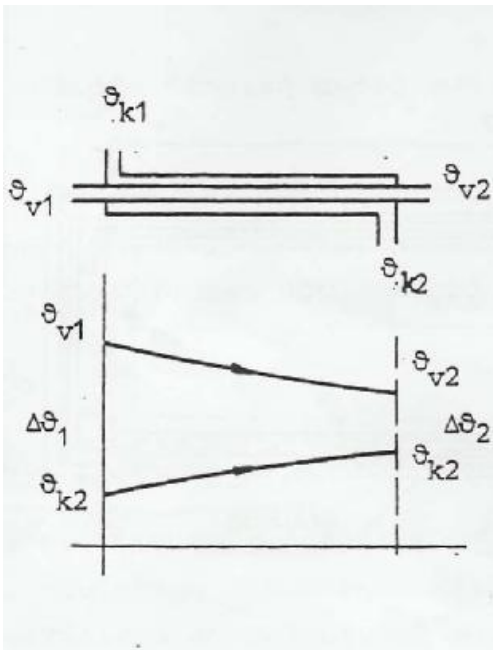
Η επιφάνεια μετάδοσης της θερμότητας αποτελείται από έναν αριθμό σωλήνων συνδεδεμένων παράλληλα. Οι σωλήνες περιβάλλονται από ένα κέλυφος. Τα δύο ρευστά που ανταλλάσσουν θερμότητα ρέουν αντίστοιχα μέσα και γύρω από τους σωλήνες.

Ανάλογα με την φορά κίνησης των δύο ρευστών οι εναλλάκτες διακρίνονται σε παράλληλης και αντιπαράλληλης ροής. Ένας εναλλάκτης μπορεί να χρησιμοποιηθεί για θέρμανση ή και για ψύξη ενός ρευστού. Στην πρώτη περίπτωση, η θερμότητα μεταδίδεται από το θερμό ρευστό που ρέει στους σωλήνες, στο ψυχρό ρευστό.

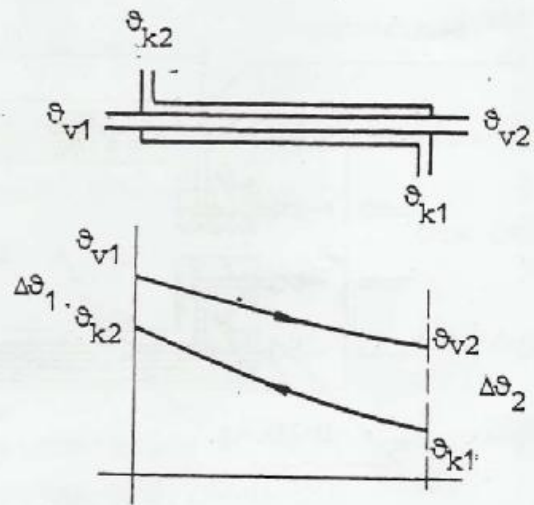


Εικόνα 4.2: Επεξηγηματική εικόνα διάταξης

- 1: είσοδος θερμού νερού
- 2: είσοδος / έξοδος ψυχρού νερού
- 3: είσοδος / έξοδος θερμού νερού
- 4: έξοδος θερμού νερού
- 5: μόνωση σωληνώσεων
- 6: θερμόμετρα μέτρησης θερμοκρασίας εισόδου και εξόδου του ρευστού
- 7: θερμόμετρα μέτρησης θερμοκρασίας κατά τη ροή



Σχήμα 4.1α



Σχήμα 4.1β

Σε ένα εναλλάκτη παράλληλης ροής (Σχήμα 4.1α) η θερμοκρασία του ψυχρού ρευστού δεν μπορεί να είναι ποτέ μεγαλύτερη της θερμοκρασίας του θερμού ρευστού. Αυτό είναι δυνατό και συμβαίνει πολλές φορές στους εναλλάκτες αντιπαράλληλης ροής (Σχήμα 4.1β). Σε κάθε σημείο ο ρυθμός της ροής της θερμότητας είναι συνάρτηση της διαφοράς θερμοκρασίας που υπάρχει εκεί, της επιφάνειας μετάδοσης και του ολικού συντελεστή μετάδοσης θερμότητας.

4.3 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

Ο εναλλάκτης βρίσκεται τοποθετημένος σε οριζόντια θέση κοντά σε παροχές θερμού και ψυχρού νερού και αποχέτευση. Με τους πλαστικούς σωλήνες που έχουν συνδέσμους και στα δύο άκρα τους συνδέονται οι παροχές ψυχρού και θερμού νερού με τις αντίστοιχες εισόδους του εναλλάκτη. Με τους άλλους δύο πλαστικούς σωλήνες συνδέονται οι έξοδοι με τα ροόμετρα.

Η παροχή όγκου και στους δύο κλάδους πρέπει να ρυθμίζεται μόνο από τις βαλβίδες εξόδου. Όλες οι άλλες βαλβίδες πρέπει να είναι τελείως ανοικτές την ώρα του πειράματος.

Μετρήσεις θερμοκρασιών δεν πρέπει να γίνονται πριν το σύστημα φθάσει σε μια σταθερή κατάσταση λειτουργίας.

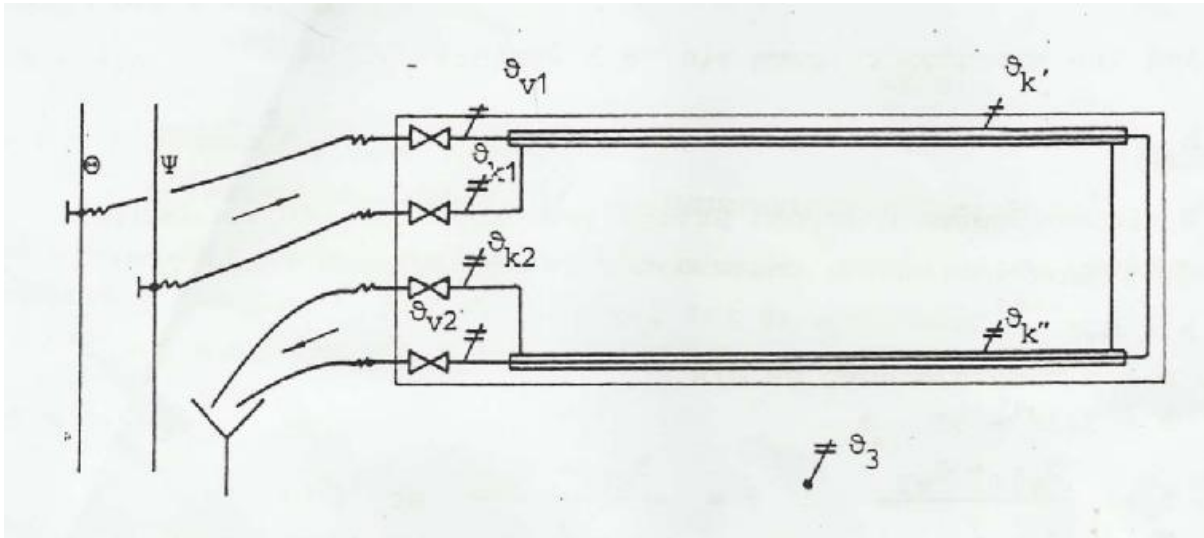
Μετά το τέλος κάθε άσκησης ο εναλλάκτης αποσυνδέεται και κενώνεται σηκώνοντάς τον, γιατί αν μείνει το νερό μέσα και εξατμισθεί θα δημιουργηθεί σιγά-σιγά ένα λεπτό στρώμα αλάτων στο εσωτερικό του και θα αλλοιωθούν τα χαρακτηριστικά του.

Αποφεύγετε να σηκώνετε τον εναλλάκτη από την μόνωση.

4.3.1 ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΠΑΡΑΛΛΗΛΗΣ ΡΟΗΣ

4.3.1.1 ΣΚΟΠΟΣ

Λειτουργία του εναλλάκτη με παράλληλη ροή και διάφορες ταχύτητες ροής. Μέτρηση ποσότητας ροής και θερμοκρασιών. Υπολογισμός παροχών και μάζας, μεταφερόμενης και απορροφούμενης θερμότητας.



Σχήμα 4.2

4.3.1.2 ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

Συνδέσαμε τον εναλλάκτη σύμφωνα με τις γενικές οδηγίες και το σχήμα 4.2. Ρυθμίσαμε τις ταχύτητες των ρευστών, ώστε σε κάθε μέτρηση να είναι σχεδόν ίσες στον πρωτεύοντα και τον δευτερεύοντα κλάδο. Μετρήσαμε την ποσότητα ροής και το χρόνο, καθώς επίσης και τις θερμοκρασίες για διάφορες ταχύτητες. Σημειώσαμε τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος.

4.3.1.3 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΙ

Οι μετρήσεις που πάρθηκαν κατά τη διάρκεια του πειράματος δίνονται παρακάτω :

Μετρηθείς Θερμοκρασία περιβάλλοντος : $\theta_3 = 22 \text{ }^\circ\text{C}$

Παράλληλη
ροή

Παροχή Όγκου V (lt/h)	$\Theta_{ν1}$ ($^{\circ}\text{C}$)	$\Theta_{ν2}$ ($^{\circ}\text{C}$)	$\Theta_{κ1}$ ($^{\circ}\text{C}$)	$\Theta_{κ2}$ ($^{\circ}\text{C}$)	$\Theta_{κ'}$ ($^{\circ}\text{C}$)	$\Theta_{κ''}$ ($^{\circ}\text{C}$)	Θ_3 ($^{\circ}\text{C}$)
24	62	48	22	36	22	34	22
14	60	44	22	36	22	34	22

Η ανώτατη ένδειξη παροχής όγκου στο παροχόμετρο του εργαστηρίου (εικόνα 4.3) είναι 100 μονάδες παροχής που αντιστοιχούν σε 1500 lt/h. Για την εκτέλεση του πειράματος χρειάστηκε να λάβουμε δυο μετρήσεις από το παροχόμετρο που αντιστοιχούν σε 24 και 14 μονάδες παροχής.



Εικόνα 4.3 : Παροχόμετρο

Η σειρά υπολογισμών που πρέπει να ακολουθήσουμε ώστε να γίνει η μέτρηση της τελικής απόδοσης του εναλλάκτη είναι η εξής:

Πρώτη μέτρηση: Παροχή : $v^{\&} = 24\%$

A) Παροχή Όγκου: $v^{\&} = 24/100 \times 1500 \text{ lt/h} = 360 \text{ lt/h}$

Μετατρέπουμε τις μονάδες παροχής σε lt/h

B) Παροχή Μάζας: $M^{\&} = v^{\&} \times \rho$

όπου ρ : η πυκνότητα του νερού στη μέση θερμοκρασία (διάγραμμα 4.1)

κρύο : θ_k (μέση θερμοκρασία) = $(\theta_{k1} + \theta_{k2} + \theta_{k'} + \theta_{k''})/4 = 28,5 \text{ }^\circ\text{C}$

ζεστό : θ_v (μέση θερμοκρασία) = $(\theta_{v1} + \theta_{v2})/2 = 55 \text{ }^\circ\text{C}$

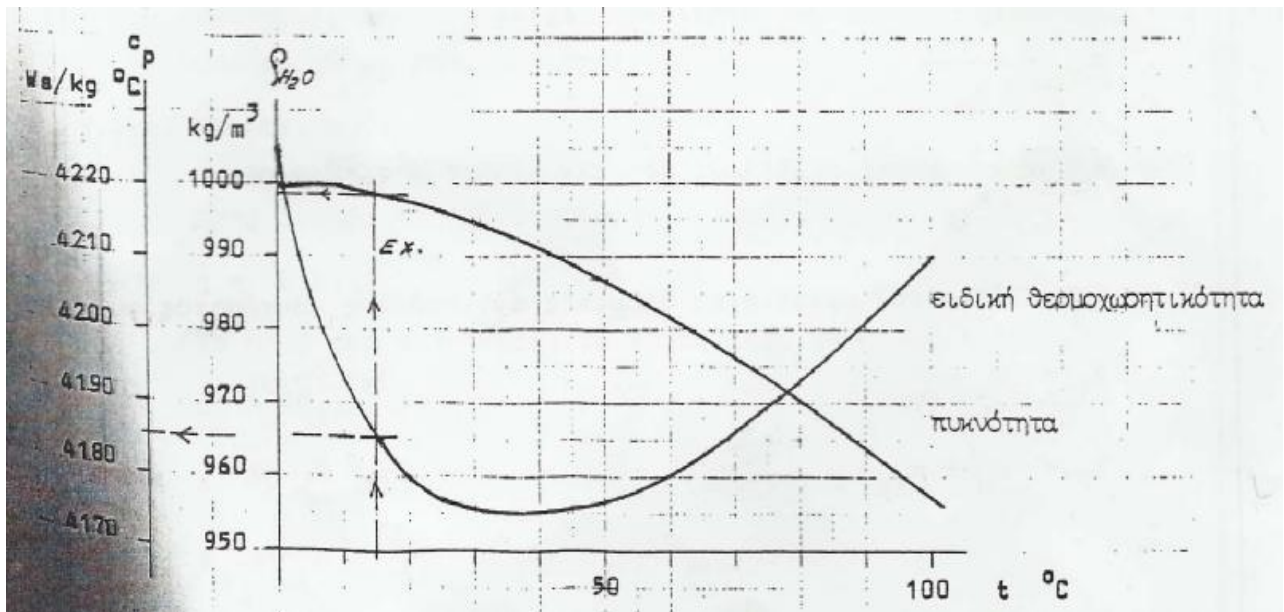
Από το διαγράμμα 4.2 για θερμοκρασία $55 \text{ }^\circ\text{C}$ $\rho_v = 985 \text{ kg/m}^3$

για θερμοκρασία $28,5 \text{ }^\circ\text{C}$ $\rho_k = 995 \text{ kg/m}^3$

Άρα :

$$M^{\&}_k = \rho_k \times v^{\&}_k = 328,35 \text{ kg/h}$$

$$M^{\&}_v = \rho_v \times v^{\&}_v = 325,05 \text{ kg/h}$$



Διάγραμμα 4.1: πυκνότητα και ειδική θερμοχωρητικότητα

Γ) Ρυθμός ροής απαγόμενης ενέργειας από το ρευστό :

$$\dot{Q}_a = M^{\&}_v \times C_p \Delta\theta_v$$

Από το διάγραμμα 4.2 και για μέση θερμοκρασία 14°C

με $C_p = 4185 \text{ Ws/kg}^{\circ}\text{C}$

$\Delta\theta_v = 14^{\circ}\text{C}$

Άρα

$$\dot{\Phi}_a = 5290,18 \text{ W}$$

Δ) Ρυθμός ροής αναρροφούμενης θερμότητας :

$$\dot{\Phi}_u = \dot{M}_k \times C_p \Delta\theta_k$$

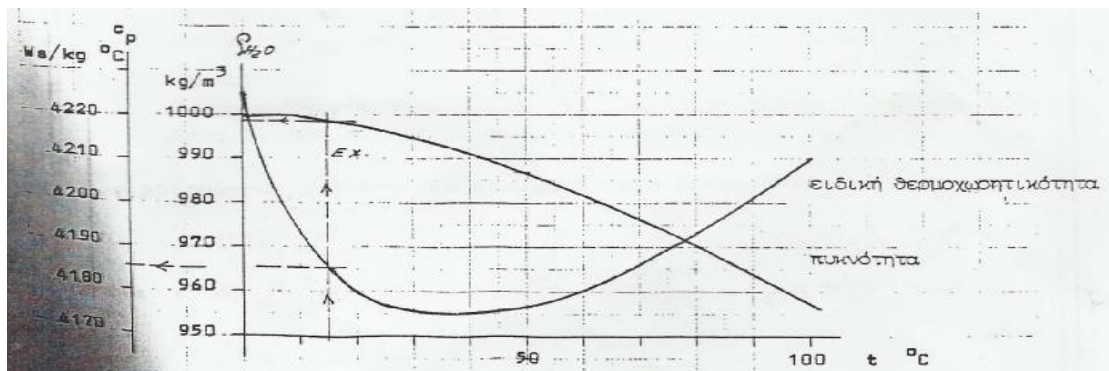
Η ειδική θερμότητα c_p για θερμοκρασία 14°C δίνεται από το διάγραμμα 4.2 για τη μέση θερμοκρασία κάθε ρευστού:

$\Delta\theta_k = 14^{\circ}\text{C}$

με $C_p = 4178 \text{ Ws/kg}^{\circ}\text{C}$

Άρα

$$\dot{\Phi}_u = 5334.95 \text{ W}$$



Διάγραμμα 4.2 : ειδική θερμοχωρητικότητα

Ε) Απόδοση :

$$\eta = \dot{\phi}_u / \dot{\phi}_a \times 100\%$$

$$\eta \approx 100\%$$

Δεύτερη μέτρηση : παροχή : $\dot{v}^k = 14\%$

Α) Παροχή Όγκου : $\dot{v}^k = 14/100 \times 1500 = 210 \text{ lt/h}$

Μετατρέπουμε τις μονάδες παροχής σε lt/h

Β) Παροχή Μαζας : $\dot{M}^k = \dot{v}^k \times \rho$

όπου ρ : η πυκνότητα στη μέση θερμοκρασία (διάγραμμα 4.1)

κρύο : θ_k (μέση θερμοκρασία) = 28.5 °C

ζεστό : θ_v (μέση θερμοκρασία) = 52 °C

Από διάγραμμα 4.1 και για θερμοκρασία 52 °C : $\rho_v = 987 \text{ kg/m}^3$

για θερμοκρασία 28.5 °C : $\rho_k = 996 \text{ kg/m}^3$

Άρα :

$$\dot{M}^k_k = \rho_k \times \dot{v}^k_k = 179,28 \text{ kg/h}$$

$$\dot{M}^k_v = \rho_v \times \dot{v}^k_v = 177,66 \text{ kg/h}$$

Γ) Ρυθμός ροής απαγόμενης ενέργειας από το ρευστό :

$$\dot{\phi}_a = \dot{M}^k_v \times C_p \Delta\theta_v$$

Από το διάγραμμα 4.2 και για θερμοκρασία 16 °C

με $C_p = 4185 \text{ Ws/kg}^\circ\text{C}$ (στη μέση θερμοκρασία)

$$\Delta\theta_v = 16^\circ\text{C}$$

Άρα

$$\dot{\phi}_a = 3304.47 \text{ W}$$

Δ) Ρυθμός ροής απορροφούμενης θερμότητας :

$$\dot{\phi}_u = \dot{M}_k \times C_p \Delta\theta_k$$

Από το διάγραμμα 4.2 και για μέση θερμοκρασία 14 °C
με $C_p = 4178 \text{ Ws/kg}^\circ\text{C}$

$$\Delta\theta_k = 14^\circ\text{C}$$

Άρα

$$\dot{\phi}_u = \mathbf{2916.38 \text{ W}}$$

Ε) Απόδοση :

$$n = \dot{\phi}_u / \dot{\phi}_a \times 100\% \Rightarrow \mathbf{n \approx 88.25\%}$$

Συγκεντρωτικός πίνακας

Παροχή όγκου (στο κρύο) \dot{V}_k (lt/h)	Παροχή μάζας (στο κρύο) \dot{M}_k (kg/h)	Παροχή όγκου (στο ζεστό) \dot{V}_v (lt/h)	Παροχή μάζας (στο ζεστό) \dot{M}_v (kg/h)	Ρυθμός ροής θερμότητας, απαγόμενη $\dot{\Phi}_a$ (W)	Ρυθμός ροής θερμότητας, απορροφούμενη $\dot{\Phi}_u$ (W)	n Ποσοστό %
360	328,35	360	325,05	5290,18	5025,5	95
210	179,28	210	177,66	3304,47	2916,38	88,25

Οι μετρήσεις των παραπάνω ποσοτήτων πάρθηκαν για την περίπτωση της παράλληλης ροής. Το πείραμα διεξήχθη με δύο διαφορετικούς όγκους παροχής, για το κρύο και για το ζεστό νερό.

Συγκεκριμένα στην πρώτη περίπτωση η παροχή ανέρχεται στα 360 lt/h και για την παροχή του κρύου και για την παροχή του ζεστού. Η τιμή του ρυθμού ροής απαγόμενης ενέργειας ($\dot{\Phi}_a$) από το ρευστό μετρήθηκε 5290,18 W/ m °C ενώ ο ρυθμός ροής αναρροφούμενης θερμότητας ($\dot{\Phi}_u$) μετρήθηκε 5025,5 W/ m °C.

Η απόδοση (n) που προκύπτει από τις παραπάνω μετρήσεις υπολογίστηκε 95%. Στη δεύτερη περίπτωση που η παροχή μειώθηκε στα 210 lt/h μετρήθηκε η ροή απαγόμενης ενέργεια 3304,47 W/ m °C ενώ η ροή αναρροφούμενης θερμότητας μετρήθηκε 2916,38 W/ m °C με απόδοση 88,25%.

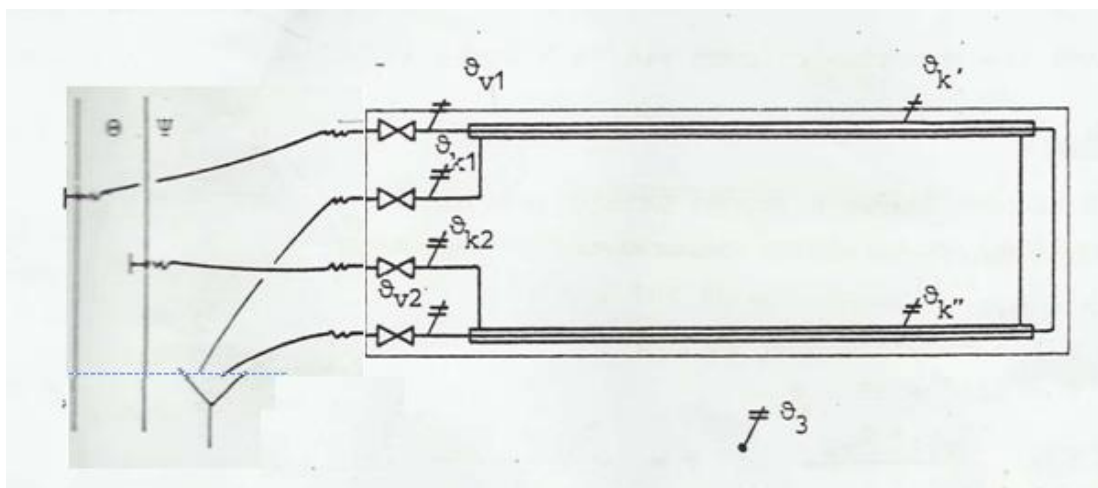
4.3.2 ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΑΝΤΙΠΑΡΑΛΛΗΛΗΣ ΡΟΗΣ

4.3.2.1 ΣΚΟΠΟΣ

Λειτουργία του εναλλάκτη με αντιπαράλληλη ροή και διάφορες ταχύτητες ροής. Μέτρηση ποσοτήτων νερού και θερμοκρασιών. Υπολογισμός παροχών όγκου και μάζας, απαγόμενης και απορροφούμενης θερμότητας και απόδοσης.

4.3.2.2 ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

Συνδέσαμε τον εναλλάκτη σύμφωνα με τις γενικές οδηγίες και το σχήμα 4.3. Ρυθμίσαμε τις ταχύτητες των ρευστών, ώστε σε κάθε μέτρηση να είναι σχεδόν ίσες στον πρωτεύοντα και τον δευτερεύοντα κλάδο. Μετρήσαμε την ποσότητα ροής και το χρόνο, καθώς επίσης και τις θερμοκρασίες για διάφορες ταχύτητες. Σημειώσαμε τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος.



Σχήμα 4.3

4.3.2.3 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΙ

Οι μετρήσεις που πάρθηκαν κατά τη διάρκεια του πειράματος δίνονται παρακάτω :

Μερτηθείσα θερμοκρασία περιβάλλοντος : $\theta_3 = 22 \text{ }^\circ\text{C}$

Αντιπαράλληλη ροή

Παροχή Όγκου V (lt/h)	θ_{v1} ($^\circ\text{C}$)	θ_{v2} ($^\circ\text{C}$)	θ_{k1} ($^\circ\text{C}$)	θ_{k2} ($^\circ\text{C}$)	$\theta_{k'}$ ($^\circ\text{C}$)	$\theta_{k''}$ ($^\circ\text{C}$)	θ_3 ($^\circ\text{C}$)
24	64	46	22	36	22	32	22
14	64	44	22	40	22	32	22

Η ανώτατη ένδειξη παροχής όγκου στο παροχόμετρο (εικόνα 4.3) του εργαστηρίου όπως και στην περίπτωση της παράλληλης ροής είναι 100 μονάδες παροχής που αντιστοιχούν σε 1500 lt/h.

Για την εκτέλεση του πειράματος χρειάστηκε να λάβουμε δυο μετρήσεις από το παροχόμετρο που αντιστοιχούν σε 24 και 14 μονάδες παροχής.

Για παροχή : $v^{\&} = 24\%$

Α) Παροχή Όγκου : $v^{\&} = 24/100 \times 1500 = 360 \text{ lt/h}$

Β) Παροχή Μαζας : $M^{\&} = v^{\&} \times \rho$

όπου ρ : η πυκνότητα στη μέση θερμοκρασία (διάγραμμα 4.1)

κρύο : θ_k (μέση) $= (22+36+22+32) = 28 \text{ }^\circ\text{C}$

ζεστό : θ_v (μέση) $= (64+46) = 55 \text{ }^\circ\text{C}$

Από το διάγραμμα 4.2 για θερμοκρασία $55 \text{ }^\circ\text{C}$ $\rho_v = 985 \text{ kg/m}^3$

για θερμοκρασία 28 °C $\rho_k = 995 \text{ kg/m}^3$

Άρα :

$$\dot{M}_k = \rho_k \times \dot{V}_k = 328,35 \text{ kg/h}$$

$$\dot{M}_v = \rho_v \times \dot{V}_v = 325,05 \text{ kg/h}$$

Γ) Ρυθμός ροής απαγόμενης ενέργειας από το ρευστό :

$$\dot{\Phi}_a = \dot{M}_v \times C_p \Delta\theta_v$$

Από το διάγραμμα 4.2 και για μέση θερμοκρασία 18°C

με $C_p = 4183 \text{ Ws/kg}^\circ\text{C}$ (στη μέση θερμοκρασία)

$$\Delta\theta_v = 18^\circ\text{C}$$

Άρα

$$\dot{\Phi}_a = \mathbf{6798,42 \text{ W}}$$

Δ) Ρυθμός ροής απορροφούμενης θερμότητας :

$$\dot{\Phi}_u = \dot{M}_k \times C_p \Delta\theta_k$$

Η ειδική θερμότητα C_p για θερμοκρασία 14°C δίνεται από το διάγραμμα 4.2 για τη μέση θερμοκρασία κάθε ρευστού:

με $C_p = 4178 \text{ Ws/kg}^\circ\text{C}$ (στη μέση θερμοκρασία)

$$\Delta\theta_k = 14^\circ\text{C}$$

Άρα

$$\dot{\Phi}_u = 5334,95 \text{ W}$$

Ε) Απόδοση :

$$\eta = \dot{\Phi}_u / \dot{\Phi}_a \times 100\%$$

$$\eta \approx 78,5\%$$

Για παροχή : $v^k = 14\%$

Α) Παροχή Όγκου : $v^k = 14/100 \times 1500 = 210 \text{ lt/h}$

Μετατρέπουμε τις μονάδες παροχής σε lt/h

Β) Παροχή Μαζας: $M^k = v^k \times \rho$

όπου ρ : η πυκνότητα στη μέση θερμοκρασία (διάγραμμα 4.1)

κρύο : θ_k (μέση) = 28°C

ζεστό : θ_v (μέση) = 54°C

Από διάγραμμα 4.1 και για θερμοκρασία 54°C : $\rho_v = 995 \text{ kg/m}^3$

για θερμοκρασία 28°C $\rho_k = 996 \text{ kg/m}^3$

Άρα :

$$\dot{M}_k = \rho_k \times \dot{V}_k = 179,28 \text{ kg/h}$$

$$\dot{M}_v = \rho_v \times \dot{V}_v = 179,1 \text{ kg/h}$$

Γ) Ρυθμός ροής απαγόμενης ενέργειας από το ρευστό :

$$\dot{\phi}_a = \dot{M}_v \times C_p \Delta\theta_v$$

Από το διάγραμμα 4.2 και για μέση θερμοκρασία 20°C
με $C_p = 4180 \text{ Ws/kg}^\circ\text{C}$ (στη μέση θερμοκρασία)

$$\Delta\theta_v = 20^\circ\text{C}$$

Άρα

$$\dot{\phi}_a = \mathbf{4163,28 \text{ W}}$$

Δ) Ρυθμός ροής απορροφούμενης θερμότητας :

$$\dot{\phi}_u = \dot{M}_k \times C_p \Delta\theta_k$$

Από το διάγραμμα 4.2 και για μέση θερμοκρασία 18°C
με $C_p = 4183 \text{ Ws/kg}^\circ\text{C}$ (στη μέση θερμοκρασία)

$$\Delta\theta_k = 18^\circ\text{C}$$

Άρα

$$\dot{\phi}_u = \mathbf{3745,87 \text{ W}}$$

Ε) Απόδοση :

$$n = \dot{\phi}_u / \dot{\phi}_a \times 100\%$$

$$\mathbf{n \approx 89\%}$$

Συγκεντρωτικός πίνακας

Παροχή όγκου (στο κρύο) \dot{V}_k (lt/h)	Παροχή μάζας (στο κρύο) \dot{M}_k (kg/h)	Παροχή όγκου (στο ζεστό) \dot{V}_v (lt/h)	Παροχή μάζας (στο ζεστό) \dot{M}_v (kg/h)	Ρυθμός ροής θερμότητας, απαγώμενη $\dot{\Phi}_a$ (W)	Ρυθμός ροής θερμότητας, απορροφούμενη $\dot{\Phi}_u$ (W)	Απόδοση
lt/h	kg/h	lt/h	kg/h	W	W	%
360	328,58	360	324,17	6798,4 2	5334,9 5	78,5
210	179,28	210	179,1	4163,2 8	3745,8 7	89

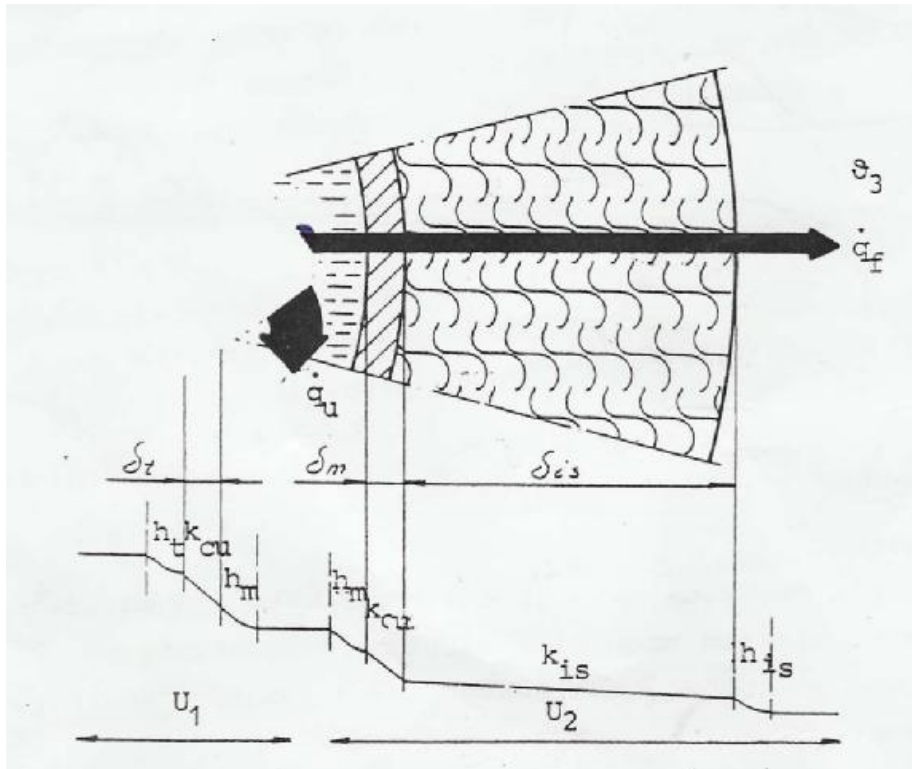
4.3.3 ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΕΣ ΛΕΠΤΟΥ ΣΤΡΩΜΑΤΟΣ ΚΑΙ ΟΛΙΚΩΝ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΩΝ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ

4.3.3.1 ΣΚΟΠΟΣ

Υπολογισμός των συντελεστών λεπτού στρώματος και των ολικών συντελεστών μετάδοσης θερμότητας στον εναλλάκτη.

4.3.3.2 ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

Επαναλαμβάνουμε τα πειράματα της παράλληλης και της αντιπαράλληλης ροής. Οι υπολογισμοί για τον προσδιορισμό των ζητούμενων συντελεστών βασίζονται σε μετρήσεις παροχών όγκου και θερμοκρασιών και για τις δύο περιπτώσεις παράλληλης και αντιπαράλληλης ροής (Σχήμα 4.3).



Σχήμα 4.3

4.3.3.3 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΙ

Στην περίπτωση του εναλλάκτη πρέπει να ξεχωρίσουμε δύο ολικούς συντελεστές μετάδοσης θερμότητας, έναν για την επιθυμητή ροή θερμότητας από το νερό του σωλήνα στο νερό του κελύφους (U_1) και έναν για τις απώλειες από εκεί προς το περιβάλλον, (U_2). Η ροή της θερμότητας δίνεται σχηματικά στο σχήμα 10 για παράλληλη ή αντιπαράλληλη λειτουργία.

Σύμφωνα με το θεωρητικό μέρος, μπορούμε να γράφουμε τις ακόλουθες σχέσεις

Ισχύει ότι :

$$1/U_1 = \{ 1/(h_t \times r_{1t}) + \delta_t/(K_{CU} \times r_{1t}) + 1/(h_m \times r_{2t}) \} \times r_{1t} \quad (i)$$

Και :

$$1/U_2 = \{ 1/(h_m \times r_{1m}) + \delta_m/(K_{Cu} \times r_{1m}) + \delta_{is}/(K_{is} \times r_{1is}) + 1/(h_{is} \times r_{1mis}) \} \\ \times r_{1t} \quad (\text{ii})$$

Τα h_t και h_m υπολογίζονται από τη σχέση του Stender :

$$h = B \times c^{0,87} \text{ (W/m}^2 \times \text{°C)}$$

Ενώ τα c_t και c_m από το διάγραμμα για τη σχετική παροχή όγκου είναι :

$$B = 3370 + 55 \times \theta$$

$$\text{όπου } \theta = (\theta_{v1} + \theta_{v2}) / 2 \text{ ή } (\theta_{κ1} + \theta_{κ2}) / 2 \text{ σε } \text{°C}$$

τα υπόλοιπα μεγέθη που θα χρειαστούν είναι :

$$r_{1t} = 4 \text{ mm} = 4 \times 10^{-3} \text{ m}$$

$$\delta_t = 1 \text{ mm} = 10^{-3} \text{ m}$$

$$r_{2t} = 5 \text{ mm} = 5 \times 10^{-3} \text{ m}$$

$$r_{1m} = 6,5 \text{ mm} = 6,5 \times 10^{-3} \text{ m}$$

$$\delta_m = 1 \text{ mm} = 10^{-3} \text{ m}$$

$$\delta_{is} = 20 \text{ mm} = 2 \times 10^{-2} \text{ m}$$

$$r_{\text{lis}} = \sqrt{2} \text{ m} = 7,5 \times 10^{-3} \text{ m}$$

$$K_{\text{Cu}} = 395 \text{ W / m} \times \text{°C}$$

$$K_{\text{is}} = 0,048 \text{ W / m} \times \text{°C}$$

$$h_{\text{is}} = 4,5 \text{ W / m}^2 \times \text{°C}$$

Από το διάγραμμα για την παροχή όγκου (διάγραμμα 4.3) υπολογίζονται οι ταχύτητες :

- Για $v^{\&} = 330 \text{ lt / h} = 5,5 \text{ lt / min}$ οπότε

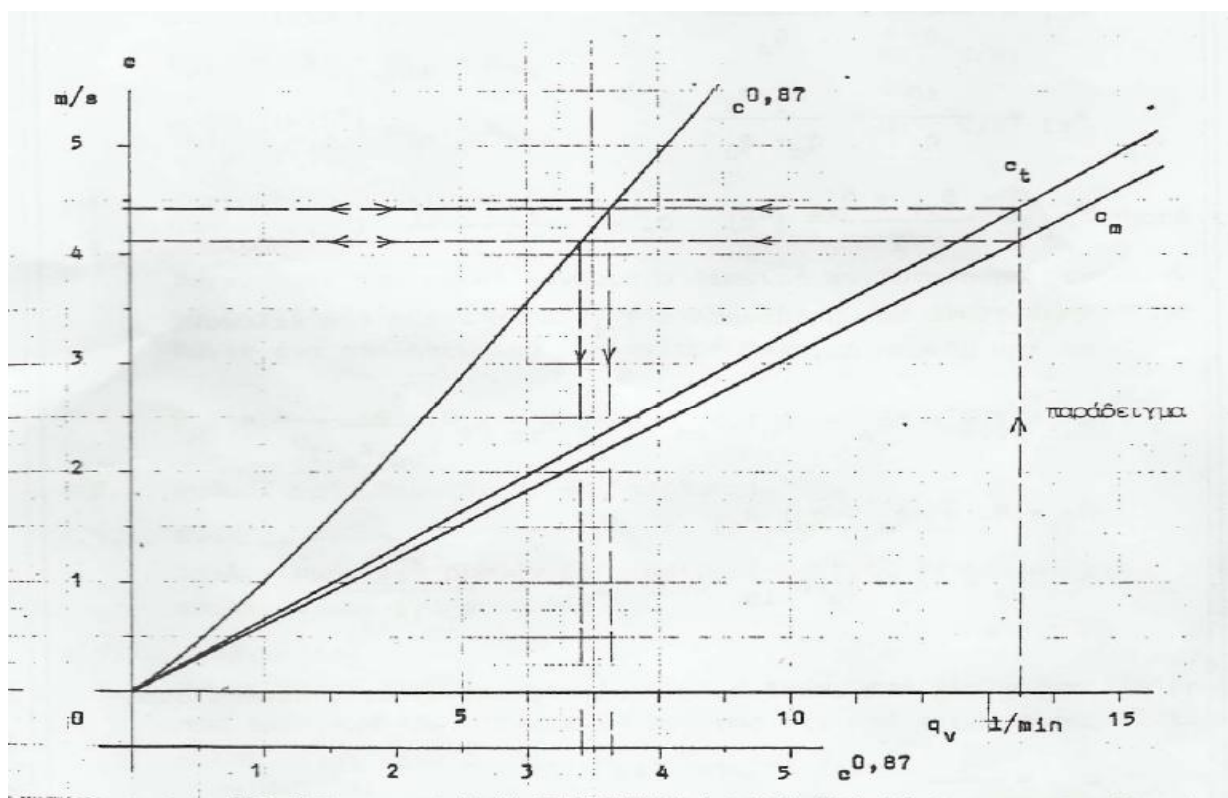
$$C_m^{0,87} = 1,55 \text{ m / s}$$

$$C_t^{0,87} = 1,65 \text{ m / s}$$

- Για $v^{\&} = 180 \text{ lt / h} = 3 \text{ lt / min}$ οπότε

$$C_m^{0,87} = 0,912 \text{ m / s}$$

$$C_t^{0,87} = 1,0 \text{ m / s}$$



Διάγραμμα 3: παροχή όγκου- ταχύτητας

I. Παράλληλη ροή

A) Για $\dot{V} = 5,5 \text{ lt / min}$

$$\theta_v = (\theta_{v1} + \theta_{v2}) / 2 = 51,5 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\text{οπότε : } B = 3370 + 55 \times 51,5 = 6202,5$$

$$\text{άρα : } h_t = 1,65 \times 6202,5 = 10234,125 \text{ W / m}^2 \times \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\theta_k = (\theta_{k1} + \theta_{k2}) / 2 = 28 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\text{οπότε : } B = 3370 + 55 \times 28 = 4910$$

$$\text{άρα : } h_m = 1,55 \times 4910 = 7610,5 \text{ W / m}^2 \times \text{ }^\circ\text{C}$$

έτσι αντικαθιστώντας στις σχέσεις (i) και (ii) προκύπτει :

$$U_1 = 4873,29 \text{ W / m}^2 \times \text{ }^\circ\text{C}$$

$$U_2 = 2,9343 \text{ W / m}^2 \times \text{ }^\circ\text{C}$$

B) Για $\dot{V} = 3 \text{ lt / min}$

$$\theta_v = (\theta_{v1} + \theta_{v2}) / 2 = 55 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\text{οπότε : } B = 3370 + 55 \times 55 = 6395$$

$$\text{άρα : } h_t = 1 \times 6395 = 6395 \text{ W / m}^2 \times \text{°C}$$

$$\theta_k = (\theta_{k1} + \theta_{k2}) / 2 = 29,5 \text{ °C}$$

$$\text{οπότε : } B = 3370 + 55 \times 29,5 = 4992,5$$

$$\text{άρα : } h_m = 0,912 \times 4992,5 = 4553,16 \text{ W / m}^2 \times \text{°C}$$

έτσι αντικαθιστώντας στις σχέσεις (i) και (ii) προκύπτει :

$$U_1 = 2990,43 \text{ W / m}^2 \times \text{°C}$$

$$U_2 = 2,9342 \text{ W / m}^2 \times \text{°C}$$

II. Αντιπαράλληλη ροή

A) Για $\dot{V} = 5,5 \text{ lt / min}$

$$\theta_v = (\theta_{v1} + \theta_{v2}) / 2 = 61,5 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\text{οπότε : } B = 3370 + 55 \times 61,5 = 6752,5$$

$$\text{άρα : } h_t = 1,65 \times 6752,5 = 11141,625 \text{ W / m}^2 \times \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\theta_k = (\theta_{k1} + \theta_{k2}) / 2 = 31 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\text{οπότε : } B = 3370 + 55 \times 31 = 5075$$

$$\text{άρα : } h_m = 1,55 \times 5075 = 7866,25 \text{ W / m}^2 \times \text{ } ^\circ\text{C}$$

έτσι αντικαθιστώντας στις σχέσεις (i) και (ii) προκύπτει :

$$U_1 = 5159,96 \text{ W / m}^2 \times \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$U_2 = 2,9343 \text{ W / m}^2 \times \text{ } ^\circ\text{C}$$

B) Για $\dot{V} = 3 \text{ lt / min}$

$$\theta_v = (\theta_{v1} + \theta_{v2}) / 2 = 54 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\text{οπότε : } B = 3370 + 55 \times 54 = 6340$$

$$\text{άρα : } h_t = 1 \times 6340 = 6340 \text{ W / m}^2 \times \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\theta_k = (\theta_{k1} + \theta_{k2}) / 2 = 30 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\text{οπότε : } B = 3370 + 55 \times 30 = 5020$$

$$\text{άρα : } h_m = 0,912 \times 5020 = 4578,24 \text{ W / m}^2 \times \text{ }^\circ\text{C}$$

έτσι αντικαθιστώντας στις σχέσεις (i) και (ii) προκύπτει :

$$U_1 = 2985,97 \text{ W / m}^2 \times \text{ }^\circ\text{C}$$

$$U_2 = 2,9342 \text{ W / m}^2 \times \text{ }^\circ\text{C}$$

Συγκεντρωτικά αποτελέσματα παρουσιάζονται στον πίνακα που ακολουθεί :

	Παροχή όγκου	Ταχύτη τα ροής	Απόδοση, εναλλάκτη	Παροχή όγκου	Ταχύτη τα ροής	Απόδοση εναλλάκτη	Ολικός συντελεστής μετάδοσης θερμότητας	Ολικός συντελεστής μετάδοσης θερμότητας
	\dot{V}_v (lt/h)	C_t (m/s)	h_t $W/m^2 \cdot ^\circ C$	\dot{V}_k (lt/h)	C_m (m/s)	h_m $W/m^2 \cdot ^\circ C$	U_1 $W/m^2 \cdot ^\circ C$	U_2 $W/m^2 \cdot ^\circ C$
Παράλληλη	5,5	1,65	10234,12 5	5,5	1,5 5	7610,5	4873,29	2,9343
Παράλληλη	3	1,0	6395	3	0,9 12	4553,16	2990,43	2,9343
Αντιπαράλληλη	5,5	1,6 5	11141,62 5	5,5	1,5 5	7866,25	5159,96	2,9343
Αντιπαράλληλη	3	1,0	6340	3	0,91 2	4578,24	2985,97	2,9342
Μέση τιμή	-	-	-	-	-	-	4002,41	2,9343

Ένα ουσιαστικό εξαγόμενο σχόλιο είναι ότι το U_1 σε έκαστη περίπτωση είναι κατά πολύ μεγαλύτερο του U_2 . Η τιμή του U_2 εξαρτάται σε ελάχιστο βαθμό από αυτή του h_m σε κάθε περίπτωση. Κυρίως η γεωμετρία του εναλλάκτη και οι σταθερές τιμές των μεγεθών K_{Cu} , K_{is} , h_{is} είναι αυτά που καθορίζουν πρακτικά την τιμή του h_m και για το λόγο αυτό παρατηρούμε ότι η τιμή αυτή παραμένει ουσιαστικά σταθερή. Η

μεγάλη διαφορά ανάμεσα στις τιμές του U_1 και του U_2 υποδηλώνει ότι υπάρχει μεγάλος ρυθμός ροής θερμότητας από το ζεστό στο κρύο νερό και μικρός ρυθμός ροής θερμότητας προς το περιβάλλον.

Οι τιμές των μεγεθών h_t , h_m , U_1 , μειώνονται καθώς η παροχή ελαττώνεται. Σε περίπτωση που αυξηθεί το πάχος του μονωτικού υλικού το U_2 θα υποστεί ελάττωση. Σε περίπτωση που θελήσουμε να ρίξουμε την τιμή του U_2 στο μισό της τιμής του τότε, έστω στην αντιπαράλληλη ροή, θα ισχύει :

$$\frac{1}{U_2/2} = \left\{ \frac{1}{4578,24 \times 6,5 \times 10^{-3}} + \frac{10^{-3}}{395 \times 6,5 \times 10^{-3}} + \frac{d_{is}}{0,048 \times 7,5 \times 10^{-3}} + \frac{1}{4,5 \times 7,5 \times 10^{-3}} \right\} \times 4 \times 10^{-3} \Rightarrow \delta_{is} = 5,067 \times 10^{-2} \text{ m}$$

4.3.4 ΟΛΙΚΗ ΜΟΝΑΔΙΑΙΑ ΘΕΡΜΙΚΗ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ

4.3.4.1 ΣΚΟΠΟΣ

Σκοπός είναι ο προσδιορισμός της ολικής θερμικής αντίστασης και της ολικής μοναδιαίας θερμικής αντίστασης του εναλλάκτη.

4.3.4.2 ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

Υπολογίζουμε τις ολικές θερμικές αντιστάσεις χρησιμοποιώντας τις προηγούμενες τιμές για τους ρυθμούς θερμότητας και τις θερμοκρασίες.

4.3.4.3 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΙ

I. Παράλληλη ροή

- Για $\dot{V} = 5,5 \text{ lt/min}$

α) Θερμικές Αντιστάσεις :

$$R_{t1} = (\theta_1 - \theta_2) / \dot{\Phi}_\alpha$$

$$R_{t2} = (\theta_2 - \theta_3) / (\dot{\Phi}_\alpha - \dot{\Phi}_u)$$

Με $\theta_1 = (\theta_{v1} + \theta_{v2}) / 2$ και $\theta_2 = (\theta_{κ1} + \theta_{κ2}) / 2$ και με βάση τα αποτελέσματα από τα προηγούμενα ερωτήματα και τις μετρήσεις έχουμε :

$$\theta_1 = 51,5^\circ\text{C} , \theta_2 = 28^\circ\text{C} \text{ οπότε καταλήγει :}$$

$$R_{t1} = 4,11 \times 10^{-3} \text{ }^\circ\text{C/W}$$

$$R_{t2} = 1,33 \times 10^{-2} \text{ }^\circ\text{C/W}$$

β) Θερμοκρασία θ_{v4} στην επαφή του κελύφους με τη μόνωση :

$$\theta_2 - \theta_{v4} = (\dot{\Phi}_\alpha - \dot{\Phi}_u) \times R_{tm} \text{ και } R_{tm} = \delta_m / K_{Cu} \times A_m$$

άρα έχουμε $R_{tm} = 10^{-3} / (395 \times 2\pi \times 15 \times 10^{-3}) \Rightarrow R_{tm} = 2,637 \times 10^{-5}$
°C/W

και $\theta_{v4} = 28 - (5712,06 - 6087,01) \times 2,637 \times 10^{-5} \Rightarrow \theta_{v4} = 27,99$ °C

γ) Μοναδιαίες Θερμικές Αντιστάσεις Λεπτού Στρώματος :

$m_{ht} = 1 / h_t = 1 / 10234,125 \Rightarrow m_{ht} = 9,77 \times 10^{-5}$ (m² × °C) / W

$m_{hm} = 1 / h_m = 1 / 7610,5 \Rightarrow m_{hm} = 1,31 \times 10^{-4}$ (m² × °C) / W

$m_{his} = 1 / h_{is} = 1 / 4,5 \Rightarrow m_{his} = 0,22$ (m² × °C) / W

δ) Μοναδιαίες Θερμικές Αντιστάσεις Τοιχώματος :

$R_1 = m_t = \delta_t / K_{cu} = 10^{-3} / 395 \Rightarrow R_1 = 2,53 \times 10^{-6}$ (m² × °C) / W

$R_2 = m_m + m_{is} = \delta_m / K_{cu} + \delta_{is} / K_{is} \Rightarrow R_2 = 0,4167$ (m² × °C) / W

ε) Ολικές Μοναδιαίες Θερμικές Αντιστάσεις :

$$R_{01} = R_1 + m_{ht} + m_{hm} \Rightarrow R_{01} = 2,31 \times 10^{-4} (\text{m}^2 \times ^\circ\text{C}) / \text{W}$$

$$R_{02} = R_2 + m_{hm} + m_{his} \Rightarrow R_{02} = 0,6368 (\text{m}^2 \times ^\circ\text{C}) / \text{W}$$

- 2. Για $\dot{V} = 3 \text{ lt/min}$

α) Θερμικές Αντιστάσεις :

$$R_{t1} = (\theta_1 - \theta_2) / \dot{\Phi}_\alpha$$

$$R_{t2} = (\theta_2 - \theta_3) / (\dot{\Phi}_\alpha - \dot{\Phi}_u)$$

Με $\theta_1 = (\theta_{v1} + \theta_{v2}) / 2$ και $\theta_2 = (\theta_{κ1} + \theta_{κ2}) / 2$ και με βάση τα αποτελέσματα από τα προηγούμενα ερωτήματα και τις μετρήσεις έχουμε :

$$\theta_1 = 55^\circ\text{C} , \theta_2 = 29,5^\circ\text{C} \text{ οπότε καταλήγει :}$$

$$R_{t1} = 5,61 \times 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C/W}$$

$$R_{t2} = 1,1 \times 10^{-2} \text{ } ^\circ\text{C/W}$$

β) Θερμοκρασία θ_{v4} στην επαφή του κελύφους με τη μόνωση :

$$\theta_2 - \theta_{v4} = (\phi_\alpha - \phi_u) \times R_{tm} \text{ και } R_{tm} = \delta_m / K_{Cu} \times A_m$$

$$\text{άρα έχουμε } R_{tm} = 10^{-3} / (395 \times 2\pi \times 15 \times 10^{-3}) \Rightarrow R_{tm} = 2,637 \times 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C/W}$$

$$\text{και } \theta_{v4} = 29,5 - (4542,11 - 3952,96) \times 2,637 \times 10^{-5} \Rightarrow \theta_{v4} = 29,48 \text{ } ^\circ\text{C}$$

γ) Μοναδιαίες Θερμικές Αντιστάσεις Λεπτού Στρώματος :

$$m_{ht} = 1 / h_t = 1 / 6395 \Rightarrow m_{ht} = 1,56 \times 10^{-4} \text{ (m}^2 \times ^\circ\text{C) / W}$$

$$m_{hm} = 1 / h_m = 1 / 4553,16 \Rightarrow m_{hm} = 2,2 \times 10^{-4} \text{ (m}^2 \times ^\circ\text{C) / W}$$

$$m_{his} = 1 / h_{is} = 1 / 4,5 \Rightarrow m_{his} = 0,22 \text{ (m}^2 \times ^\circ\text{C) / W}$$

δ) Μοναδιαίες Θερμικές Αντιστάσεις Τοιχώματος :

$$R_1 = m_t = \delta_t / K_{cu} = 10^{-3} / 395 \Rightarrow R_1 = 2,53 \times 10^{-6} \text{ (m}^2 \times ^\circ\text{C) / W}$$

$$R_2 = m_m + m_{is} = \delta_m / K_{cu} + \delta_{is} / K_{is} \Rightarrow R_2 = 0,4167 \text{ (m}^2 \times \text{°C) / W}$$

ε) Ολικές Μοναδιαίες Θερμικές Αντιστάσεις :

$$R_{01} = R_1 + m_{ht} + m_{hm} \Rightarrow R_{01} = 3,78 \times 10^{-4} \text{ (m}^2 \times \text{°C) / W}$$

$$R_{02} = R_2 + m_{hm} + m_{his} \Rightarrow R_{02} = 0,6369 \text{ (m}^2 \times \text{°C) / W}$$

Τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα παρουσιάζονται στον πίνακα :

	V_v^{δ}	R_{t1}	m_{ht}	R_1	R_{01}	V_k^{δ}	R_{t2}	m_{hm}	m_{is}	R_2	R_{02}
	Lt / min	°C/ W	(m ² × °C)/ W	(m ² × °C)/ W	(m ² × °C)/ W	Lt / min	°C/ W	(m ² × °C)/ W	(m ² × °C)/ W	(m ² × °C)/ W	(m ² × °C)/ W
	5,5	4,11 × 10 ⁻³	9,77 × 10 ⁻⁵	2,53 × 10 ⁻⁶	2,31 × 10 ⁻⁴	5,5	1,33 × 10 ⁻²	1,31 × 10 ⁻⁴	0,22	0,4167	0,6368
	3	5,61 × 10 ⁻³	1,56 × 10 ⁻⁴	2,52 × 10 ⁻⁶	3,78 × 10 ⁻⁴	3	1,1 × 10 ⁻²	2,2 × 10 ⁻⁴	0,22	0,4167	0,6369
Μέση Τιμή	-	-	-	-	3,045 × 10 ⁻⁴	-	-	-	-	-	0,63685

4.3.5 ΡΥΘΜΟΣ ΡΟΗΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ ΚΑΙ ΑΠΟΔΟΣΗΣ

4.3.5.1 ΣΚΟΠΟΣ

Υπολογισμός των ρυθμών ροής απορροφούμενης θερμότητας και απωλειών και της απόδοσης.

4.3.5.2 ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

Επαναλαμβάνουμε τα αρχικά πειράματα παράλληλης και αντιπαράλληλης ροής έχοντας υπόψη ότι οι θερμοκρασίες που θα χρησιμοποιηθούν είναι οι : $\theta_{κ1}$, $\theta_{κ2}$, $\theta_{ν1}$, και $\theta_{ν2}$.

Οι ζητούμενες ποσότητες υπολογίζονται από τις θερμοκρασιακές κατανομές και τον ολικό συντελεστή μετάδοσης θερμότητας που υπολογίστηκε στην ενότητα 4.3.3.

4.3.5.3 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΙ

Ρυθμός θερμότητας :

$$\dot{Q} = U \times A \times \Delta\theta_n$$

Ρυθμός που απορροφάει το ψυχρό

$$\dot{Q}_u = U_1 \times A t \times \Delta\theta_{mu}$$

με $\Delta\theta_{mu}$: η λογαριθμική διαφορά θερμοκρασίας

Απώλειες :

$$\dot{Q}_f = U_2 \times A_{is} \times \Delta\theta_{mf}$$

$$\text{και } \Delta\theta_{mf} = (\Delta\theta_1 - \Delta\theta_2) / \ln (\Delta\theta_1 / \Delta\theta_2)$$

$$\text{Παράλληλη ροή : } \Delta\theta_1 = |q_3 - q_{k1}| , \Delta\theta_2 = |q_3 - q_{k2}|$$

$$\text{Αντιπαράλληλη ροή : } \Delta\theta_1 = |q_3 - q_{k2}| , \Delta\theta_2 = |q_3 - q_{k1}|$$

Στον υπολογισμό του \dot{Q}_f μπορεί και να παραλειφθεί η επίδραση του πάχους του κελύφους.

Ο ρυθμός ροής της απαγόμενης θερμότητας είναι :

$$\dot{Q}_a = \dot{Q}_u + \dot{Q}_f$$

και η απόδοση είναι :

$$\eta = (\dot{Q}_u / \dot{Q}_a) \times 100\%$$

I. Παράλληλη ροή

- $\underline{\dot{V}} = 330 \text{ lt/h}$

$$\Delta\theta_1 = 3 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\Delta\theta_2 = 13 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\Delta\theta_m = (-10) / (-1,466) = 6,82 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$A_t = 0,057 \text{ m}^2$$

$$U_1 = 4873,29$$

Άρα σύμφωνα με τις σχέσεις που προαναφέρθηκαν :

$$\dot{\Phi}_u = 1894,33 \text{ W}$$

επίσης, προκύπτει ότι :

$$\Delta\theta_{mf} = 27,12 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\dot{\Phi}_f = 2,9343 \times 0,3454 \times 27,12 = 27,49 \text{ W}$$

δηλαδή, τελικά :

$$\dot{\Phi}_a = 1921,82 \text{ W}$$

$$n = (1894,33 / 1921,82) \times 100\% = 98\%$$

- Για $\dot{V} = 180 \text{ lt/h}$

$$\Delta\theta_1 = 3 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\Delta\theta_2 = 16 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\Delta\theta_m = (-13) / (-1,67) = 7,77 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$A_t = 0,057 \text{ m}^2$$

$$U_1 = 2990,43$$

Άρα σύμφωνα με τις σχέσεις που προαναφέρθηκαν :

$$\dot{\Phi}_u = 1324,43 \text{ W}$$

επίσης, προκύπτει ότι :

$$\Delta\theta_{mf} = 23,95 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\dot{\Phi}_f = 2,9343 \times 0,3454 \times 23,95 = 24,27 \text{ W}$$

δηλαδή, τελικά :

$$\dot{\Phi}_a = 1348,71 \text{ W}$$

$$n = (1324,43 / 1348,71) \times 100\% = 97\%$$

II. Αντιπαράλληλη ροή

- Για $\dot{V} = 330 \text{ lt/h}$

$$\Delta\theta_1 = 19 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\Delta\theta_2 = 3 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\Delta\theta_m = (16) / (1,85) = 8,65 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$A_t = 0,057 \text{ m}^2$$

$$U_1 = 5159,96$$

Άρα σύμφωνα με τις σχέσεις που προαναφέρθηκαν :

$$\dot{\Phi}_u = 2544,12 \text{ W}$$

επίσης, προκύπτει ότι :

$$\Delta\theta_{mf} = 29,73 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$\dot{\Phi}_f = 2,9343 \times 0,3454 \times 29,73 = 30,13 \text{ W}$$

δηλαδή, τελικά :

$$\dot{\Phi}_a = 2574,25 \text{ W}$$

$$n = (2544,12 / 2574,25) \times 100\% = 98\%$$

- Για $\dot{V} = 180 \text{ lt/h}$

$$\Delta\theta_1 = 17 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$\Delta\theta_2 = 3 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$\Delta\theta_m = (14) / (1,73) = 8,09 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$A_t = 0,057 \text{ m}^2$$

$$U_1 = 2985,76$$

Άρα σύμφωνα με τις σχέσεις που προαναφέρθηκαν :

$$\dot{\Phi}_u = 1376,92 \text{ W}$$

επίσης, προκύπτει ότι :

$$\Delta\theta_{mf} = 28,98 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\dot{\Phi}_f = 2,9342 \times 0,3454 \times 28,98 = 29,37 \text{ W}$$

δηλαδή, τελικά :

$$\dot{\Phi}_a = 1406,29 \text{ W}$$

$$n = (1376,92 / 1406,29) \times 100\% = 97\%$$

Συγκεντρώνονται τα αποτελέσματα στον παρακάτω πίνακα :

	Παροχή όγκου	Διαφορά θερμ.	Ρυθμός ροής θερμότητ ας, απορ/νη	Διαφορά θερμ.	Ρυθμός ροής θερμότητ ας, απώλειες	Ρυθμός ροής θερμότητ ας, απαγώμε νη	Απόδοση
	\dot{V} (lt/h)	$\Delta\theta_m$ °C	$\dot{\Phi}_u$ w	$\Delta\theta_{mf}$ °C	$\dot{\Phi}_f$ w	$\dot{\Phi}_a$ w	N %
Παράλληλη	330	6,82	1894, 33	27,12	27,49	1921, 82	98
Παράλληλη	180	7,77	1324, 43	23,95	24,27	1348, 71	97
Αντιπαράλλη λη	330	8,65	2544, 12	29,73	30,13	2574, 25	98
Αντιπαράλλη λη	180	8,09	1376, 92	28,98	29,37	1406, 29	97

III. Παρατηρήσεις – Σχόλια :

Βλέπουμε ότι οι τιμές του $\dot{\Phi}_f$ είναι πάρα πολύ μικρές. Το γεγονός αυτό δεν είναι σωστό, όμως το συγκεκριμένο φαινόμενο παρατηρείται αφού εμπεριέχεται μεγάλο, καθότι φαίνεται, σφάλμα από τη λογαριθμική διαφορά θερμοκρασίας που δεν είναι αντιπροσωπευτικό. Με τις τιμές από τον παραπάνω πίνακα μπορούμε να υπολογίσουμε το συντελεστή :

$$U = \dot{\Phi}_u / (A_t \times \Delta\theta_{mu})$$

I. Παράλληλη Ροή :

$$\dot{V} = 330 \text{ lt/h} : U = 1894,33 / (0,057 \times 6,82) = 4872,99 \text{ W}/(\text{m}^2 \times ^\circ\text{C})$$

$$\dot{V} = 180 \text{ lt/h} : U = 1324,43 / (0,057 \times 7,77) = 2990,43 \text{ W}/(\text{m}^2 \times ^\circ\text{C})$$

II. Αντιπαράλληλη Ροή :

$$\dot{V} = 330 \text{ lt/h} : U = 2544,12 / (0,057 \times 8,65) = 5159,96 \text{ W}/(\text{m}^2 \times ^\circ\text{C})$$

$$\dot{V} = 180 \text{ lt/h} : U = 1376,92 / (0,057 \times 8,09) = 2985,97 \text{ W}/(\text{m}^2 \times ^\circ\text{C})$$

Σαφώς, διαπιστώνουμε ότι οι τιμές που μόλις άνωθι υπολογίστηκαν είναι πολύ κοντά έως και ίδιες με αυτές τις τιμές που υπολογίστηκαν σε προηγούμενο σκέλος της εργαστηριακής έκθεσης.

4.3.6 ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΚΕΣ ΑΠΟΔΟΤΙΚΟΤΗΤΕΣ ΚΑΙ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΩΝ

4.3.6.1 ΣΚΟΠΟΣ

Υπολογισμός θερμοκρασιών αποδοτικότητας και σχεδίαση διαγραμμάτων θερμοκρασιών για παράλληλη και αντιπαράλληλη ροή

4.3.6.2 ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

Συνδέουμε τον εναλλάκτη σύμφωνα με τις γενικές οδηγίες. Σημειώνουμε όλες τις θερμοκρασίες για διάφορες παροχές. Μπορούμε επίσης να χρησιμοποιήσουμε τις τιμές που βρέθηκαν στις ενότητες 4.3.1 και 4.3.2.

Υπολογίζουμε τις θερμοκρασιακές αποδοτικότητες και σχεδιάζουμε τα διαγράμματα θερμοκρασιών για παράλληλη και αντιπαράλληλη ροή.

4.3.6.3 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΙ

$$\text{Ψυχρός : } P_k = (\theta_{k2} - \theta_{k1}) / (\theta_{v1} - \theta_{k1}) \times 100 \%$$

$$\text{Θερμός : } P_v = (\theta_{v1} - \theta_{v2}) / (\theta_{v1} - \theta_{k1}) \times 100 \%$$

I. Παράλληλη Ροή :

- Για $v^* = 330 \text{ lt/h}$

$$P_k = (36 - 20) / (59 - 20) = 16 / 39 = 0,41 = 41 \%$$

$$P_v = (59 - 44) / (59 - 20) = 15 / 39 = 0,38 = 38 \%$$

- Για $\dot{V} = 180 \text{ lt/h}$

$$P_k = (39 - 20) / (66 - 20) = 19 / 46 = 0,41 = 41 \%$$

$$P_v = (66 - 44) / (66 - 20) = 22 / 46 = 0,48 = 48 \%$$

II. Αντιπαράλληλη Ροή :

- Για $\dot{V} = 330 \text{ lt/h}$

$$P_k = (20 - 42) / (75 - 42) = 22 / 33 = 0,67 = 67 \%$$

$$P_v = (75 - 48) / (75 - 42) = 27 / 33 = 0,82 = 82 \%$$

- Για $\dot{V} = 180 \text{ lt/h}$

$$P_k = (40 - 20) / (68 - 40) = 20 / 28 = 0,71 = 71 \%$$

$$P_v = (68 - 40) / (68 - 40) = 28 / 28 = 1 = 100 \%$$

Συγκεντρωτικός πίνακας αποτελεσμάτων :

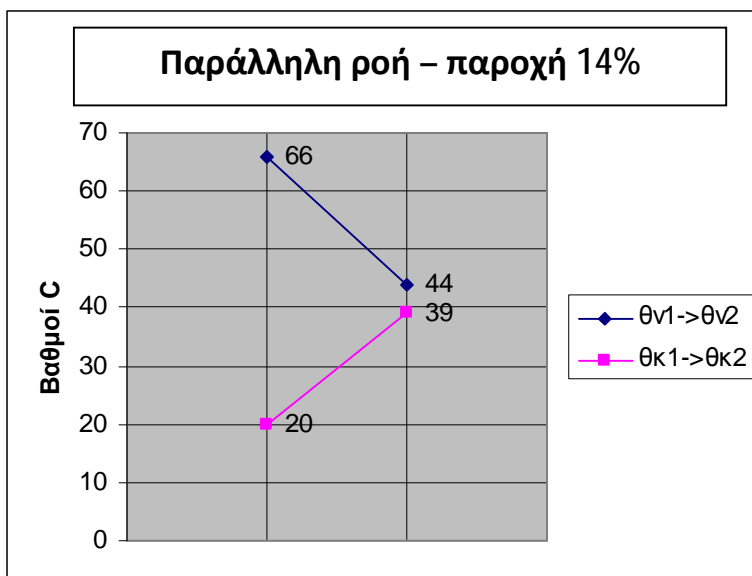
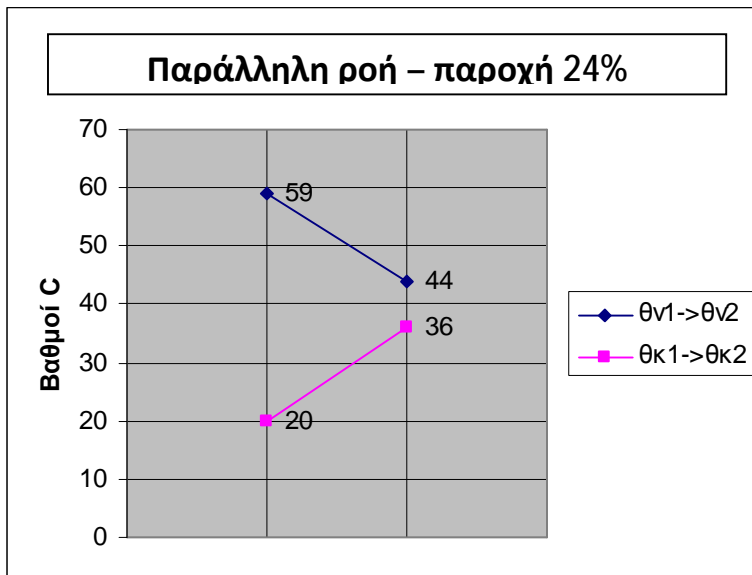
	$\Theta_{κ1}$ ($^{\circ}\text{C}$)	$\Theta_{κ2}$ ($^{\circ}\text{C}$)	$\Theta_{κ'}$ ($^{\circ}\text{C}$)	$\Theta_{κ''}$ ($^{\circ}\text{C}$)	$\Theta_{ν1}$ ($^{\circ}\text{C}$)	$\Theta_{ν2}$ ($^{\circ}\text{C}$)	P_k (%)	P_v (%)
Παράλληλη	20	21	34	36	59	44	41	38

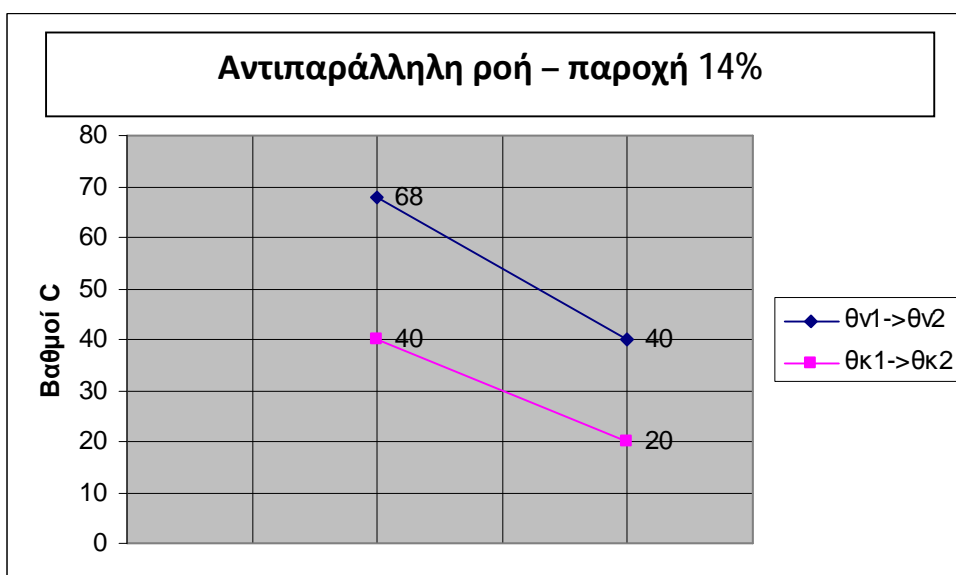
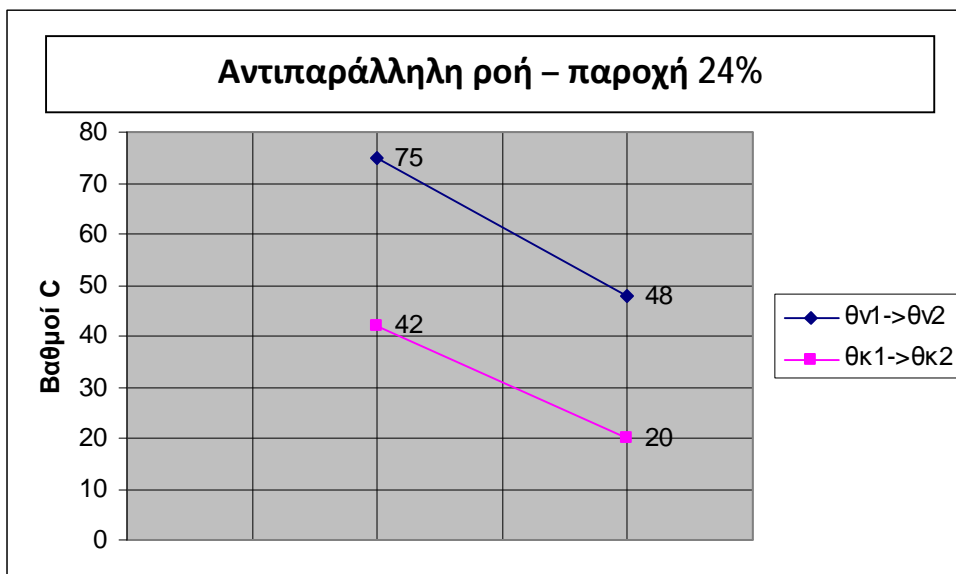
Παράλληλη	20	21	37	39	66	44	41	48
Αντιπαράλληλη	42	36	22	20	75	48	67	82
Αντιπαράλληλη	40	34	21	20	68	40	71	100

Στην παράλληλη ροή η μεγαλύτερη παροχή όγκου παρουσιάζει μεγαλύτερες τιμές απόδοσης από την αντιπαράλληλη ενώ στην αντιπαράλληλη με χαμηλότερη παροχή όγκου η απόδοση παραμένει σχεδόν αμετάβλητη.

Από τις παραπάνω μετρήσεις υπολογίστηκε ότι στην παράλληλη ροή με όγκο 5,5 ο συντελεστής μετάδοσης θερμότητας από το νερό του σωλήνα στο νερό του κελύφους (U_1) έλαβε την τιμή $4873,29 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$ και ο συντελεστής μετάδοσης θερμότητας προς το περιβάλλον (U_2) (απώλειες) έλαβε την τιμή $2,93432 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$ ενώ στην παράλληλη ροή με όγκο 3 ο συντελεστής μετάδοσης θερμότητας από το νερό του σωλήνα στο νερό του κελύφους (U_1) έλαβε την τιμή $2990,43 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$ και ο συντελεστής μετάδοσης θερμότητας προς το περιβάλλον (U_2) (απώλειες) έλαβε την τιμή $2,9343 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$.

Διαγράμματα θερμοκρασιών :





ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Παρατηρούμε ότι για μεγαλύτερες ποσότητες παρεχομένου όγκου εμφανίζεται μεγαλύτερη απόδοση. Το ίδιο πείραμα διεξήχθη και με την παράλληλη ροή δηλαδή με ανάστροφη κατεύθυνση των υγρών. Συγκεκριμένα, για 360 lt/h για την παροχή του κρύου και του ζεστού. Η τιμή του ρυθμού ροής απαγόμενης ενέργειας (\dot{Q}_a) από το ρευστό μετρήθηκε 6798,42 W/ m °C ενώ ο ρυθμός ροής αναρροφούμενης θερμότητας (\dot{Q}_u) μετρήθηκε 5334,95W/ m °C.

Η απόδοση (η) που προκύπτει από τις παραπάνω μετρήσεις υπολογίστηκε περίπου 78,5 %. Στη δεύτερη περίπτωση που η παροχή μειώθηκε στα 210 lt/h μετρήθηκε η ροή απαγόμενης ενέργειας (\dot{Q}_a) 4163,28W/ m °C ενώ η ροή αναρροφούμενης θερμότητας (\dot{Q}_u) μετρήθηκε 3745,87W/ m °C.

Θέλοντας να κάνουμε μια σύγκριση μεταξύ της παράλληλης και της αντιπαράλληλης ροής παρατηρούμε ότι:

Παρατηρούμε ότι όσο μειώνεται ο όγκος παρατηρείται μείωση και στο συντελεστή μετάδοσης θερμότητας από το νερό του σωλήνα στο νερό του κελύφους ενώ ο συντελεστής μετάδοσης θερμότητας προς το περιβάλλον παραμένει σταθερός.

Στην αντιπαράλληλη ροή με όγκο 5,5 ο συντελεστής μετάδοσης θερμότητας από το νερό του σωλήνα στο νερό του κελύφους (U_1) έλαβε την τιμή 5159,96W/m² °C και ο συντελεστής μετάδοσης θερμότητας προς το περιβάλλον (U_2) (απώλειες) έλαβε την τιμή 2,93432 W/m² °C ενώ στην παράλληλη ροή με όγκο 3 ο συντελεστής μετάδοσης θερμότητας από το νερό του σωλήνα στο νερό του κελύφους (U_1) έλαβε την τιμή 2985,97 W/m² °C και ο συντελεστής μετάδοσης

θερμότητας προς το περιβάλλον (U_2) (απώλειες) έλαβε την τιμή $2,9343\text{W/m}^2\text{ }^\circ\text{C}$.

Παρατηρούμε ότι και στην περίπτωση της αντιπαράλληλης ροής λαμβάνουμε τα ίδια αποτελέσματα με την περίπτωση της παράλληλης ροής.

Θέλοντας να κάνουμε μια σύγκριση μεταξύ της κατεύθυνσης της ροής και των συντελεστών απόδοσης παρατηρούμε ότι στην περίπτωση της αντιπαράλληλης ροής με μείωση του όγκου παρατηρούμε μεγαλύτερη μείωση στον συντελεστή μετάδοσης θερμότητας από το νερό του σωλήνα στο νερό του κελύφους ενώ και στις δυο περιπτώσεις ο συντελεστής μετάδοσης θερμότητας προς το περιβάλλον παρουσιάζει σταθερή τιμή σε όλες τις μεταβολές του όγκου.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

[1]Κτενιαδάκης Μιχάλης , *Εφαρμογές μετάδοσης θερμότητας*, Ζήτη, 2010

[2]Κακάτσιος Ξενοφών, *Μετάδοση θερμότητας*, Κλειδάριθμος, 2002

[3]Κακάτσιος Ξενοφών, *Αρχές μεταφορές θερμότητας και μάζης*, Κλειδάριθμος, 2006

[4]Σπανομήτσιος Στέφανος, *Βασικές αρχές ρευστομηχανικής και καύσης*, Θεσσαλονίκη 2007

[5]Χατζηαθανασίου, Βασίλης, *Εισαγωγή στη μετάδοση θερμότητας*, Σοφία Α.Ε., 2009

[6]Cengel, Yunus A., *Μεταφορά μάζας και θερμότητας Σύμφωνα με το σύστημα S.I.*, Τζιόλα, 2012

[7] Mills A.F. *basic heat and mass transfer*, Irwin, 1995

ΔΙΑΔΙΚΤΥΑΚΕΣ ΠΗΓΕΣ

[8] Καραπάντσιος Θεοδωρής, *Εναλλάκτες θερμότητας*,

Διαθέσιμο στο:

http://www.eng.auth.gr/~chemtech/foititika/fd/heat_exchangers/heat01.pdf

[9] ΕΝΑΛΛΑΚΤΕΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ

Διαθέσιμο στο:

www.eng.auth.gr/~chemtech/foititika/fd/heat.../heat01.pdf

[10] Εναλλάκτες θερμότητας (Heat Exchangers)

Διαθέσιμο στο:

<http://www.metal.ntua.gr/uploads/2263/enallaktes.pdf>

[11] Δευτερογενής Εναλλάκτης Θερμότητας

Διαθέσιμο στο:

www.saturn.gr/dyn/rec/111411142214_gr.pdf

[12] ΑΡV Εναλλάκτες θερμότητας με στεγανοποιημένες πλάκες

Διαθέσιμο στο:

[www.spx.com/en/multimedia.../PHE Manual 1000E EL.pdf](http://www.spx.com/en/multimedia.../PHE_Manual_1000E_EL.pdf)

[13] ΜΕΤΑΔΟΣΗ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ

Διαθέσιμο στο:

http://www.lat.upatras.gr/pdf/publications/shmeiwseis_metadosh_thermothtas.pdf

[14] Μοντελοποίηση και έλεγχος απόδοσης πλακοειδούς εναλλάκτη θερμότητας με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων

Διαθέσιμο στο:

<http://medilab.pme.duth.gr/Papalazarou.pdf>

[15]ΦΑΙΝΟΜΕΝΑ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΙΙΙ, ΜΕΤΑΦΟΡΑ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ ΚΑΙ ΜΑΖΑΣ

Διαθέσιμο στο:

[http://www.metal.ntua.gr/uploads/3277/305/Ph-Met-II-6 .pdf](http://www.metal.ntua.gr/uploads/3277/305/Ph-Met-II-6.pdf)

[16]Είδη εναλλακτών θερμότητας

Διαθέσιμο στο:

www.mixanikiroi.gr/