

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ

ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΣΥΜΠΑΓΕΙΣ ΕΝΑΛΛΑΚΤΕΣ

ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ

ΤΗΣ

ΜΑΡΙΑΣ ΤΖΙΝΑΒΑ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΒΑΣΙΛΕΙΟΣ ΜΠΟΝΤΟΖΟΓΛΟΥ

Υπεβλήθη για την εκπλήρωση μέρους των

απαιτήσεων για την απόκτηση του

Διπλώματος Μηχανολόγου Μηχανικού

2016



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΗ & ΚΕΝΤΡΟ ΠΛΗΡΟΦΟΡΗΣΗΣ
ΕΙΔΙΚΗ ΣΥΛΛΟΓΗ «ΓΚΡΙΖΑ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ»**

Αριθ. Εισ.: 14735/1
Ημερ. Εισ.: 16-10-2017
Δωρεά: Συγγραφέας
Ταξιθετικός Κωδικός: ΠΤ – ΜΜ
2016
ΤΖΙ

Μέλη τριμελούς εξεταστικής επιτροπής

Μποντόζογλου Βασίλειος, Καθηγητής
(επιβλέπων καθηγητής)

Ανδρίτσος Νικόλαος, Καθηγητής
Τσιακάρας Παναγιώτης, Καθηγητής

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα διπλωματική εργασία γίνεται μια παρουσίαση των διαφόρων ειδών συμπαγών εναλλακτών θερμότητας, δηλαδή των εναλλακτών που χαρακτηρίζονται από μεγάλη πυκνότητα επιφάνειας εναλλαγής θερμότητας. Συγκεκριμένα, γίνεται ανάλυση των τεχνολογιών κατασκευής των διάφορων ειδών των συμπαγών εναλλακτών και των ιδιαίτερων χαρακτηριστικών του κάθε είδους. Περιγράφεται η αρχή λειτουργίας τους ενώ τονίζονται τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα που προκύπτουν από τη χρήση τους. Καθορίζονται τα διαφορετικά όρια όσον αφορά την πίεση και τη θερμοκρασία λειτουργίας τους, οι τρόποι συντήρησης τους καθώς και το εύρος των διαφόρων εφαρμογών τους. Επίσης, περιγράφονται κάποιες νέες τεχνολογικές εξελίξεις στον τομέα των συμπαγών εναλλακτών θερμότητας. Στη συνέχεια γίνεται μια περιγραφή της βασικής θεωρίας των μεθόδων υπολογισμού της απόδοσης των εναλλακτών και των κύριων συντελεστών της ροής μέσα στους εναλλάκτες. Ακόμη, περιγράφονται τα κριτήρια σύμφωνα με τα οποία γίνεται η επιλογή του κατάλληλου εναλλάκτη για την κάθε εφαρμογή. Τέλος, παρουσιάζονται τα συμπεράσματα που προκύπτουν από την ανάλυση των νέων τεχνολογιών στον τομέα των εναλλακτών γενικότερα και προτείνονται λύσεις για την καλύτερη αξιοποίηση των πλεονεκτημάτων που προσφέρουν οι συμπαγείς εναλλάκτες.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1.ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	1
2.ΕΝΑΛΛΑΚΤΕΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ.....	2
3.ΣΥΜΠΑΓΕΙΣ ΕΝΑΛΛΑΚΤΕΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ	5
3.1 ΕΝΑΛΛΑΚΤΕΣ ΠΛΑΚΩΝ.....	5
3.1.1 ΕΝΑΛΛΑΚΤΕΣ ΠΛΑΚΩΝ-ΠΛΑΙΣΙΟΥ ΜΕ ΕΛΑΣΤΟΜΕΡΗ ΣΤΕΓΑΝΟΠΟΙΗΤΙΚΑ ...	5
3.1.2 ΣΥΓΚΟΛΛΗΤΟΙ ΕΝΑΛΛΑΚΤΕΣ ΠΛΑΚΩΝ	11
3.1.3 ΚΟΛΛΗΤΟΙ ΕΝΑΛΛΑΚΤΕΣ ΠΛΑΚΩΝ	14
3.2 ΣΥΜΠΑΓΕΙΣ ΕΝΑΛΛΑΚΤΕΣ ΑΥΛΩΝ-ΚΕΛΥΦΟΥΣ.....	16
3.2.1 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ	16
3.2.2 ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ.....	17
3.2.3 ΟΡΙΑ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ.....	20
3.2.4 ΚΥΡΙΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ.....	21
3.3 ΕΝΑΛΛΑΚΤΕΣ ΠΛΑΚΩΝ-ΚΕΛΥΦΟΥΣ.....	21
3.3.1 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ	21
3.3.2 ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ.....	21
3.3.3 ΟΡΙΑ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ.....	23
3.3.4 ΚΥΡΙΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ.....	23
3.4 ΕΝΑΛΛΑΚΤΕΣ ΔΕΣΜΗΣ ΠΤΕΡΥΓΙΟΦΟΡΩΝ ΠΛΑΚΩΝ	23
3.4.1 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ	23
3.4.2 ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ.....	23
3.4.3 ΟΡΙΑ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ.....	25
3.4.4 ΚΥΡΙΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ.....	25
3.5 ΕΝΑΛΛΑΚΤΕΣ ΔΕΣΜΗΣ ΠΤΕΡΥΓΙΟΦΟΡΩΝ ΣΩΛΗΝΩΝ.....	26
3.5.1 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ	26
3.5.2 ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ.....	26
3.5.3 ΟΡΙΑ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ.....	31
3.5.4 ΚΥΡΙΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ.....	31
3.6 ΣΠΕΙΡΟΕΙΔΕΙΣ ΕΝΑΛΑΚΤΕΣ	33
3.6.1 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ	33
3.6.2 ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ.....	33
3.6.3 ΟΡΙΑ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ.....	35
3.6.4 ΚΥΡΙΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ.....	35

3.7 ΕΝΑΛΛΑΚΤΕΣ ΤΥΠΩΜΕΝΩΝ ΚΥΚΛΩΜΑΤΩΝ	36
3.7.1 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ	36
3.7.2 ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ.....	37
3.7.3 ΟΡΙΑ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ	38
3.7.4 ΚΥΡΙΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ	38
3.8 ΕΝΑΛΛΑΚΤΕΣ Marbond™	39
3.8.1 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ	39
3.8.2 ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ.....	39
3.8.3 ΟΡΙΑ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ	40
3.8.4 ΚΥΡΙΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ	40
3.9 ΕΝΑΛΛΑΚΤΕΣ ΑΠΟ ΠΟΛΥΜΕΡΗ	41
3.9.1 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ	41
3.9.2 ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ.....	41
3.9.3 ΟΡΙΑ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ	44
3.9.4 ΚΥΡΙΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ	44
3.10 ΚΕΡΑΜΙΚΟΙ ΕΝΑΛΛΑΚΤΕΣ	45
3.10.1 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ	45
3.10.2 ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ.....	45
3.10.3 ΟΡΙΑ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ	48
3.10.4 ΚΥΡΙΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ	48
4.ΘΕΡΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ	49
4.1 ΟΛΙΚΟΣ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ	49
4.2 ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΡΥΠΑΝΣΗΣ	50
4.3 ΜΕΘΟΔΟΣ ΜΕΣΗΣ ΛΟΓΑΡΙΘΜΙΚΗΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΚΗΣ ΔΙΑΦΟΡΑΣ (Log Mean Temperature Difference- LMTD)	51
4.4 ΜΕΘΟΔΟΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ ΤΩΝ ΜΟΝΑΔΩΝ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ (Effectiveness NTU).....	53
4.5 ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΡΟΗΣ.....	56
4.6 ΠΤΩΣΗ ΠΙΕΣΗΣ ΕΝΑΛΛΑΚΤΗ	58
5.ΓΕΝΙΚΑ ΚΡΙΤΗΡΙΑ ΕΠΙΛΟΓΗΣ ΕΝΑΛΛΑΚΤΗ.....	61
6.ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	64
7.ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	66

1.ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η συνεχής προσπάθεια για μείωση της κατανάλωσης ενέργειας καθώς και οικονομικοί λόγοι, έχουν οδηγήσει στην ανάπτυξη τεχνολογιών για αποτελεσματικότερη αξιοποίησή της. Ιδιαίτερα σημαντική είναι η συμβολή των εναλλακτών θερμότητας για την επίτευξη αυτού του στόχου. Οι εναλλάκτες θερμότητας είναι συσκευές που επιτρέπουν τη μεταφορά θερμότητας (ενέργειας) από ένα ρευστό υψηλής θερμοκρασίας σε ένα ρευστό χαμηλότερης θερμοκρασίας. Κύριο χαρακτηριστικό τους είναι το ότι παρέχουν μεγάλη επιφάνεια εναλλαγής θερμότητας σε σχέση με τον όγκο που καταλαμβάνουν. Η αρχή λειτουργίας τους βασίζεται στη θερμοκρασιακή διαφορά των ρευστών. Οι εναλλάκτες θερμότητας αποτελούν πλέον ένα σημαντικό κομμάτι στις περισσότερες βιομηχανικές διεργασίες, κάτι που προκύπτει από τα πολλά πλεονεκτήματα που προσφέρει η χρήση τους. Χρησιμοποιούνται συχνά για ψύξη, θέρμανση, κλιματισμό, σε σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, στη χημική βιομηχανία, στις μεταφορές κτλ . Οι σημαντικότερες τυπικές εφαρμογές τους στη χημική και μεταλλουργική βιομηχανία είναι οι εξής:

- Ενεργειακά και οικονομικά αποδοτικοί τρόποι θέρμανσης (Heating)
- Ανάκτηση θερμότητας από υγρά ρεύματα(Heat Recovery)
- Αναγέννηση θερμότητας (Regenerative Heat Exchange)

Η διάκριση των εναλλακτών μπορεί να γίνει με πολλούς τρόπους .Στην πράξη η διάκριση τους γίνεται ανάλογα με τη χρήση τους σε ψύκτες , θερμαντήρες, λέβητες, εξατμιστήρες κλπ. Στην παρούσα εργασία οι εναλλάκτες θερμότητας παρουσιάζεται ένας διαχωρισμός σε κατηγορίες με βάση γενικά κριτήρια , δηλαδή, ανάλογα με τον τρόπο μεταφοράς θερμότητας, τον τύπο της ροής, την κατασκευαστική τους διάταξη και το αν είναι ή όχι συμπαγείς.

Το πιο διαδεδομένο είδος εναλλακτών θερμότητας , που χρησιμοποιείται ευρέως στις βιομηχανικές διαδικασίες είναι οι εναλλάκτες αυλών-κελύφους. Συνήθως αυτό συμβαίνει γιατί είναι πιο γνωστοί στο ευρύ κοινό. Ωστόσο, τα τελευταία χρόνια η εξέλιξη της τεχνολογίας έχει συμβάλει στη δημιουργία νέων ειδών εναλλακτών που έχουν πολύ περισσότερα πλεονεκτήματα σε σχέση με τους συμβατούς εναλλάκτες αυλών-κελύφους.

2.ΕΝΑΛΛΑΚΤΕΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ

Οι εναλλάκτες θερμότητας αποτελούνται από στοιχεία μεταφοράς θερμότητας όπως το κύριο σώμα του εναλλάκτη (κέλυφος), το οποίο περιλαμβάνει την επιφάνεια θερμοεναλλαγής και από στοιχεία διανομής του ρευστού, όπως ελάσματα αλλαγής πορείας ή πλάκες στήριξης, στεγανοποιητικά, περιστόμια κεφαλών εσόδου-εξόδου, καλύμματα, σωλήνες κλπ. Συνήθως δεν υπάρχουν κινητά τμήματα στους εναλλάκτες, ωστόσο υπάρχουν εξαιρέσεις.

Οι εναλλάκτες θερμότητας ανάλογα με τον τρόπο μεταφοράς θερμότητας διαχωρίζονται σε άμεσης, ημιάμεσης και έμμεσης επαφής. Οι εναλλάκτες άμεσης επαφής περιέχουν είτε δύο πλήρως μη αναμίξιμα ρευστά, είτε μη υγροποιήσιμο αέριο στις συνθήκες λειτουργίας της συσκευής που διέρχεται μέσω του ρευστού, είτε ατμό που διασπείρεται σε ψυχρό νερό, τα οποία στη συνέχεια διαχωρίζονται πάλι. Η γνωστότερη εφαρμογή είναι οι πύργοι ψύξης των θερμοηλεκτρικών σταθμών. Στους εναλλάκτες έμμεσης επαφής τα δυο ρευστά ανταλλάσσουν θερμότητα χωρίς να ανακατεύονται μεταξύ τους, μέσω μίας διαχωριστικής επιφάνειας. Αυτό το είδος εναλλακτών αποτελεί την πλειοψηφία των εμπορικών συσκευών εναλλαγής θερμότητας. Στους εναλλάκτες ημιάμεσης μετάδοσης θερμότητας ανήκουν οι αναγεννητές. Χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές που δύο ρευστά είναι αέρια. Οι αναγεννητές διαθέτουν μάζα πλήρωσης, μέσα από την οποία διέρχονται δύο διαφορετικά αέρια με χρονική εναλλαγή και αποθηκεύεται σε αυτή προσωρινά η προς μετάδοση θερμότητα. Σε δύο κυλινδρικά δοχεία περιέχονται μάζες θερμικής αποθήκευσης μέσα από τις οποίες ρέουν δύο αέρια, εναλλάξ σε αντίθετες κατευθύνσεις, ώστε να προκύπτει αντιρροή με χρονικά μετατιθέμενες ροές αερίων. Στους αναγεννητές μπορούμε να έχουμε συνεχή ή ασυνεχή λειτουργία.

Ανάλογα με τον μηχανισμό μεταφοράς θερμότητας οι εναλλάκτες διακρίνονται σε συναγωγής μιας φάσης και από τις δύο πλευρές, σε συναγωγής μιας φάσης από τη μία πλευρά και συναγωγής δυο φάσεων από την άλλη, συναγωγής δύο φάσεων και από τις δύο πλευρές και συνδυασμένης συναγωγής και μεταφοράς θερμότητας με ακτινοβολία.

Έχοντας ως κριτήριο τον τρόπο κατασκευής τους, οι εναλλάκτες διακρίνονται σε σωληνοειδείς, εναλλάκτες πλακών, εναλλάκτες εκτεταμένης επιφάνειας και αναγεννητές. Στην κατηγορία των σωληνοειδών εναλλακτών ανήκουν οι εναλλάκτες διπλού σωλήνα, οι εναλλάκτες αυλών κελύφους και οι εναλλάκτες σπειροειδούς σωλήνα.

Σύμφωνα με το είδος της ροής οι εναλλάκτες χωρίζονται σε μονής ροής (ομοροή, αντιρροή, σταυρωτή ροή) και σε σύνθετους εναλλάκτες. Η τελευταία ταξινόμηση χρησιμοποιείται για την θερμική ανάλυση των εναλλακτών. Στην περίπτωση της ομοροής τα δύο ρευστά ρέουν παράλληλα προς την ίδια κατεύθυνση. Στην αντιρροή τα ρευστά ρέουν παράλληλα προς αντίθετες κατευθύνσεις. Οι δύο αυτές διατάξεις μπορούν να εφαρμοστούν στην πιο απλή

διάταξη εναλλάκτη , τον εναλλάκτη διπλού σωλήνα. Συγκρίνοντας τις δύο αυτές διατάξεις προκύπτει ότι η αντιρροή δίνει μεγαλύτερη θερμορροή για την ίδια επιφάνεια εναλλαγής θερμότητας. Η διάταξη της σταυρωτής ροής περιλαμβάνει δύο ρευστά που ρέουν το ένα κάθετα στο άλλο. Τέλος, μπορεί να υπάρξει σύνθετη ροή , δηλαδή συνδυασμός της σταυρωτής ροής με την αντιρροή και την ομορροή.

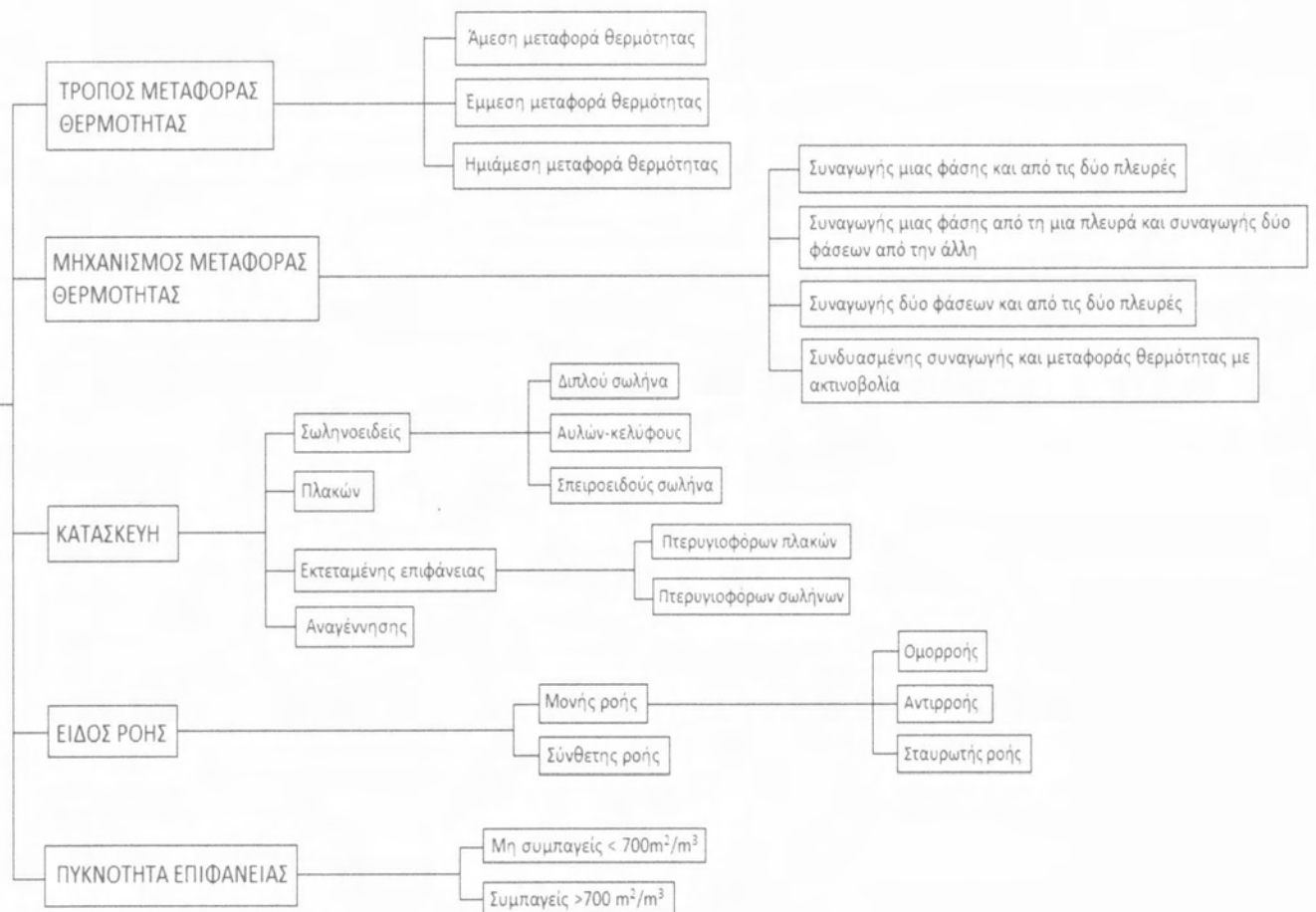
Τέλος, σύμφωνα με τον οδηγό εξοικονόμησης ενέργειας με συστήματα ανάκτησης θερμότητας του κέντρου ανανεώσιμων πηγών [4] , ανάλογα με την πυκνότητα των κατασκευαστικών στοιχείων γίνεται ο διαχωρισμός των εναλλακτών σε συμπαγείς και μη συμπαγείς . Οι τιμές της πυκνότητας επιφάνειας ,δηλαδή του λόγου της επιφάνειας θερμοεναλλαγής προς τον όγκο είναι πολύ μεγάλες στους συμπαγείς εναλλάκτες . Ο λόγος αυτός στους συγκεκριμένους εναλλάκτες είναι κυρίως μεγαλύτερος από $700\text{m}^2/\text{m}^3$. Ο λόγος αυτός αναφέρεται στην πλευρά του αερίου μέρους ενός εναλλάκτη αερίου – υγρού, οπότε ως συμπαγείς εναλλάκτες, γενικότερα, ορίζονται οι παρακάτω :

- Εναλλάκτες υγρού – υγρού: Πυκνότητα Επιφάνειας $> 400\text{ m}^2/\text{m}^3$
- Εναλλάκτες αερίου – υγρού: Πυκνότητα Επιφάνειας $> 700\text{ m}^2/\text{m}^3$
- Εναλλάκτες στρωτής ροής: Πυκνότητα Επιφάνειας $> 3,000\text{ m}^2/\text{m}^3$
- Μικροεναλλάκτες: Πυκνότητα Επιφάνειας $>10,000\text{ m}^2/\text{m}^3$

Οι συμβατικοί σωληνωτοί εναλλάκτες κελύφους με σωλήνες διαμέτρου 19 mm, που έχουν πυκνότητα επιφάνειας μεγαλύτερη από $100\text{ m}^2/\text{m}^3$, χαρακτηρίζονται επίσης ως συμπαγείς. Οι συμπαγείς εναλλάκτες θερμότητας, λόγω της μεγάλης επιφάνειας θερμοεναλλαγής που παρουσιάζουν, χρησιμοποιούνται συνήθως για τη μεταφορά θερμότητας μεταξύ αερίων ή, γενικά, μεταξύ ρευστών με μικρό συντελεστή συναγωγής.

Το παρακάτω διάγραμμα (διάγραμμα2.1) απεικονίζει συγκεντρωτικά τα κριτήρια με βάση τα οποία μπορεί να γίνει μια κατηγοριοποίηση των εναλλακτών θερμότητας καθώς και τα αντίστοιχα είδη των εναλλακτών:

ΕΝΑΛΛΑΚΤΕΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ



Διάγραμμα 2.1 Κατηγοριοποίηση εναλλακτών θερμότητας

3.ΣΥΜΠΑΓΕΙΣ ΕΝΑΛΛΑΚΤΕΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως οι εναλλάκτες θερμότητας μπορούν κατηγοριοποιηθούν με πολλούς τρόπους, ένας από τους οποίους είναι η πυκνότητα επιφάνειάς τους. Οι συμπαγείς εναλλάκτες θερμότητας αποτελούν μια σχετικά νέα κατηγορία εναλλακτών θερμότητας που προτιμώνται πλέον σε σχέση με τους συμβατικούς εναλλάκτες. Αυτό οφείλεται στο ότι χαρακτηρίζονται από μεγάλο λόγο επιφάνειας εναλλαγής θερμότητας προς τη μονάδα όγκου, δηλαδή μεγάλη πυκνότητα επιφάνειας. Αυτό το βασικό χαρακτηριστικό τους υποδηλώνει και τη ύπαρξη μικρών υδραυλικών διαμέτρων στην κατασκευή τους, άρα συνεπάγεται και μεγαλύτερη αποδοτικότητα σε μικρότερο όγκο. Οι συμπαγείς εναλλάκτες θερμότητας χαρακτηρίζονται ως εναλλάκτες με πυκνότητες επιφάνειας μεταφοράς θερμότητας μεγαλύτερες από $700\text{m}^2/\text{m}^3$ σε εναλλάκτες μεταφοράς από αέριο σε υγρό αλλά και μεγαλύτερες από $400\text{m}^2/\text{m}^3$ όταν πρόκειται για εναλλάκτες μεταφοράς από υγρό σε υγρό ή αλλαγής φάσης. Η πυκνότητα επιφάνειας εναλλαγής θερμότητας ορίζεται ως το πηλίκο της συνολικής επιφάνειας θερμοεναλλαγής προς τον όγκο του εναλλάκτη και μετριέται σε (m^2/m^3). Ένα άλλο πλεονέκτημα των συμπαγών εναλλακτών θερμότητας είναι ότι έχουν μεγάλο συντελεστή μετάδοσης θερμότητας σε σχέση με άλλους τύπους εναλλακτών. Λόγω αυτού του χαρακτηριστικού τους, η αρχική ανάπτυξη και εφαρμογή τους έγινε στην αεροδιαστημική, στην οδική μεταφορά και στη ναυτιλία.

3.1 ΕΝΑΛΛΑΚΤΕΣ ΠΛΑΚΩΝ

3.1.1 ΕΝΑΛΛΑΚΤΕΣ ΠΛΑΚΩΝ-ΠΛΑΙΣΙΟΥ ΜΕ ΕΛΑΣΤΟΜΕΡΗ ΣΤΕΓΑΝΟΠΟΙΗΤΙΚΑ

3.1.1.1 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ

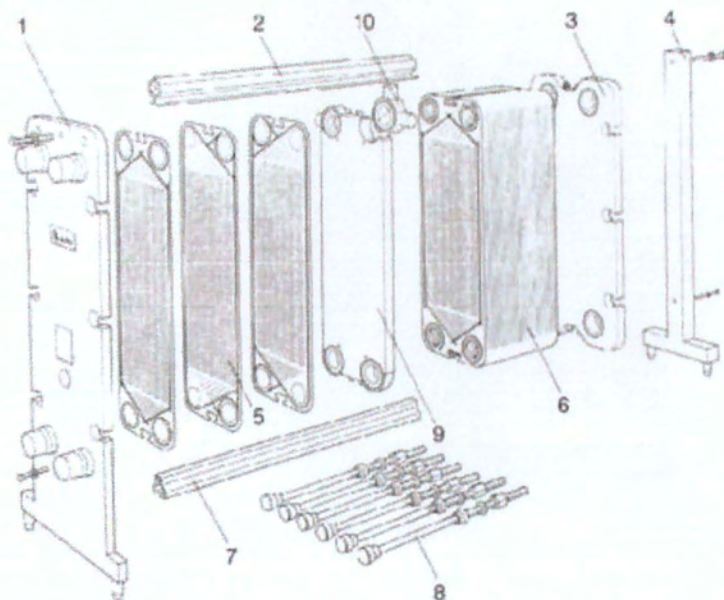
Οι εναλλάκτες πλακών-πλαίσιου με στεγανομερή ελαστοποιητικά (εικόνα 3.1.1) είναι ένα από τα πρώτα είδη συμπαγών εναλλακτών θερμότητας που δημιουργήθηκαν και, σύμφωνα με τον Hesselgreaves [3], χρησιμοποιήθηκε για πρώτη φορά το 1923 για την παστερίωση γάλακτος.

Η πιο κοινή παραλλαγή εναλλακτών πλακών –πλαίσιου αποτελείται από έναν αριθμό πιεσμένων αυλακωτών πλακών συμπιεσμένων μεταξύ τους σε ένα πλαίσιο. Οι επιμέρους πλάκες στεγανοποιούνται μεταξύ τους με ελαστομερή στεγανοποιητικά με πολύπλοκες διαμορφώσεις. Τα στεγανοποιητικά είναι έτσι διαμορφωμένα, ώστε σε περίπτωση διαρροής το μέσο να ρέει προς τα έξω και όχι στον απέναντι χώρο. Το πιο κοινό υλικό για την κατασκευή των πλακών είναι το ανοξείδωτο ατσάλι. Μεγάλο πλεονέκτημα αποτελεί η δυνατότητα αποσυναρμολόγησης, η οποία επιτρέπει αφ' ενός το μηχανικό καθαρισμό της συσκευής και αφ' ετέρου την εύκολη προσαρμογή της θερμικής ισχύς της συσκευής μέσω πρόσθεσης ή αφαίρεσης πλακών. Γι' αυτό και οι συγκεκριμένοι εναλλάκτες χρησιμοποιήθηκαν αρχικά στη βιομηχανία τροφίμων όπου είναι επιτακτική η ανάγκη συνεχούς καθαρισμού.



Εικόνα 3.1.1 Εναλλάκτης πλακών-πλασιού με στεγανομερή ελαστοποιητικά [40]

3.1.1.2 ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ

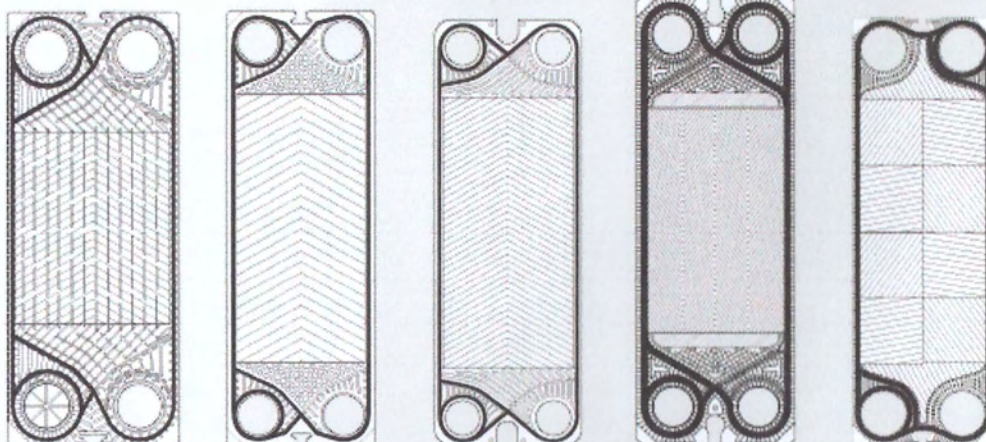


Εικόνα 3.1.2 Παράδειγμα εναλλάκτη πλακών από ανοξείδωτο ατσάλι.(τα 9,10 χρησιμοποιούνται μόνο σε εναλλάκτες με περισσότερα τμήματα) [3]

Τα διάφορα στοιχεία που εμφανίζονται στην παραπάνω εικόνα (εικόνα 3.1.2) είναι:

1. Στατική πλάκα
2. Επάνω φορέας
3. Κινητή πλάκα
4. Τελικό στήριγμα
5. Πλάκα ροής
6. Πακέτο πλακών
7. Κάτω φορέας
8. Πείρος εφελκυσμού
9. Πλέγμα σύνδεσης
10. Σύνδεσμος

Η επιφάνεια μεταφοράς θερμότητας αποτελείται από αυλακωτές πλάκες κατασκευασμένες από υψηλής ποιότητας μέταλλο. Οι πολύπλοκες διαμορφώσεις επιφέρουν αναταράξεις προκειμένου να αποφευχθεί η στασιμότητα, να επιτευχθεί στεγανοποίηση και να μειωθεί η τάση για ρύπανση. Οι πλάκες στους συγκεκριμένους εναλλάκτες παράγονται μαζικά από ακριβά υλικά. Οι εναλλάκτες πλακών-πλαισίου είναι κατασκευασμένοι από ένα εύρος σχεδιαστικών διατάξεων πλακών και, σύμφωνα με την εταιρία Tranter [33], μερικές από αυτές φαίνονται στην εικόνα 3.1.3.



Εικόνα 3.1.3 Διαμορφώσεις πλακών εναλλακτών πλακών-πλαισίου [33]

Οι πλάκες μπορούν να κατασκευαστούν από υλικά με μεγάλη αντοχή. Τα πιο διαδεδομένα είναι το ανοξείδωτο ατσάλι (AISI304,316), το τιτάνιο, το Monel[®] (κράμα που αποτελείται κυρίως από νικέλιο και χαλκό) και άλλα κράματα νικελίου. Σε περιπτώσεις όπου υπάρχει πρόβλημα διάβρωσης, κάποιοι κατασκευαστές

προσφέρουν μη μεταλλικούς εναλλάκτες πλακών-πλαϊσίου από υλικά όπως γραφίτης και πολυμερή από φθόριο ή απλά πολυμερή.

Η διαμόρφωση της επιφάνειας των πλακών μπορεί να έχει επίδραση όχι μόνο στον θερμικό και ρευστομηχανικό υπολογισμό ενός εναλλάκτη πλακών, αλλά και στη συμπεριφορά του κατά τη λειτουργία, ειδικά στη ρύπανση. Η λειτουργία των εναλλακτών πλακών με κατά το δυνατόν πιο υψηλές διατμητικές τάσεις στα τοιχώματα συνεισφέρει στην επιβράδυνση της ρύπανσης στην πλευρά του ψυκτικού νερού ή ακόμη και στην αποφυγή της.

Από στοιχεία της εταιρείας Tranter [33], οι διαστάσεις των πλακών κυμαίνονται από 0,06m² έως 4,41 m² ανά πλάκα και πάχος 0.4mm έως 1mm. Ο ρυθμός ροής φτάνει μέχρι και τα 3500 m³/ώρα σε συνήθεις διατάξεις ενώ σε διατάξεις με διπλή είσοδο μπορεί να φτάσει τα 5000 m³/ώρα.

Παρά το γεγονός ότι οι εναλλάκτες πλακών-πλαϊσίου αποτελούνται από συγκεκριμένα μέρη, ο καθένας ξεχωριστά μπορεί να παρουσιάσει διαφορές ανάλογα με τη χρήση για την οποία προορίζεται. Η διαμόρφωση των επιφανειών μετάδοσης θερμότητας, δηλαδή η εγχάραξη των καναλιών ροής, επηρεάζει όχι μόνο τον επιδιωκόμενο συντελεστή θερμοπερατότητας, αλλά και τη συμπεριφορά του εναλλάκτη ως προς τον καθορισμό της μέσης θερμοκρασιακής διαφοράς ή αντίστοιχα του αριθμού μονάδων μεταφοράς NTU. Με διαφορετικές γωνίες εγχάραξης μπορούν να επιτευχθούν διάφορες μεταβολές των θερμοκρασιών. Με γωνίες εγχάραξης 90°, η ροή είναι κάθετη. Η διαμόρφωση που προκύπτει από τέτοιες πλάκες θα μπορούσε να παρομοιαστεί με διάταξη κάθετων σωληνώσεων με χαρακτηριστικά χαμηλού αριθμού μονάδων μεταφοράς NTU.

Όσο οι γωνίες γίνονται πιο πεπλατυσμένες (μεγαλύτερες από 90°), η ροή γίνεται πιο κυματοειδής και προσφέρει υδροδυναμική αντίσταση με αποτέλεσμα να αυξάνεται ο αριθμός μονάδων μεταφοράς NTU. Ένας συνδυασμός διαφορετικών πλακών μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να δημιουργηθεί το κατάλληλο είδος ροής, με διαφορετικό αριθμό ρευμάτων και να επιτευχθεί ο επιθυμητός αριθμός μονάδων μεταφοράς NTU.

Τα πακέτα πλακών συναρμολογούνται σε πλαίσια και προεντείνονται μεταξύ τους με κοχλίες προέντασης. Ελαστομερή στεγανοποιητικά χρησιμοποιούνται ώστε να στεγανοποιήσουν τα κανάλια ροής και τις διεπιφάνειες. Το πλαίσιο αποτελείται από μια στατική πλάκα και μια κινητή πλάκα πίεσης. Η κινητή πλάκα διευκολύνει τον καθαρισμό καθώς και την αλλαγή των επιφανειών εναλλαγής θερμότητας. Ένα πλεονέκτημα αυτού του είδους εναλλάκτη είναι η δυνατότητα αυξομείωσης της επιφάνειας εναλλαγής θερμότητας.

Η οδήγηση μεταξύ των μέσων που ανταλλάσσουν θερμότητα γίνεται μέσω τεσσάρων ανοιγμάτων στις γωνίες των πλακών. Κλείνονται στεγανά εναλλάξ δύο ανοίγματα έναντι του υπόλοιπου χώρου ροής, ώστε οι ενδιάμεσοι χώροι μεταξύ των πλακών να διαρρέονται εναλλάξ από τα δύο μέσα. Με το κλείσιμο επιμέρους ανοιγμάτων

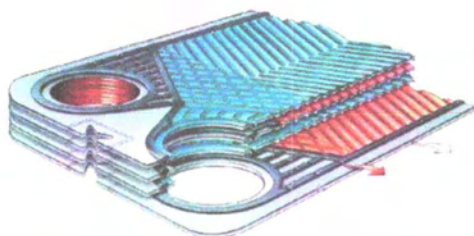
διέλευσης είναι δυνατό όλες οι πλάκες ή κάποια συγκεκριμένα πακέτα πλακών να συνδέονται το ένα με το άλλο , κι έτσι να επιτυγχάνονται πολλές διαδρομές.

Το πλαίσιο είναι κατασκευασμένο συνήθως από επικαλυμμένο μαλακό χάλυβα, καθώς, υπό κανονικές συνθήκες δεν έρχεται σε επαφή με τα ρευστά. Το υλικό με το οποίο καλύπτεται η εξωτερική επιφάνεια ποικίλει ανάλογα με το περιβάλλον στο οποίο θα λειτουργήσει ο εναλλάκτης . Το πλαίσιο μπορεί επίσης να κατασκευαστεί από ανοξείδωτο ατσάλι ή να επικαλυφθεί από αυτό αντί για μαλακό χάλυβα.

Σε κάθε πλάκα είναι προσαρμοσμένα ελαστομερή στεγανοποιητικά , από ελαστομερή με αντοχή στη θερμοκρασία, τα οποία συμβάλλουν στον έλεγχο της ροής των ρευστών στεγανοποιώντας τα εσωτερικά περάσματα των πλακών. Επίσης, παίζουν σημαντικό ρόλο στην αντοχή του εναλλάκτη στη θερμοκρασία και την πίεση. Κατασκευάζονται συνήθως από NBR, EPDM, Viton, Νεοπρένιο, Βουτύλιο, Ηγρalon, Teflon και άλλα υλικά με παρόμοιες ιδιότητες προκειμένου να ικανοποιούν τις απαιτήσεις.

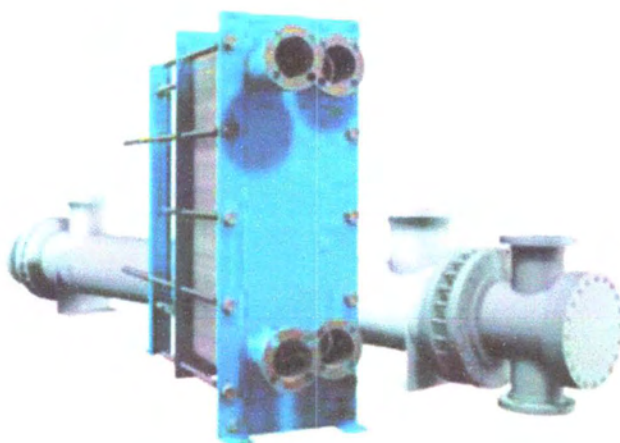
Αρχικά, η στερέωση των στεγανοποιητικών πάνω στις πλάκες γινόταν κυρίως με κόλληση, όπου η κόλληση είναι απλώς μια βοήθεια συναρμολόγησης και δεν αναλαμβάνει κάποια λειτουργία στεγανοποίησης. Πλέον χρησιμοποιούνται στεγανοποιητικά , τα οποία στερεώνονται στις πλάκες μηχανικά και είναι κατάλληλα για βαριές βιομηχανικές εφαρμογές. Πλεονέκτημα είναι η δυνατότητα αποσυναρμολόγησης , η οποία επιτρέπει αφ' ενός να καθαρίζεται μηχανικά η συσκευή και αφ' ετέρου να προσαρμόζεται εύκολα η θερμική ισχύς της συσκευής μέσω πρόσθεσης ή αφαίρεσης πλακών. Ωστόσο, η επανατοποθέτηση των πλακών πρέπει να γίνεται με μεγάλη προσοχή διότι η διαρροή που μπορεί να προκύψει σε περίπτωση λάθους τοποθέτησης είναι το κύριο μειονέκτημα των συγκεκριμένων εναλλακτών.

Σύμφωνα με στοιχεία από την κατασκευαστική εταιρεία Alfa Laval [35] , υπάρχουν και εναλλάκτες πλακών με μικτούς τρόπους στεγανοποίησης όπως οι εναλλάκτες πλακών ασφαλείας με διπλές πλάκες. Σε αυτούς τους εναλλάκτες οι επιμέρους πλάκες μεταξύ των μέσων αντικαθίστανται από ένα ζεύγος πλακών (εικόνα 3.1.4), το οποίο αποτελείται από δύο ίδιες πλάκες , οι οποίες τίθενται η μία επάνω στην άλλη και συγκολλούνται μεταξύ τους περιμετρικά στις διελεύσεις. Σε περίπτωση διαρροής το προϊόν οδηγείται μέσω της σχισμής μεταξύ των πλακών προς τα έξω. Χρησιμοποιούνται κυρίως σε περιπτώσεις που τα δύο ρευστά είναι απαγορευτικό να έρθουν σε επαφή μεταξύ τους και να αναμιχθούν , είτε λόγω πιθανής μόλυνσης, είτε λόγω αντίδρασης.



Εικόνα 3.1.4 Σχεδιασμός διπλής πλάκας [35]

Θεωρείται ότι αυτό το είδος εναλλάκτη προσφέρει μεγάλους συντελεστές συναγωγής λόγω των μικρών υδραυλικών διαμέτρων και μειώνουν την πιθανότητα ρύπανσης κατά 10-25% σε σχέση με έναν απλό εναλλάκτη αυλών-κελύφους. Επίσης, καταλαμβάνουν πολύ μικρότερο χώρο.



Εικόνα 3.1.5 Σύγκριση μεγέθους εναλλάκτη πλακών-πλασιού με στεγανομερή ελαστοποιητικά με εναλλάκτη αυλών-κελύφους [33]

3.1.1.3 ΟΡΙΑ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ

Τα όρια λειτουργίας των εναλλακτών πλακών-πλασιού με ελαστομερή στεγανοποιητικά ποικίλουν ανάλογα τον κατασκευαστή. Τυπικά το εύρος θερμοκρασιών λειτουργίας των μεταλλικών πλακών κυμαίνεται από -35°C έως $+200^{\circ}\text{C}$. Το σχεδιαστικό όριο πίεσης είναι τα 25 bar ενώ το ανώτατο όριο πίεσης που έχει μετρηθεί είναι έως και 40 bar. Η ελάχιστη θερμοκρασιακή διαφορά είναι 1°C .

3.1.1.4 ΚΥΡΙΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ

Σύμφωνα με τον Κ.Γ.Πασπαλά [2], οι εναλλάκτες πλακών με ελαστομερή στεγανοποιητικά παρουσιάζουν μεγάλο εύρος εφαρμογών οι οποίες διακρίνονται με βάση το είδος των ρευστών που θερμαίνονται ή ψύχονται ανάλογα, όπως παρακάτω: υγρό-υγρό, συμπύκνωση, εξάτμιση.

Μονάδες με ελαστομερή στεγανοποιητικά μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε εργοστάσια για ψύξη ή άντληση θερμότητας. Επίσης χρησιμοποιούνται σε

εργοστάσια τροφίμων όπου είναι απαραίτητος ο συνεχής και εύκολος καθαρισμός. Στον τομέα των χημικών διεργασιών, η ψύξη και θέρμανση αφορά την ψύξη ισοπαράφινης, θειικό οξύ, διαλύματα άλατος, εξάνιο και κηροζίνη. Άλλες συνήθεις χρήσεις είναι η θέρμανση γλυκερίνης και η συμπύκνωση αιθανόλης.

3.1.2 ΣΥΓΚΟΛΛΗΤΟΙ ΕΝΑΛΛΑΚΤΕΣ ΠΛΑΚΩΝ

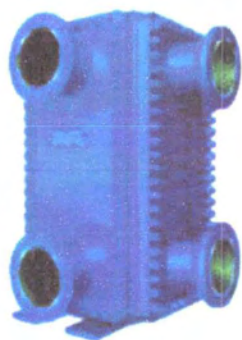
3.1.2.1 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ

Σε περιπτώσεις που απαιτούνται εναλλάκτες πλακών-πλαισίου με μεγαλύτερη πυκνότητα επιφάνειας, χρησιμοποιούνται οι συγκολλητοί εναλλάκτες πλακών-πλαισίου. Επίσης, είναι χρήσιμοι σε εφαρμογές όπου οι τιμές πίεσης και θερμοκρασίας είναι μεγάλες και οι εναλλάκτες με ελαστομερή στεγανοποιητικά δεν μπορούν να ανταπεξέλθουν. Οι συγκολλητοί εναλλάκτες πλακών έχουν μεγάλο εύρος κατασκευαστικών μορφών.

3.1.2.2 ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ

Οι πλήρως συγκολλητοί εναλλάκτες πλακών κατασκευάζονται σε γενικές γραμμές σε παρόμοια διάταξη με τους εναλλάκτες πλακών-πλαισίου με ελαστομερή, ωστόσο η ένωση μεταξύ των πλακών γίνεται με συγκόλληση, που προσφέρει αρκετά πλεονεκτήματα.

Δύο χαρακτηριστικά παραδείγματα πλήρως συγκολλητών εναλλακτών είναι το μοντέλο Compablock™ της Alfa Laval [35] (εικόνα 3.1.6) και το πατενταρισμένο μοντέλο Maxchanger® της Tranter[33] (εικόνα 3.1.7).



Εικόνα 3.1.6 Compablock™ της Alfa Laval [35]



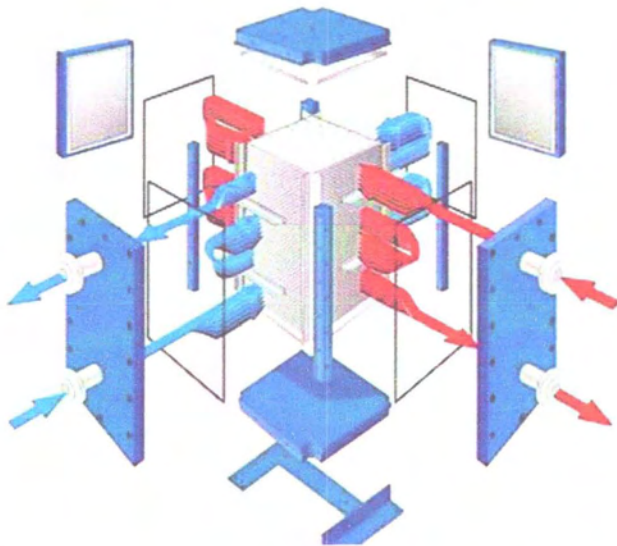
Εικόνα 3.1.7 Maxchanger® της Tranter [33]

Ο εναλλάκτης θερμότητας Compablock™ αποτελείται από ένα πακέτο κυματοειδών πλακών μεταφοράς θερμότητας, συγκολλημένων εναλλάξ μεταξύ τους για να σχηματίσουν κανάλια(εικόνα 3.1.8). Το πακέτο πλακών εισέρχεται σε ένα πλαίσιο τεσσάρων στηλών από χάλυβα, το οποίο είναι βιδωμένο στο πάνω και κάτω μέρος

του με κεφαλές πίεσης. Τέσσερα πλευρικά πάνελ περιέχουν τις συνδέσεις εισόδου και εξόδου των ρευστών και διαφράγματα που κατευθύνουν τη ροή.

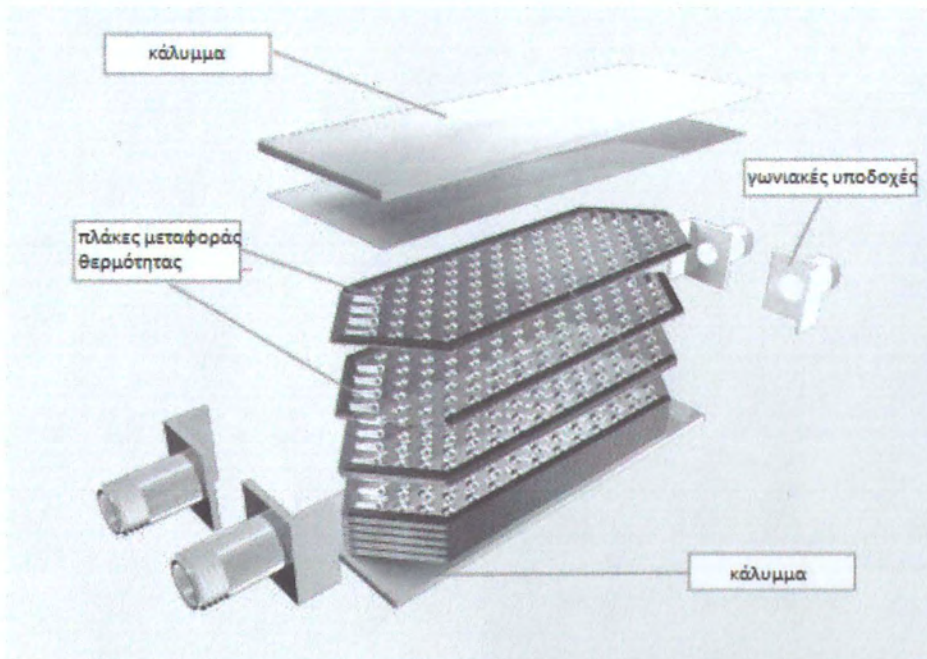
Οι διατάξεις των κυματοειδών πλακών δημιουργούν μεγάλη τύρβη, γεγονός που οδηγεί σε μεγάλο συντελεστή απόδοσης μεταφοράς θερμότητας, ο οποίος μπορεί να είναι δύο έως τέσσερις φορές μεγαλύτερος από τον αντίστοιχο του εναλλάκτη αυλών-κελύφους. Δηλαδή, ο εναλλάκτης θερμότητας Comrablock™ απαιτεί περίπου 25-50% λιγότερη επιφάνεια εναλλαγής θερμότητας σε σχέση με έναν σωληνοειδή για να έχει τα ίδια αποτελέσματα. Η μέγιστη επιφάνεια εναλλαγής θερμότητας είναι 840 m² και ο μέγιστος ρυθμός ροής είναι 6000 m³/h. Ο καθαρισμός του μπορεί να γίνει εύκολα με τη ρίψη νερού ή με χημικά, καθώς τα μέρη από τα οποία αποτελείται μπορούν να αφαιρεθούν εύκολα.

Σε περιπτώσεις που λειτουργεί ως συμπυκνωτής, για παράδειγμα, ο ατμός εισέρχεται από το επάνω μέρος της μονάδας, συμπυκνώνεται καθώς περνά από τις ψυχρές πλάκες και εξέρχεται από το κάτω μέρος της μονάδας. Το ψυκτικό μέσο διέρχεται μέσα από τα διαμορφωμένα περάσματα των πλακών και οδηγείται με διαφράγματα.

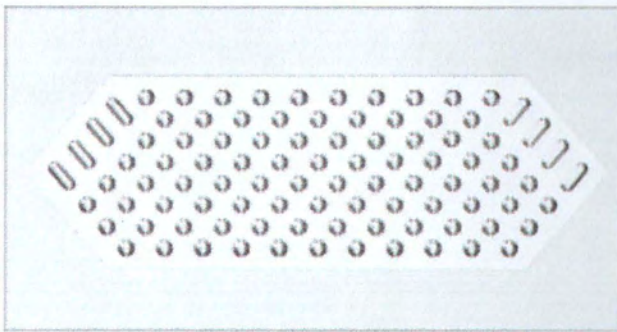


Εικόνα 3.1.8 Κατασκευή εναλλάκτη θερμότητας Comrablock™[35]

Ο εναλλάκτης Maxchanger[®] κατασκευάζεται επίσης από ένα πακέτο κυματοειδών πλακών μεταφοράς θερμότητας, συγκολλημένων εναλλάξ μεταξύ τους στο πλάι (εικόνα 3.1.9). Τα κανάλια διαχωρίζονται με αποστάτες και προκαλούν αντιρροή. Οι αυλακώσεις πάνω στις πλάκες (εικόνα 3.1.10) παρέχουν μεγάλη αντίσταση στην πίεση και μεταφορά θερμότητας. Σωλήνες προσαρμόζονται στα άκρα των πλακών για την είσοδο και έξοδο των ρευστών. Κατασκευάζεται από ανοξείδωτο ατσάλι 316L SS ή τιτάνιο.



Εικόνα 3.1.9 Κατασκευή εναλλάκτη Maxchanger® [33]



Εικόνα 3.1.10 Πλάκα με αυλακώσεις εναλλάκτη Maxchanger® [33]

Έχουν το πλεονέκτημα σε σχέση με τους συνήθεις εναλλάκτες πλακών ότι εξασφαλίζουν στεγανότητα, ενώ η επιτρεπόμενη θερμοκρασία λειτουργίας και η επιτρεπόμενη πίεση είναι υψηλότερες. Μειονέκτημά τους είναι ότι μπορούν να καθαριστούν μηχανικά υπό όρους, αφού οι πλάκες δεν μπορούν να αποσυναρμολογηθούν. Επίσης, οι πλάκες παρουσιάζουν τάση για ρηγματώσεις.

3.1.2.3 ΟΡΙΑ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ

Ο εναλλάκτης Comrablock™ λειτουργεί σε θερμοκρασίες από $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$ έως $350\text{ }^{\circ}\text{C}$ και σε πιέσεις μέχρι 42 bar. Η ελάχιστη θερμοκρασιακή διαφορά είναι $3\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Ο εναλλάκτης Maxchanger® λειτουργεί σε μέγιστη θερμοκρασία $538\text{ }^{\circ}\text{C}$ και σε πιέσεις μέχρι 82.7 bar. Η ελάχιστη θερμοκρασιακή διαφορά είναι $1\text{ }^{\circ}\text{C}$.

3.1.2.4 ΚΥΡΙΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ

Οι πλάκες μπορούν να προσαρμόζονται καλά σε δύσκολες συνθήκες εγκατάστασης. Για παράδειγμα μπορούν να ενσωματωθούν άμεσα στην κεφαλή μιας στήλης απόσταξης.

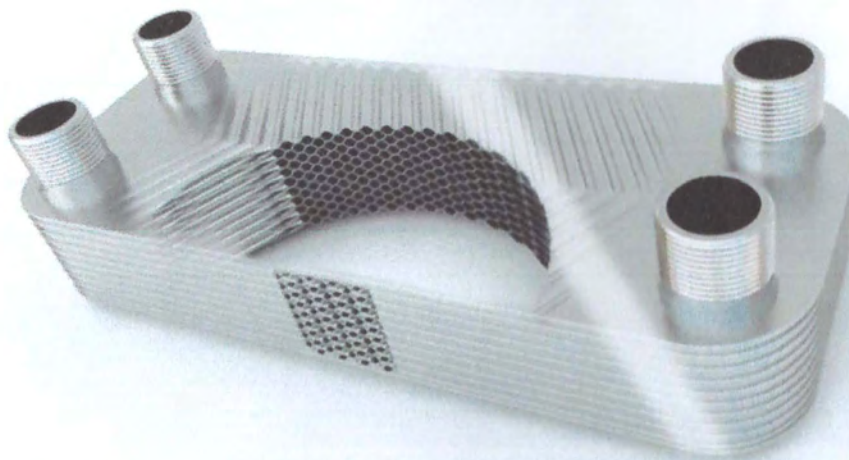
Οι συγκολλητοί εναλλάκτες πλακών έχουν ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών που περιλαμβάνει παραγωγή λαδιών και αερίων, ανάκτηση θερμότητας, συμπύκνωση, ψύξη, θέρμανση, σε διυλιστήρια και στην επεξεργασία υδρογονανθράκων. Επίσης χρησιμοποιούνται στις φαρμακοβιομηχανίες και σε χημικές διεργασίες.

3.1.3 ΚΟΛΛΗΤΟΙ ΕΝΑΛΛΑΚΤΕΣ ΠΛΑΚΩΝ

3.1.3.1 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ

Σύμφωνα με την κατασκευαστική εταιρεία ITM [34] οι κολλητοί εναλλάκτες πλακών (εικόνα 3.1.11) αποτελούνται από πακέτα πλακών κολλημένων μεταξύ τους, εξαλείφοντας τη χρήση ελαστομερών στεγανοποιητικών. Το πλαίσιο επίσης μπορεί να παραλειφθεί. Με την κατάργηση του πλαισίου και των στοιχείων προέντασης προκύπτει περιορισμένο βάρος. Αποτελούν νεότερη τεχνολογική εξέλιξη των εναλλακτών πλακών-πλαισίου με ελαστομερή στεγανοποιητικά.

Αυτό το είδος εναλλακτών κατασκευάζεται από τους κύριους προμηθευτές εναλλακτών πλακών-πλαισίου και οδηγείται σε πιο εξειδικευμένη αγορά όπως π.χ. για ψύξη. Η δυνατότητα μεταφοράς θερμότητας αυτών των εναλλακτών μπορεί να φτάσει ισχύ 600 kW, ανάλογα με τον προμηθευτή.



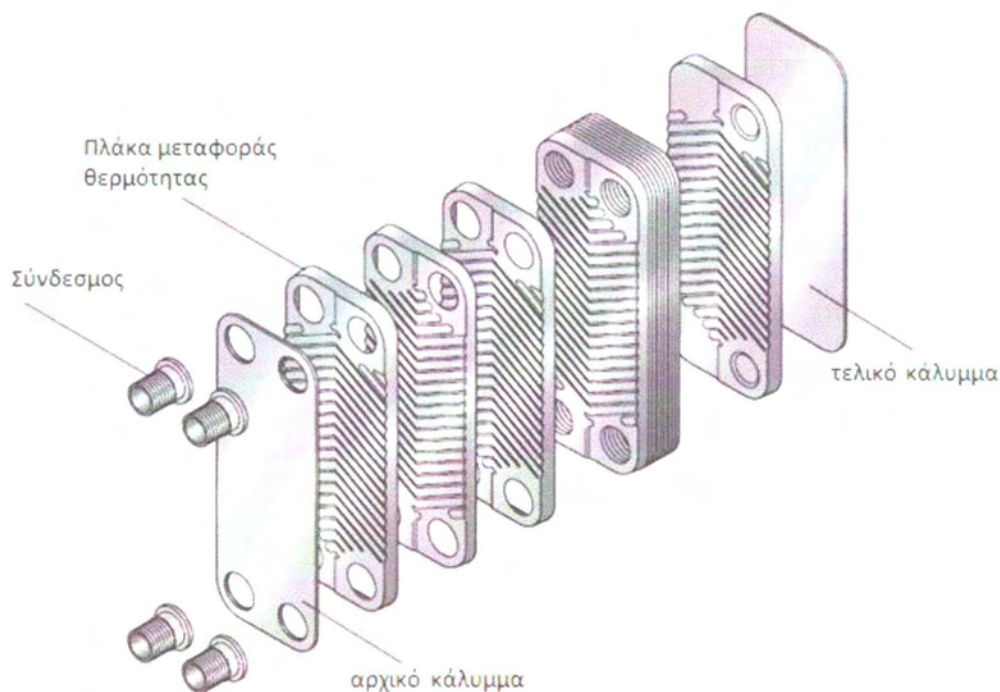
Εικόνα 3.1.11 Κολλητοί εναλλάκτες πλακών [34]

3.1.3.2 ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ

Η κολλητός συμπαγής εναλλάκτης πλακών (εικόνα 3.1.12) κατασκευάζεται ως ένα πακέτο κυματοειδών πλακών με ένα υλικό πλήρωσης μεταξύ κάθε πλάκας. Σ' αυτόν τον τύπο εναλλάκτη οι πλάκες που είναι κατασκευασμένες από ανοξείδωτο ατσάλι κολλούνται με κόλληση από χαλκό ή νικέλιο και η διαδικασία γίνεται συνήθως σε

κενό. Όπως γίνεται σφράγιση στα σημεία της περιφέρειας των πλακών, έτσι και τα κεντρικά εσωτερικά σημεία επαφής είναι επίσης κολλημένα επιτρέποντας την αντοχή μεγαλύτερων πιέσεων σε σχέση με τους εναλλάκτες πλακών με ελαστομερή στεγανοποιητικά

Οι κυματοειδείς πλάκες επιφέρουν ροή με μεγάλη τύρβη κι έτσι δεν επιτρέπει τη δημιουργία ιζημάτων στον εναλλάκτη. Επειδή τα σημεία επαφής των πλακών κολλούνται, ακόμα και σε μεγάλες διαφορές πιέσεων μεταξύ των δύο χώρων των μέσων, δεν προκύπτουν μεταβολές των διακένων ροής. Επίσης, έχουν μικρότερο βάρος λόγω της έλλειψης πλαισίου και μικρότερο μέγεθος.



Εικόνα 3.1.12 Κατασκευή κολλητού εναλλάκτη πλακών [44]

3.1.3.3 ΟΡΙΑ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ

Οι μονάδες που έχουν ως μέσο κόλλησης τον χαλκό λειτουργούν σε θερμοκρασίες έως 230°C και σε μέγιστη πίεση 30 bar, όμως η κόλληση από χαλκό μπορεί να δημιουργήσει ασυμβατότητα σε ορισμένα μέσα. Οι μονάδες που έχουν ως μέσο κόλλησης το νικέλιο λειτουργούν σε θερμοκρασίες έως 400°C και σε μέγιστη πίεση 16 bar. Επιτρέπει τη λειτουργία σε αντιρροή, γεγονός που αυξάνει την απόδοση και η ελάχιστη θερμοκρασιακή διαφορά είναι 1 °C.

3.1.3.4 ΚΥΡΙΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ

Οι κολλητοί εναλλάκτες πλακών στοχεύουν στην αγορά αντλιών θέρμανσης/ψύξης για αποστακτήρες και συμπυκνωτές. Είναι επίσης κατάλληλοι για διαδικασίες θέρμανσης νερού, ανάκτησης θερμότητας και συστήματα τηλεθέρμανσης.

Εντωμεταξύ κατασκευάζονται και συσκευές με υλικό κόλλησης καθαρό νικέλιο ώστε να μπορούν να αντιμετωπιστούν με αυτούς τους εναλλάκτες πλακών χωρίς στεγανοποιητικά και δραστικά μέσα π.χ. οξέα υψηλής συγκέντρωσης.

3.2 ΣΥΜΠΑΓΕΙΣ ΕΝΑΛΛΑΚΤΕΣ ΑΥΛΩΝ-ΚΕΛΥΦΟΥΣ

3.2.1 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ

Οι εναλλάκτες αυλών-κελύφους αποτελούν το πιο διαδεδομένο είδος εναλλάκτη στη βιομηχανία. Η εξέλιξη της τεχνολογίας έχει κάνει δυνατή τη δημιουργία συμπαγών εναλλακτών αυλών-κελύφους που προσφέρουν πολύ μεγαλύτερη επιφάνεια εναλλαγής θερμότητας σε σχέση με τους συμβατικούς σε συνδυασμό με το μικρό όγκο τους. Ένα παράδειγμα είναι ο συμπαγής εναλλάκτης Aalborg MX της Alfa Laval [35](εικόνα 3.2.1). Η κατασκευαστική τους διάταξη είναι σε γενικές γραμμές όμοια με αυτή των απλών εναλλακτών αυλών-κελύφους. Όπως υποδηλώνει και το όνομα τους, αυτοί οι εναλλάκτες αποτελούνται από ένα κέλυφος, το οποίο είναι δοχείο πίεσης, και από δέσμη σωλήνων που τοποθετείται μέσα σ' αυτό. Το ένα ρευστό ρέει μέσα στους σωλήνες και το άλλο γύρω από αυτούς μέσα στο κέλυφος, μεταφέροντας θερμότητα μεταξύ τους.



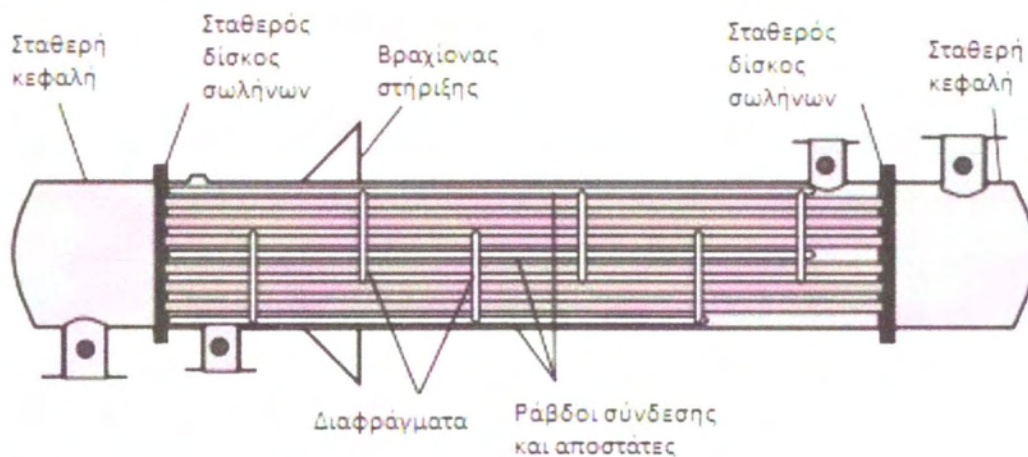
Εικόνα 3.2.1 Εναλλάκτης Aalborg MX της Alfa Laval [35]

3.2.2 ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ

Οι εναλλάκτες αυλών-κελύφους αποτελούνται από πολλά μέρη, όπως φαίνεται στο σχήμα, με κύρια τους σωλήνες και το κέλυφος. Τυπικά τα άκρα των σωλήνων συνδέονται με συλλέκτες (δοχεία νερού) . Σύμφωνα με τον Κ.Γ. Πασπαλά [2], υπάρχουν πολλές διαφοροποιήσεις όσον αφορά τη μορφή των σωλήνων και του κελύφους και κατατάσσονται έτσι στις εξής κατηγορίες:

Εναλλάκτης αυλών-κελύφους με δύο σταθερούς δίσκους σωλήνων.

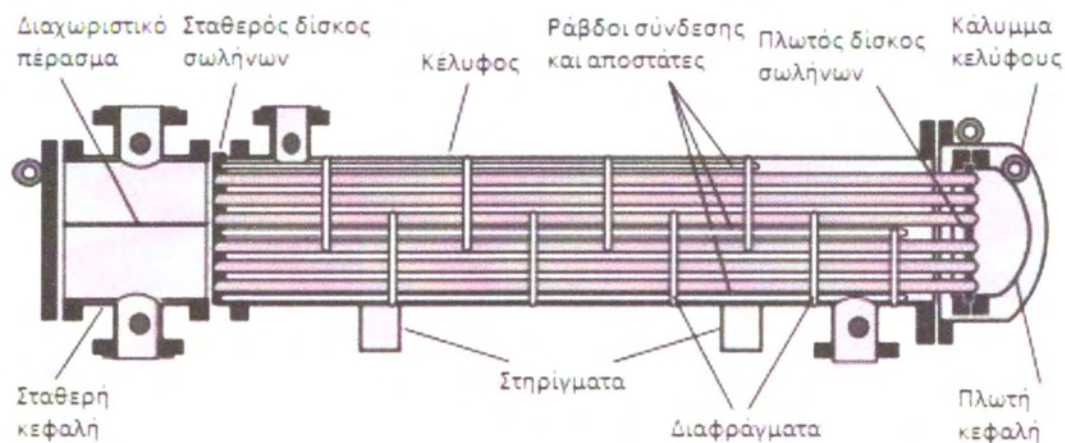
Σε αυτόν τον τύπο κατασκευής, σωλήνες είναι στερεωμένοι και στα δύο άκρα τους στους δίσκους σωλήνων , οι οποίοι είναι συγκολλημένοι με το περίβλημα (εικόνα 3.2.2) . Η κατασκευή μπορεί να περιλαμβάνει καλύμματα, περιβλήματα κεφαλής ή αφαιρετά καπάκια κεφαλής. Το βασικό πλεονέκτημα αυτής της διάταξης είναι το χαμηλό κόστος λόγω του απλού σχεδιασμού. Για την ακρίβεια ο εναλλάκτης αυλών-κελύφους με δύο σταθερούς δίσκους σωλήνων είναι ο πιο οικονομικός τύπος , εφόσον δεν χρειάζεται επέκταση. Άλλα πλεονεκτήματα είναι η ευκολία στον καθαρισμό των σωλήνων αν αφαιρεθούν τα καλύμματα και η μικρή πιθανότητα διαρροής του υγρού του κελύφους, λόγω του ότι δεν υπάρχουν ελαστομερή στεγανοποιητικά. Στην περίπτωση που η θερμοκρασιακή διαφορά των δύο ρευστών είναι μεγάλη και ξεπεραστούν οι επιτρεπόμενες τάσεις , θα πρέπει να προβλεφθεί αντιστάθμιση της διαστολής, παραδείγματος χάρη με ένα αντισταθμιστήρα στο περίβλημα, γεγονός που θα μεγάλωνε το κόστος της κατασκευής. Πρέπει να σημειωθεί , ότι στην περίπτωση αυτή το περίβλημα δεν παίρνει μέρος στη στήριξη των δίσκων σωλήνων και λόγω της φόρτισης με αντισταθμιστήρα (πρόσθετη αξονική δύναμη), οι δίσκοι σωλήνων πρέπει να κατασκευαστούν πιο στιβαροί. Ένα μειονέκτημα είναι ότι η δέσμη σωλήνων είναι σταθερά συνδεδεμένοι με το κάλυμμα και δεν μπορούν να καθαριστούν μηχανικά, γι' αυτό και δεν προτιμάται σε περιπτώσεις όπου υπάρχει πιθανότητα μεγάλης ρύπανσης . Ωστόσο, σε μερικές περιπτώσεις μπορεί να υπάρξει επαρκής χημικός καθαρισμός.



Εικόνα 3.2.2 Εναλλάκτης αυλών-κελύφους με δύο σταθερούς δίσκους σωλήνων [25]

Εναλλάκτης αυλών-κελύφους με πλωτή κεφαλή

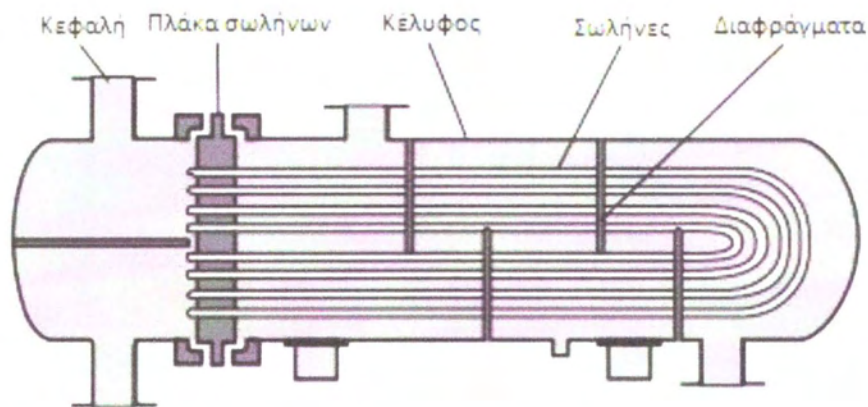
Αυτό το είδος εναλλάκτη είναι το πιο ευπροσάρμοστο και το πιο οικονομικό. Στον εναλλάκτη αυλών-κελύφους με πλωτή κεφαλή ο ένας δίσκος σωλήνων είναι συνδεδεμένος με το περίβλημα, ενώ ο άλλος μπορεί να κινείται ελεύθερα στο χώρο (εικόνα 3.2.3). Αυτό επιτρέπει την ελεύθερη επέκταση των σωλήνων καθώς και τον καθαρισμό τους εσωτερικά και εξωτερικά. Για το λόγο αυτό οι συγκεκριμένοι εναλλάκτες μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε περιπτώσεις όπου τα ρευστά έχουν ρύπους, όπως στα διυλιστήρια πετρελαίου. Ο δίσκος σωλήνων που κινείται ελεύθερα στο χώρο χρησιμεύει και στην αλλαγή διεύθυνσης της ροής στην πλευρά των σωλήνων. Η κεφαλή του εναλλάκτη δέσμης σωλήνων μπορεί να είναι είτε φλαντζωτή, είτε συγκολλητή. Σε εφαρμογές που υπάρχει τάση ρύπανσης χρησιμοποιείται φλαντζωτή κεφαλή, ωστόσο μπορεί να υπάρχουν προβλήματα στην εσωτερική στεγανοποίηση, όπως και στην περίπτωση που αγγίζονται τα όρια. Προκειμένου να διευκολυνθεί η ολίσθηση της δέσμης σωλήνων μπορούν να υπάρχουν ράγες ολίσθησης.



Εικόνα 3.2.3 Εναλλάκτης αυλών-κελύφους με πλωτή κεφαλή [25]

Εναλλάκτης αυλών-κελύφους με σωλήνες τύπου U

Όπως υποδηλώνει και το όνομα του συγκεκριμένου εναλλάκτη, οι σωλήνες που βρίσκονται σε αυτόν έχουν σχήμα U (φουρκέτας), έχει μόνο έναν δίσκο σωλήνων με σωλήνες στερεωμένους σε αυτόν (εικόνα 3.2.4). Το χαμηλότερο κόστος εξαιτίας του ενός δίσκου σωλήνων αντισταθμίζεται από το κόστος για το λύγισμα των σωλήνων και το κόστος των λίγο μεγαλύτερων διαμέτρων που απαιτούνται. Η ελάχιστη ακτίνα κάμψης καθορίζεται ουσιαστικά από το πάχος τοιχώματος, τη διάμετρο και το υλικό του σωλήνα. Τα πλεονεκτήματα του εναλλάκτη αυλών-κελύφους με σωλήνες τύπου U είναι ότι το ένα άκρο είναι ελεύθερο και έτσι μπορεί να διασταλεί και να συσταλεί ανάλογα με τις τασικές διακυμάνσεις. Επίσης, η δέσμη σωλήνων μπορεί να αφαιρεθεί κι έτσι μπορεί να γίνει μηχανικός καθαρισμός στο εξωτερικό τους. Μειονέκτημά τους είναι ότι το εσωτερικό των σωλήνων μπορεί να καθαριστεί μόνο χημικά λόγω του σχήματός του κι έτσι οι συγκεκριμένοι εναλλάκτες δεν πρέπει να χρησιμοποιούνται για διεργασίες με ρευστά που έχουν ρύπους.



Εικόνα 3.2.4 Εναλλάκτης αυλών-κελύφους με σωλήνες τύπου U [25]

Κατά την κατασκευή των εναλλακτών αυλών-κελύφους πρέπει να ληφθούν υπ' όψη και άλλοι σχεδιαστικοί παράγοντες. Αυτοί είναι:

Η διάμετρος των σωλήνων. Η χρήση μικρής διαμέτρου στους σωλήνες κάνει τον εναλλάκτη συμπαγή και οικονομικό. Το αρνητικό όμως που προκύπτει από τη μικρή διάμετρο είναι ότι οι σωλήνες ρυπαίνονται πιο γρήγορα και ο μηχανικός καθαρισμός τους γίνεται πιο δύσκολα.

Το πάχος των σωλήνων. Το κατάλληλο πάχος των σωλήνων επιλέγεται για να εξασφαλίζει αρκετό περιθώριο για διάβρωση και να παρέχει την απαιτούμενη αντοχή σε δονήσεις που προκαλούνται από τη ροή. Επίσης πρέπει να μπορεί να προσφέρει αξονική δύναμη, να μπορεί να αντέξει την εσωτερική πίεση των σωλήνων όπως και την υπερπίεση του κελύφους. Τέλος, θα πρέπει να υπάρχουν τα κατάλληλα ανταλλακτικά.

Το μήκος των σωλήνων. Οι εναλλάκτες είναι συνήθως πιο φθηνοί όταν χαρακτηρίζονται από μικρή διάμετρο κελύφους και μεγάλο μήκος σωλήνων. Παρόλα αυτά υπάρχουν περιορισμοί για το μήκος των σωλήνων, όπως ο διαθέσιμος χώρος στην περιοχή εγκατάστασης, το ότι πρέπει να υπάρχουν διαθέσιμοι σωλήνες με μεγαλύτερο μήκος από το απαιτούμενο για να μπορεί να γίνει η επεξεργασία τους και να χρησιμοποιηθούν ως ανταλλακτικά και το γεγονός ότι είναι δύσκολο να αφαιρεθούν και να αντικατασταθούν σωλήνες με μεγάλο μήκος.

Η απόσταση μεταξύ των σωλήνων. Κατά το σχεδιασμό των σωλήνων πρέπει να λαμβάνεται υπ' όψη ότι η απόσταση μεταξύ των κέντρων τους δεν πρέπει να είναι μικρότερη από 1,25 φορές την εξωτερική τους διάμετρο. Όταν υπερβαίνει η απόσταση το όριο αυτό, το κέλυφος έχει μεγάλη έκταση και ο εναλλάκτης μεγαλύτερο κόστος.

Η αυλάκωση των σωλήνων. Ο σχηματισμός αυλακώσεων κυρίως στο εσωτερικό των σωλήνων προκαλεί τυρβώδη ροή που διευκολύνει τη μεταφορά θερμότητας.

Η διάταξη των σωλήνων. Αφορά τον τρόπο με τον οποίο είναι τοποθετημένοι οι σωλήνες μέσα στο κέλυφος. Υπάρχουν τέσσερις κύριες διατάξεις ,οι οποίες είναι η τριγωνική (30°) , η τριγωνική με περιστροφή(60°) , η τετραγωνική (90°) και η τετραγωνική με περιστροφή (45°). Οι τριγωνικές διατάξεις δημιουργούν μεγαλύτερη τύρβη γύρω από τους σωλήνες . Οι τετραγωνικές διατάξεις προτιμώνται όταν υπάρχει μεγάλη ρύπανση και απαιτείται συχνός καθαρισμός.

Ελάσματα αλλαγής πορείας. Στο χώρο του περιβλήματος κατά κανόνα διατάσσονται κάθετα ελάσματα αλλαγής πορείας , τα οποία οδηγούν τη ροή του ρευστού και αποτρέπουν τη δόνηση των σωλήνων. Οι εξωτερικές επιφάνειες των σωλήνων διαρρέονται εναλλάξ εγκάρσια και παράλληλα. Υπάρχουν ελάσματα αλλαγής πορείας για πλήρη κάλυψη σωλήνων, για μερική κάλυψη σωλήνων και με ελάσματα οδήγησης. Για να περιορισθούν οι ροές διαρροής θα πρέπει η απόσταση των ελασμάτων αλλαγής πορείας να μην είναι μικρότερη του 20% της εσωτερικής διαμέτρου του περιβλήματος. Όταν τα ελάσματα αλλαγής πορείας τοποθετούνται πολύ κοντά μεταξύ τους δημιουργείται μεγάλη πτώση πίεσης , λόγω της αλλαγής πορείας της ροής. Πρέπει όμως να τοποθετούνται και αρκετά κοντά για να μην καταπονούνται οι σωλήνες. Ένα άλλο κύριο είδος ελασμάτων αλλαγής πορείας αποτελείται από δύο ομόκεντρα ελάσματα σε σχήμα δακτυλίου εξωτερικά και εσωτερικά σε σχήμα δίσκου για πλήρη κάλυψη σωλήνων. Αυτός ο τύπος αναγκάζει το ρευστό να περάσει γύρω από το δίσκο και στη συνέχεια μέσα από το δακτύλιο δημιουργώντας ένα διαφορετικό είδος ροής.

Για να μπορεί να μεταφέρεται εύκολα η θερμότητα το υλικό κατασκευής των σωλήνων πρέπει να έχει μεγάλη θερμική αγωγιμότητα. Επειδή η θερμότητα μεταφέρεται από μια θερμή πλευρά σε μια ψυχρή μέσω των σωλήνων , υπάρχει θερμοκρασιακή διαφορά κατά το μήκος των σωλήνων. Το υλικό των σωλήνων έχει την τάση να διαστέλλεται διαφορετικά ανάλογα με τη θερμοκρασία και έτσι λαμβάνουν χώρα θερμικές καταπονήσεις κατά τη διαδικασία, εκτός από αυτές που συμβαίνουν λόγω των πιέσεων. Το υλικό κατασκευής θα πρέπει να είναι συμβατό τόσο με το ρευστό των σωλήνων όσο και με αυτό του κελύφους για μεγάλα χρονικά διαστήματα κάτω από συνθήκες μεγάλης πίεσης και θερμοκρασίας για να αποφευχθεί η διάβρωση . Όλες αυτές οι ανάγκες απαιτούν τη χρήση ανθεκτικών, καλής ποιότητας , μεγάλης θερμικής αγωγιμότητας μετάλλων που δε διαβρώνονται. Τέτοια υλικά είναι κράματα χαλκού , νικελίου, ανοξείδωτο ατσάλι(316L SS) , τιτάνιο , Hastelloy[®] , Inconel[®] και άλλα κράματα υψηλής ποιότητας.

3.2.3 ΟΡΙΑ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ

Οι συμπαγείς εναλλάκτες αυλών-κελύφους προσφέρουν μεγάλη επιφάνεια εναλλαγής θερμότητας σε μικρό όγκο. Μπορούν να επεξεργαστούν από 3000 μέχρι 10000 λίτρα την ώρα. Οι πιέσεις φτάνουν μέχρι και 16 bar στην πλευρά των σωλήνων και 10 bar στην πλευρά του κελύφους σε θερμοκρασία 130°C.

3.2.4 ΚΥΡΙΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ

Οι κύριες εφαρμογές των συμπαγών εναλλακτών αυλών-κελύφους είναι η θέρμανση, η ψύξη λαδιών, η συμπύκνωση, η εξάτμιση και η αναγέννηση θερμότητας. Πολλές φορές χρησιμοποιούνται για να ρυθμίσουν τη θερμοκρασία των ρευστών σε διεργασίες, για να προθερμάνουν ρευστά στη βιομηχανία παραγωγής ενέργειας, σε διεργασίες που απαιτούν κρυογονικές θερμοκρασίες και στη χημική βιομηχανία.

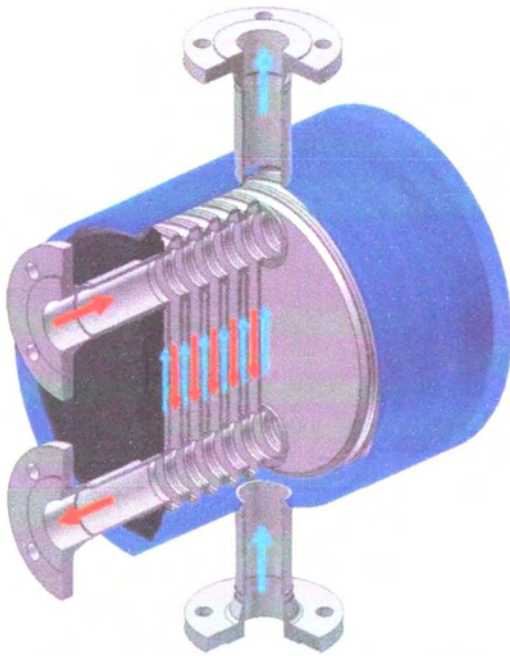
3.3 ΕΝΑΛΛΑΚΤΕΣ ΠΛΑΚΩΝ-ΚΕΛΥΦΟΥΣ

3.3.1 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ

Αυτός ο τύπος συμπαγών εναλλακτών θερμότητας παρέχει ένα συνδυασμό των πλεονεκτημάτων των εναλλακτών πλακών και των εναλλακτών αυλών-κελύφους. Το κύριο μέρος τους αποτελείται από πακέτα κυκλικών πλακών συγκολλημένα μεταξύ τους μέσα σε ένα κέλυφος, που αποτελεί δοχείο πίεσης. Η τεχνολογία κατασκευής των εναλλακτών πλακών-κελύφους προσφέρει μεγάλη απόδοση μεταφοράς θερμότητας σε σχέση με τους εναλλάκτες αυλών, μπορεί επίσης να υποστηρίξει μεγάλες θερμοκρασίες και πιέσεις. Ένα μεγάλο πλεονέκτημα είναι ότι δεν περιέχουν ελαστομερή στεγανοποιητικά.

3.3.2 ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ

Σύμφωνα με πληροφορίες από τις εταιρείες Vahterus [23] και Sondex [42], η κατασκευαστική διαδικασία των συμπαγών εναλλακτών θερμότητας περιλαμβάνει την πίεση και το σχηματισμό πακέτων κυκλικών πλακών, που αποτελούνται από το ίδιο υλικό με αυτές των εναλλακτών πλακών-πλαισίου, συγκολλημένων μεταξύ τους (εικόνα 3.3.1). Το εύρος των πλακών μπορεί να είναι μεγάλο (π.χ. από 190mm έως 1358mm στην εταιρεία κατασκευής Vahterus [23]). Ακροφύσια οδηγούν τη ροή μέσα και έξω από το πακέτο των πλακών. Το πλήρως συγκολλημένο πακέτο πλακών συναρμολογείται μέσα σε ένα εξωτερικό κυλινδρικό κέλυφος και δημιουργείται μία δεύτερη δίοδος ροής.



Εικόνα 3.3.1 Κατασκευή εναλλάκτη πλακών κελύφους [42]

Υπάρχουν δύο μοντέλα κατασκευής των εναλλακτών πλακών-κελύφους, το “κλειστό” και το “ανοιχτό”. Στο “κλειστό” μοντέλο το κέλυφος είναι συγκολλημένο, ενώ το “ανοιχτό” έχει κινητή φλάντζα στην άκρη που διευκολύνει το καθάρισμα του πλευρικού κελύφους. Το θερμό ρευστό περνάει από τα πακέτα πλακών, ενώ το ψυχρό ρευστό περνάει παράλληλα στο κέλυφος. Με κατάλληλες διαμορφώσεις από οδηγούς ροής μπορούν να δημιουργηθούν πολλαπλές ροές.



Εικόνα 3.3.2 Ανοιχτό μοντέλο εναλλάκτη πλακών πλαισίου της εταιρείας Vahterus [23]

Τα κύρια υλικά κατασκευής των πλακών είναι τιτάνιο, AISI 316L, κράμα νικελίου C276 κ.α. Το κέλυφος κατασκευάζεται κυρίως από AISI 316, St 35,8 ή κράμα νικελίου εφόσον χρειάζεται.

3.3.3 ΟΡΙΑ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ

Οι συμπαγείς εναλλάκτες πλακών-κελύφους καταλαμβάνουν μόνο το 25% των κλασικών εναλλακτών αυλών-κελύφους και η επιφάνεια εναλλαγής θερμότητας τους μπορεί να φτάσει και τα 2000m².

Οι θερμοκρασίες λειτουργίας κυμαίνονται από -164 °C έως 900 °C . Η μέγιστη πίεση μπορεί να είναι και 150 bar.

3.3.4 ΚΥΡΙΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ

Οι συγκεκριμένοι εναλλάκτες θερμότητας μπορούν να χρησιμοποιηθούν σαν λέβητες, καθώς το πλευρικό περίβλημα μπορεί να αντέξει μεγάλες πιέσεις. Επιπλέον, μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε εφαρμογές με διαβρωτικά υλικά και οξέα, αφού δεν περιέχουν στεγανομερή ελαστοποιητικά , γεγονός που αποτρέπει και τις διαρροές. Χρησιμοποιούνται για επεξεργασία αμμωνίας, ως συμπυκνωτές , ως αποστακτήρες , για θέρμανση καυσίμων, σε εργασίες που απαιτούν κρυογονικές θερμοκρασίες , ως δοχεία που συνδυάζουν εναλλάκτες και αντιδραστήρες.

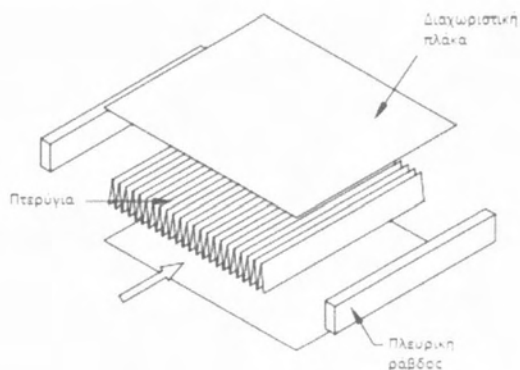
3.4 ΕΝΑΛΛΑΚΤΕΣ ΔΕΣΜΗΣ ΠΤΕΡΥΓΙΟΦΟΡΩΝ ΠΛΑΚΩΝ

3.4.1 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ

Σύμφωνα με τους Andrzej Stankiewicz και Jacob A. Mouligh [7], οι εναλλάκτες δέσμης πτερυγιοφόρων πλακών από αλουμίνιο αρχικά αναπτύχθηκαν το 1940 με σκοπό τη δημιουργία συμπαγών εναλλακτών μικρού βάρους και μεγάλης απόδοσης για εφαρμογές αερίου-αερίου στην αεροναυπηγική. Λόγω της ιδιότητας του αλουμινίου να έχει καλύτερες μηχανικές ιδιότητες σε χαμηλές θερμοκρασίες χρησιμοποιούνται από το 1950 στην υγροποίηση φυσικών αερίων. Σε γενικές γραμμές αυτός ο τύπος εναλλάκτη αποτελείται από διαδοχικές στρώσεις πτυχωτών εκτεταμένων επιφανειών μεταξύ λεπτών αγώγιμων πλακών.

3.4.2 ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ

Οι εναλλάκτες δέσμης πτερυγιοφόρων πλακών κατασκευάζονται από κυματοειδή ελάσματα (πτερύγια) που διαχωρίζονται από επίπεδες πλάκες, διαμορφώνοντας περάσματα που κλείνονται στα άκρα από πλευρικές ράβδους , με ανοίγματα για την είσοδο και έξοδο της ροής (εικόνα3.4.1).

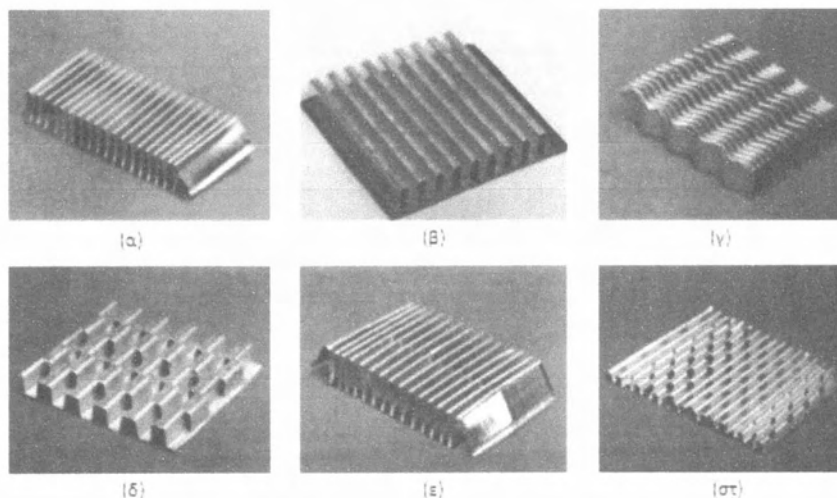


Εικόνα 3.4.1 Διαμόρφωση εναλλάκτη πτερυγιοφόρων πλακών

Τα πτερύγια και οι ενδιάμεσες πλάκες τοποθετούνται εναλλάξ το ένα επάνω από το άλλο για να σχηματίσουν μία διάταξη με πολλές στρώσεις. Στη συνέχεια κολλούνται μεταξύ τους με χαλκό σε κλίβανο με κενό, προκειμένου να σχηματιστεί ο πυρήνας του εναλλάκτη. Ένας εναλλάκτης μπορεί να αποτελείται από έναν ή περισσότερους τέτοιους πυρήνες. Όλοι οι δίοδοι για την κατανομή της ροής και τη μεταφορά θερμότητας βρίσκονται στην εσωτερική γεωμετρία του πυρήνα. Προκειμένου να επιτευχθεί η βέλτιστη απόδοση, μπορεί να υπάρξει μεγάλη ποικιλία στον αριθμό των στρώσεων πλακών-πτερυγίων, στο μέγεθός τους, στο ύψος αλλά και το είδος των πτερυγίων.

Τα πτερύγια μπορούν εύκολα να αναδιαταχθούν επιτρέποντας τη λειτουργία σε ομορορή, αντιρορή και σταυρωτή ροή. Συνήθως, για πιο απλές διαδικασίες ή στην περίπτωση που το ένα μέσο είναι ατμός χαμηλής πίεσης εφαρμόζεται σταυρωτή ροή. Αντίθετα, σε πιο βαριές διαδικασίες η αντιρορή είναι αποδοτικότερη. Τα δύο ρευστά ρέουν σε διαδοχικά στρώματα και η μεταφορά της θερμότητας γίνεται από το θερμό ρευστό μέσω της επιφάνειας των πτερυγίων στην επιφάνεια των διαχωριστικών πλακών και στη συνέχεια μέσω της επόμενης επιφάνειας των πτερυγίων στο ψυχρό ρευστό. Τα κυματοειδή ελάσματα αυξάνουν τη δομική στιβαρότητα του εναλλάκτη, αφού επιτρέπουν την χρήση του σε μεγάλες πιέσεις, λειτουργούν ως επέκταση της επιφάνειας μεταφοράς θερμότητας, εξασφαλίζουν μικρή υδραυλική διάμετρο και μειώνουν τη θερμική αντίσταση.

Όπως αναφέρει και ο Sadik Kakac [9], προκειμένου να ανταποκριθούν στις εκάστοτε απαιτήσεις, έχουν αναπτυχθεί πολλοί γεωμετρικοί τύποι πτερυγίων. Τα πτερύγια μπορούν να είναι τραπεζοειδή, ορθογώνια, κυματοειδή, πριονωτά, με γρίλιες και διάτρητα όπως φαίνονται στην εικόνα 3.4.2.



Εικόνα 3.4.2 Τύποι πτερυγίων: (α) τραπεζοειδή, (β) ορθογώνια, (γ) κυματοειδή, (δ) πριονωτά, (ε) με γρίλιες, (στ) διάτρητα

Ένα από τα πλεονέκτημα των εναλλακτών αυτών αποτελεί το γεγονός ότι ένας μόνο εναλλάκτης μπορεί να ενσωματώσει πολλές διαφορετικές διαδικασίες ροής και η μοναδική κατασκευή τους επιτρέπει την είσοδο και έξοδο ρευστών, όχι μόνο από τα άκρα, αλλά και από ενδιάμεσα σημεία. Επίσης, μπορούν να επεξεργαστούν ρεύματα με μικρές θερμοκρασιακές διαφορές (1°C - 2°C).

Ένα μειονέκτημα είναι ότι παρουσιάζουν ρύπανση εύκολα λόγω των μικρών δόδων ροής τους. Δεν μπορούν να καθαριστούν μηχανικά και προκειμένου να χρησιμοποιηθούν για ρευστά με σωματίδια πρέπει να τοποθετηθούν κατάλληλα φίλτρα. Επίσης το κόστος κατασκευής τους είναι μεγάλο λόγω της μεγάλης λεπτομέρειας που απαιτείται, ωστόσο εξισορροπείται από την απόδοση που παρέχουν στη μεταφορά θερμότητας.

Τα υλικά που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή τους είναι συνήθως αλουμίνιο, που προσφέρει μεγάλη απόδοση στη μεταφορά θερμότητας και μικρό βάρος. Για την κόλληση εκτός από χαλκό μπορούν να χρησιμοποιηθούν νικέλιο, ασήμι και κράματα.

Οι περισσότεροι εναλλάκτες πτερυγιοφόρων πλακών κατασκευάζονται με κόλληση με χαλκό. Ωστόσο, πρόσφατα δημιουργήθηκε ένα νέο είδος εναλλάκτη πτερυγιοφόρων πλακών με τη μέθοδο συγκόλλησης με διάχυση. Αυτή η τεχνολογία επιτρέπει την κατασκευή εναλλακτών μεγαλύτερης στιβαρότητας από τιτάνιο και ενδεχομένως από ανοξείδωτο ατσάλι που δεν διαβρώνονται.

Οι κολλητοί εναλλάκτες δέσμης πτερυγιοφόρων πλακών έχουν πυκνότητα επιφάνειας από $1000\text{ m}^2/\text{m}^3$ έως $1500\text{ m}^2/\text{m}^3$, ενώ η πυκνότητα επιφάνειας τους μπορεί να φτάσει τα $5900\text{ m}^2/\text{m}^3$.

3.4.3 ΟΡΙΑ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ

Τα όρια λειτουργίας των εναλλακτών αυτών εξαρτώνται από τα υλικά και τη μέθοδο κατασκευής τους. Στους κολλητούς εναλλάκτες από αλουμίνιο η υψηλότερη θερμοκρασία είναι 200°C , σε αυτούς από ανοξείδωτο ατσάλι είναι 800°C και σε αυτούς που κατασκευάζονται με συγκόλληση με διάχυση από τιτάνιο 500°C . Για πολύ υψηλές θερμοκρασίες έχουν δημιουργηθεί κεραμικοί εναλλάκτες δέσμης πτερυγιοφόρων πλακών που λειτουργούν σε θερμοκρασίες 1150°C , με μέγιστη θερμοκρασία 1370°C .

Οι μέγιστη πίεση σε εναλλάκτη από αλουμίνιο με κόλληση είναι 120 bar ενώ σε εναλλάκτη από ανοξείδωτο ατσάλι 80 bar. Στην περίπτωση των εναλλακτών με συγκόλληση με διάχυση οι μέγιστες πιέσεις είναι πολύ μεγαλύτερες. Τέτοιοι εναλλάκτες από ανοξείδωτο ατσάλι έχουν μέγιστη πίεση 620 bar ενώ εναλλάκτες από τιτάνιο 400 bar.

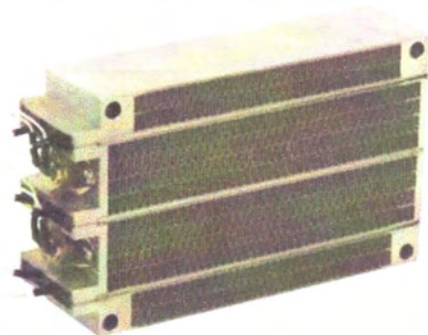
3.4.4 ΚΥΡΙΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ

Οι συμπαγείς εναλλάκτες δέσμης πτερυγιοφόρων πλακών έχουν εφαρμογή σε διαδικασίες που περιλαμβάνουν αέριο-αέριο, αέριο-υγρό και σε λειτουργίες με πολλές φάσεις. Σήμερα έχουν ευρύ πεδίο εφαρμογών και χρησιμοποιούνται για το διαχωρισμό αέρα, διαχωρισμό υδρογονανθράκων, απόρριψη αζώτου, παραγωγή

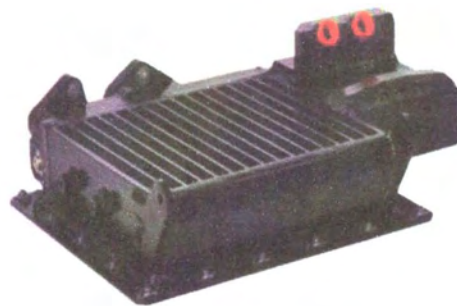
αιθυλενίου και προπυλενίου ,επεξεργασία διαβρωτικών υλικών, υγροποίηση βιομηχανικών και φυσικών αερίων, ως εξαρτήματα αποστακτικών στηλών έως και για κρυογονικές διεργασίες.

Οι εναλλάκτες δέσμης πτερυγιοφόρων πλακών με διάχυση έχουν εφαρμογή σε διαδικασίες που περιλαμβάνουν αέριο-αέριο, αέριο-υγρό και σε λειτουργίες δύο φάσεων. Συγκεκριμένα χρησιμοποιούνται ως ψύκτες στη συμπίεση αερίων.

Οι συγκεκριμένοι εναλλάκτες χρησιμοποιούνται ευρέως στην αεροδιαστημική και σε στρατιωτικές εγκαταστάσεις και οχήματα.



Εικόνα 3.4.3 Εναλλάκτης πτερυγιοφόρων πλακών για ελικόπτερο [36]



Εικόνα 3.4.4 Εναλλάκτης πτερυγιοφόρων πλακών εμπορικών αεροσκαφών [36]

3.5 ΕΝΑΛΛΑΚΤΕΣ ΔΕΣΜΗΣ ΠΤΕΡΥΓΙΟΦΟΡΩΝ ΣΩΛΗΝΩΝ

3.5.1 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ

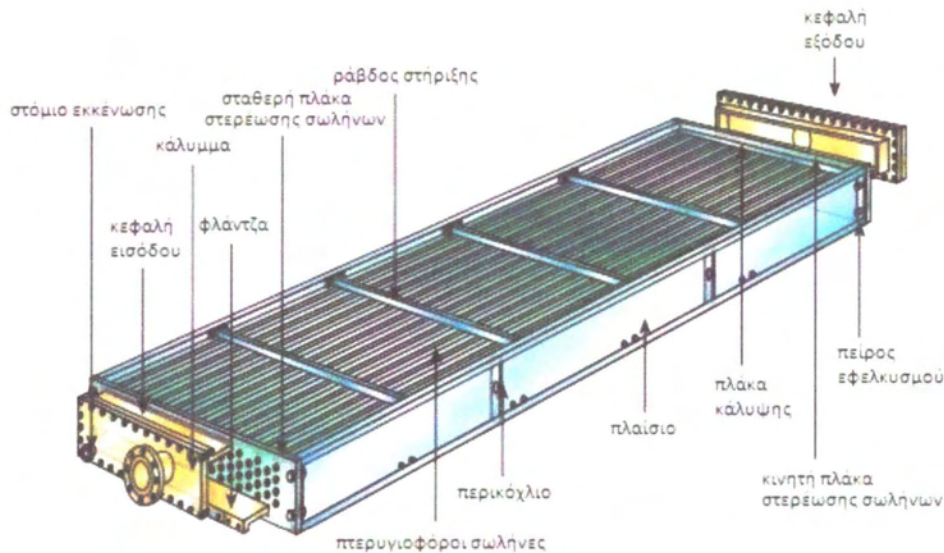
Σύμφωνα με όσα αναφέρονται στο βιβλίο του Hesselgreaves [3], η αρχική ιδέα των εναλλακτών δέσμης πτερυγιοφόρων σωλήνων αναπτύχθηκε στην αυτοκινητοβιομηχανία για την ψύξη μηχανών και τον κλιματισμό. Σε τέτοιες εφαρμογές το ένα ρευστό είναι ο αέρας και το άλλο είναι νερό ή άλλο ψυκτικό. Ο συντελεστής συναγωγής του αέρα είναι αρκετά μικρότερος σε σχέση με το υγρό και προκειμένου να εξισορροπηθεί αυτή η διαφορά έπρεπε να αναπτυχθούν διαφορετικές τεχνολογίες για το καθένα. Χρησιμοποιούνται πτερύγια με σκοπό την αύξηση της επιφάνειας στην πλευρά που ρέει ο αέρας , ενώ στην άλλη πλευρά το ρευστό περνάει μέσα από κανάλια μικρής διαμέτρου. Στις περισσότερες περιπτώσεις η κίνηση του αέρα προκαλείται από κάποιο ανεμιστήρα και μόνο σε λίγες περιπτώσεις υπάρχει φυσική κυκλοφορία.

3.5.2 ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ

Ένας εναλλάκτης πτερυγιοφόρων σωλήνων αποτελείται από δέσμες σωλήνων με πτερύγια στην εξωτερική επιφάνειά τους. Συνήθως ένα υγρό ρέει στο εσωτερικό των σωλήνων και εξωτερικά από τους σωλήνες ,όπου υπάρχουν τα πτερύγια και αυξάνουν την επιφάνεια μεταφοράς θερμότητας, ρέει αέρας ή οποιοσδήποτε άλλος ατμός. Οι περισσότεροι εναλλάκτες πτερυγιοφόρων σωλήνων λειτουργούν με σταυρωτή ροή , ωστόσο συναντάται σε πολλούς ομορορή και αντιρορή. Οι

εναλλάκτες αυτοί έχουν μικρότερη πυκνότητα επιφάνειας από τους εναλλάκτες πτερυγιοφόρων πλακών, η οποία είναι μέχρι και $3300 \text{ m}^2/\text{m}^3$.

Τα άκρα των πτερυγιοφόρων σωλήνων συναρμολογούνται σε ορθογώνιες δέσμες, συγκολλούνται ή στερεώνονται μηχανικά στις πλάκες σωλήνων, οι οποίες με τη βοήθεια των κεφαλών λειτουργούν είτε ως διανομείς, είτε ως συλλέκτες (εικόνα 3.5.1). Οι κεφαλές, σε περίπτωση που απαιτείται καθαρισμός των εσωτερικών επιφανειών των σωλήνων, συνδέονται με φλάντζες με τις πλάκες σωλήνων. Εναλλακτικά, συγκολλούνται μεταξύ τους.



Εικόνα 3.5.1 Δέσμη πτερυγιοφόρων σωλήνων [29]

Σε έναν εναλλάκτη πτερυγιοφόρων πλακών χρησιμοποιούνται στρογγυλοί ή ωσειδείς (οβάλ) πτερυγιοφόροι σωλήνες. Τα πτερύγια βρίσκονται συνήθως στην εξωτερική επιφάνεια των σωλήνων, ωστόσο μπορεί σε κάποιες εφαρμογές να βρίσκονται εσωτερικά. Τα κύρια είδη σωλήνων με πτερύγια, όπως αναφέρονται στο αντίστοιχο εγχειρίδιο της εταιρείας Kelvion [29], παρουσιάζονται παρακάτω αναλυτικά:

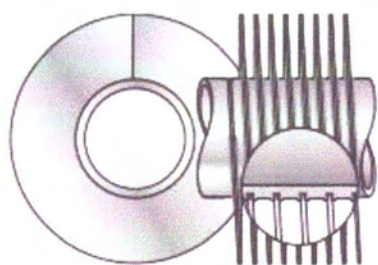
- Ο τύπος G πτερυγιοφόρου σωλήνα (εικόνα 3.5.2): Αποτελείται από ένα στρογγυλό σωλήνα με ελικοειδή αύλακα και μια ταινία αλουμινίου περιελιγμένη μέσα στην αύλακα υπό τάση. Τα πτερύγια κατασκευάζονται από αλουμίνιο και το κύριο σώμα του σωλήνα από οποιοδήποτε υλικό μπορεί να δεχθεί μηχανική επεξεργασία. Αυτός ο τύπος σωλήνα αποτελεί πρωτοποριακή τεχνολογία και προσφέρει μεγάλη απόδοση. Έχει πολλά πλεονεκτήματα, μερικά από τα οποία είναι η αντοχή σε μεγάλα φορτία, η σταθερότητα, η βελτιστοποιημένη επιφάνεια με λιγότερα πτερύγια, η μικρή ανάγκη για συντήρηση, η μειωμένη κατανάλωση ενέργειας. Επίσης έχει μικρό μέγεθος, είναι εύκολη η εγκατάστασή του και είναι οικονομικό. Η μέγιστη θερμοκρασία λειτουργίας φτάνει τους 400°C .
- Ο τύπος πτερυγιοφόρου σωλήνα διέλασης (εικόνα 3.5.3): Ένας στρογγυλός κεντρικός σωλήνας εισάγεται σε ένα σωλήνα αλουμινίου, στη συνέχεια

διαμορφώνονται μηχανικά τα πτερύγια και τέλος ο εξωτερικός σωλήνας πιέζεται πάνω στον κεντρικό σωλήνα. Το αποτέλεσμα αυτής της κατασκευής είναι μια συμπαγής ένωση με ευνοϊκές ιδιότητες μεταφοράς θερμότητας. Τα πτερύγια κατασκευάζονται από αλουμίνιο και το κύριο σώμα του σωλήνα από οποιοδήποτε υλικό. Συγκριτικά με άλλες αντίστοιχες κατασκευές πτερυγίων, τα συγκεκριμένα πτερύγια αποτελούνται από 40% περισσότερο αλουμίνιο και κατά συνέπεια ο κύριο σώμα του σωλήνα μπορεί να προστατευτεί από την ατμοσφαιρική διάβρωση. Η συγκεκριμένη κατασκευή είναι πολύ δυνατή και μπορεί να αντισταθεί σε μηχανικές τάσεις, καθαρίζεται εύκολα με νερό ή ατμό και προσφέρεται η δυνατότητα χρήσης διαφορετικού υλικού για τον κεντρικό σωλήνα ανάλογα με τις εκάστοτε απαιτήσεις, ακόμη και αν πρόκειται για τα πιο διαβρωτικά μέσα. Η μέγιστη θερμοκρασία λειτουργίας φτάνει τους 300°C.

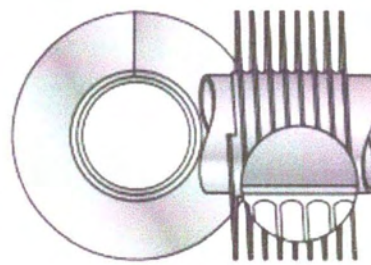
- Ο τύπος L πτερυγιοφόρου σωλήνα (εικόνα 3.5.4): Μια ταινία αλουμινίου που έχει υποστεί κάμψη σχηματίζοντας μορφή L περιελίσσεται ελικοειδώς γύρω από τον στρογγυλό σωλήνα υπό τάση, έτσι ώστε οι βάσεις των πτερυγίων να βρίσκονται πυκνά ή μία δίπλα στην άλλη. Αυτή η διάταξη προστατεύει τον κεντρικό σωλήνα, όταν πρόκειται για διαβρωτικά μέσα και η κατασκευαστική διαδικασία επιτρέπει τη χρήση λεπτότοιχου κεντρικού σωλήνα. Η μεγάλη επιφάνεια επαφής πτερυγίων και σωλήνα βοηθάει στην μεγάλη μετάδοση θερμότητας. Το γεγονός ότι κατασκευάστηκαν για να χρησιμοποιούνται σε χαμηλές θερμοκρασίες συνεπάγεται την προστασία του σωλήνα από τη ρύπανση. Τα πτερύγια κατασκευάζονται από αλουμίνιο και το κύριο σώμα του σωλήνα από οποιοδήποτε υλικό. Η μέγιστη θερμοκρασία λειτουργίας φτάνει τους 130°C.
- Ο τύπος FE/KE/AE πτερυγιοφόρου σωλήνα (εικόνα 3.5.5): Ορθογώνια μηχανικά περασμένα ελάσματα προσαρμόζονται επάνω σε ελλειπτικό σωλήνα και στη συνέχεια γαλβανίζονται με εμβάπτιση. Τα πτερύγια μπορεί να είναι στρογγυλά, ωσειδή ή τετράγωνα. Ο σωλήνας είναι κατασκευασμένος από μη κραματωμένο ή ανοξείδωτο χάλυβα και τα πτερύγια από χάλυβα. Μεταξύ του σωλήνα και του πτερυγίου δημιουργείται μια μεταλλική σύνδεση. Το ελλειπτικό σχήμα προσφέρει πολύ καλές θερμοδυναμικές ιδιότητες, όπως και η προσθήκη διαφραγμάτων. Η διάταξη αυτή αποτρέπει το σχηματισμό δινών και μειώνει την απώλεια πίεσης στην πλευρά του αέρα. Ο γαλβανισμός με εμβάπτιση παρέχει προστασία από τη διάβρωση. Η διάταξη αυτή μπορεί να καθαριστεί εύκολα με νερό υψηλής πίεσης. Η μέγιστη θερμοκρασία λειτουργίας φτάνει τους 360°C.
- Ο τύπος ΧΕ πτερυγιοφόρου σωλήνα (εικόνα 3.5.6): Κατασκευάζονται με τον ίδιο τρόπο που κατασκευάζονται οι σωλήνες τύπου FE/KE/AE, όπως αναφέρθηκε πιο πάνω με τα ίδια υλικά κατασκευής. Έχουν ειδικό σχεδιασμό, που χαρακτηρίζεται από δύο σωλήνες σε ένα πτερύγιο, όπως φαίνεται στην εικόνα, κατάλληλο για μεγάλες πιέσεις σε μικρό χώρο. Οι εξαιρετικές ιδιότητες του γαλβανισμένου σωλήνα με τα χαλύβδινα πτερύγια σε συνδυασμό με συνδυασμό με τη γεωμετρία του στρογγυλού σωλήνα, δίνει

ακαμψία, συνεπώς σταθερότητα. Μπορούν εύκολα να καθαριστούν με νερό υψηλής πίεσης χωρίς να υποστούν βλάβη τα πτερύγια. Η μέγιστη θερμοκρασία λειτουργίας φτάνει τους 360°C.

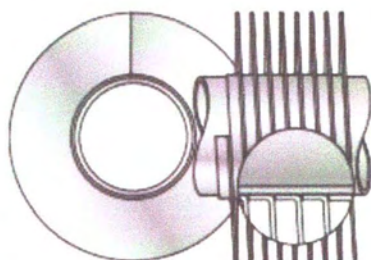
- Ο τύπος ΡΙ/ΗΙ πτερυγιοφόρου σωλήνα (εικόνα 3.5.7): Ελικοειδώς περιελιγμένες χαλύβδινες ταινίες γαλβανίζονται με εμβάπτιση γύρω από ωσειδή κεντρικό σωλήνα από μη κραματωμένο ή ανοξειδωτο χάλυβα. Οι θερμοδυναμικές ιδιότητες και οι απώλειες πίεσης στην πλευρά του αέρα είναι όμοιες με αυτές του τύπου FE/KE/AE πτερυγιοφόρου σωλήνα. Μεγαλύτερη απόσταση μεταξύ των ελλειπτικών σωλήνων ενδείκνυται για εφαρμογές με αυξημένο κίνδυνο ρύπανσης, αφού γίνεται εύκολα ο καθαρισμός τους. Χρησιμοποιείται κυρίως για εναλλάκτες θέρμανσης αερίων καύσης και αερόψυκτους εναλλάκτες. Η μέγιστη θερμοκρασία λειτουργίας φτάνει τους 360°C.



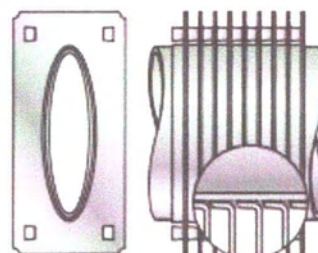
Εικόνα 3.5.2 Τύπος G πτερυγιοφόρου σωλήνα [29]



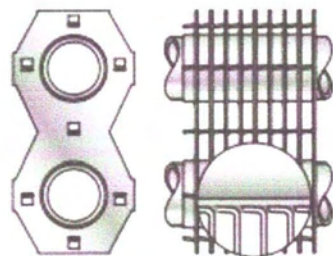
Εικόνα 3.5.3 Τύπος πτερυγιοφόρου σωλήνα διέλασης [29]



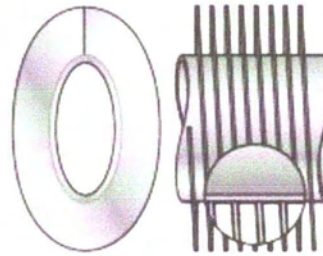
Εικόνα 3.5.4 Τύπος L πτερυγιοφόρου σωλήνα [29]



Εικόνα 3.5.5 Τύπος FE/KE/AE πτερυγιοφόρου σωλήνα [29]



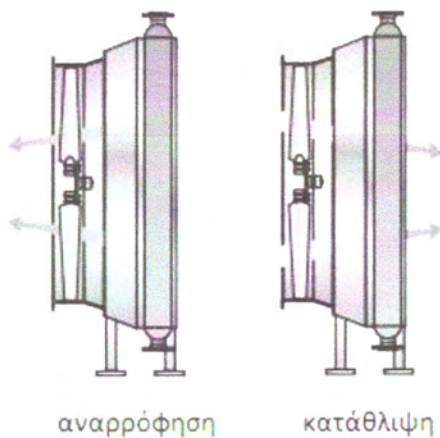
Εικόνα 3.5.6 Τύπος XE πτερυγιοφόρου σωλήνα [29]



Εικόνα 3.5.7 Τύπος ΡΙ/ΗΙ πτερυγιοφόρου σωλήνα [29]

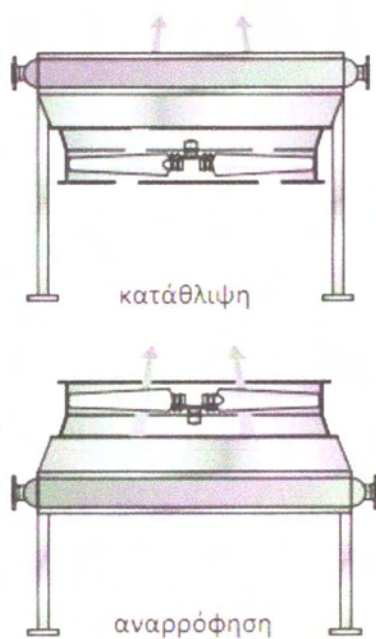
Οι αερόψυκτοι εναλλάκτες μπορούν να λειτουργούν με αναρρόφηση ή κατάθλιψη ανάλογα με τη διάταξη της δέσμης σωλήνων και του ανεμιστήρα .Σύμφωνα με τη θέση της δέσμης πτερυγοφόρων σωλήνων διακρίνονται οι παρακάτω κατασκευαστικές διαμορφώσεις:

- Κατακόρυφη διάταξη(εικόνα 3.5.8)



Εικόνα 3.5.8 Κατακόρυφη διάταξη [29]

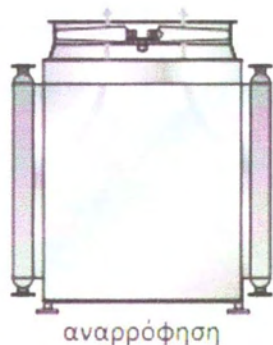
- Οριζόντια διάταξη(εικόνα 3.5.9)



Εικόνα 3.5.9 Οριζόντια διάταξη [29]

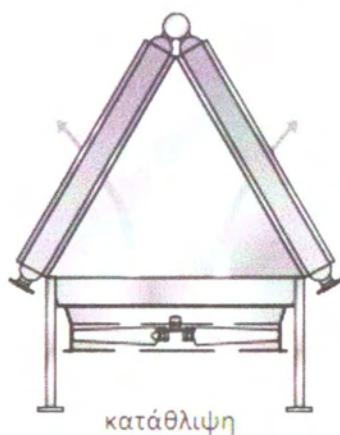


- Διάταξη σε σειρά (εικόνα 3.5.10)



Εικόνα 3.5.10 Διάταξη σε σειρά [29]

- Διάταξη σε σχήμα στέγης (εικόνα 3.5.11)



Εικόνα 3.5.11 Διάταξη σε σχήμα στέγης [29]

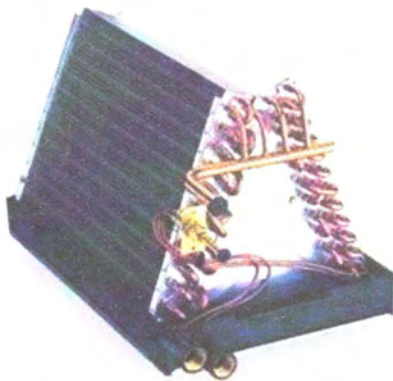
3.5.3 ΟΡΙΑ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ

Οι εναλλάκτες πτερυγιοφόρων σωλήνων μπορούν να αντέξουν πολύ υψηλές πιέσεις στην πλευρά των σωλήνων . Οι μέγιστες θερμοκρασίες καθορίζονται από το είδος συγκόλλησης , καθώς και το είδος και την πυκνότητα των υλικών που χρησιμοποιούνται . Σε συμβατικές εφαρμογές η μέγιστη πίεση μπορεί να φτάσει μέχρι 20 bar . Πρόσφατα, έχουν κατασκευαστεί εναλλάκτες για τον κλιματισμό αυτοκινήτων , που χρησιμοποιούν ως ψυκτικό διοξείδιο του άνθρακα και μπορούν να φτάσουν πίεση 140 bar.

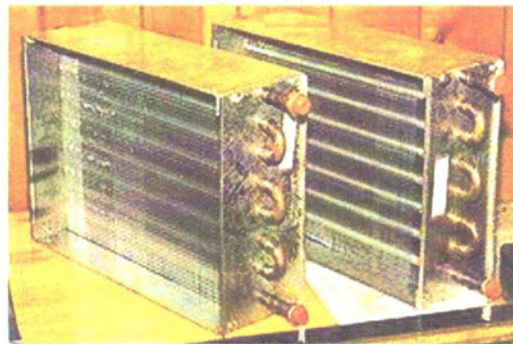
3.5.4 ΚΥΡΙΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ

Οι εναλλάκτες δέσμης πτερυγιοφόρων σωλήνων χρησιμοποιούνται τόσο σε οικιακές εφαρμογές(εικόνα 3.5.12) ,όσο και στη βιομηχανία(εικόνα 3.5.13). Μερικές από τις οικιακές εφαρμογές είναι οι μονάδες κλιματισμού ή το καλοριφέρ αυτοκινήτου(εικόνα 3.5.14). Έχουν εφαρμογή στη συμπύκνωση, στην εξάτμιση και

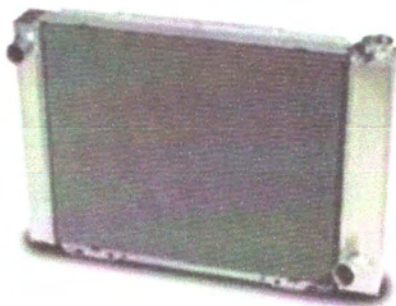
στον κλιματισμό. Χρησιμοποιούνται ακόμη για την ψύξη νερού ή καυσίμων σε οχήματα ή σε μηχανές εσωτερικής καύσης και ως αερόψυκτοι εναλλάκτες θερμότητας σε εργοστάσια παραγωγής ενέργειας. Συχνή είναι η χρήση τους σε εργοστάσια παραγωγής χάλυβα, μεταλλουργίας, σε χημικές μονάδες και διυλιστήρια. Βασική προϋπόθεση είναι ότι το νερό, τα καύσιμα ή το ψυκτικό να ρέουν στους σωλήνες ενώ ο αέρας να ρέει μέσω των πτερυγίων και να υπάρχει επαρκής διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ τους. Μια νέα σχετικά εφαρμογή που έχει διαδοθεί ευρέως είναι η ξηρά ψύξη στα εργοστάσια παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας ατμού και περιλαμβάνει συμπυκνωτή που ψύχεται με αέρα αντί για νερό.



Εικόνα 3.5.12 Εξαιμιστής για μονάδα κλιματισμού [45]



Εικόνα 3.5.13 Βιομηχανικός εναλλάκτης πτερυγοφόρων σωλήνων [45]



Εικόνα 3.5.14 Καλοριφέρ αυτοκινήτου [45]

3.6 ΣΠΕΙΡΟΕΙΔΕΙΣ ΕΝΑΛΛΑΚΤΕΣ

3.6.1 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ

Ο σπειροειδής εναλλάκτης θερμότητας (εικόνα 3.6.1) έχει μεγάλη ιστορία ως εναλλάκτης που χρησιμοποιείται σε εκτενείς εφαρμογές από υγρά με μεγάλη ρύπανση έως εφαρμογές συμπύκνωσης υπό κενό. Λόγω της κυκλικής σχεδίασής του και της μεγάλης επιφάνειας εναλλαγής θερμότητας σε σχέση με τον όγκο του, προσφέρει πολλά πλεονεκτήματα σε σχέση με τους συμβατούς εναλλάκτες αυλών κελύφους.

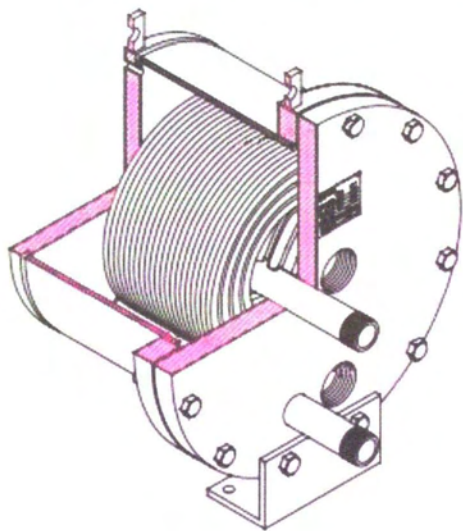


Εικόνα 3.6.1 Σπειροειδής εναλλάκτης θερμότητας της εταιρείας Goochthermal [17]

3.6.2 ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ

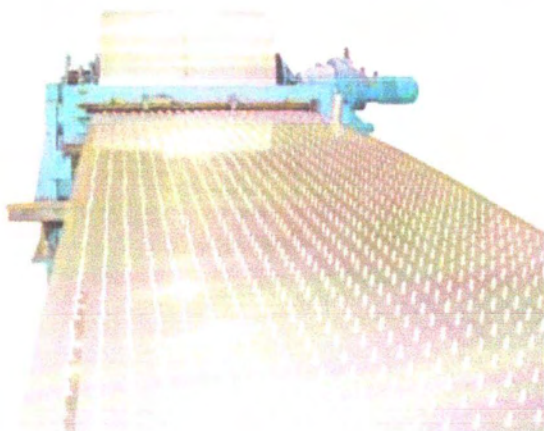
Η κλασική κατασκευή σπειροειδών εναλλακτών θερμότητας είναι απλή. Σύμφωνα με τους B.Thonon και E.Breuil [11], το βασικό σπειροειδές στοιχείο είναι κατασκευασμένο από δύο μεταλλικές πλάκες τυλιγμένες γύρω από ένα κεντρικό κορμό σχηματίζοντας δύο ομόκεντρα σπειροειδή κανάλια (εικόνα 3.6.2). Συνήθως αυτά τα δύο κανάλια είναι συγκολλημένα στις άκρες ώστε καθένα από τα θερμά και ψυχρά ρεύματα να μένει στη δίοδο του και να μην υπάρξει ανάμειξη. Ο εναλλάκτης θερμότητας μπορεί να βελτιστοποιηθεί για την εκάστοτε διεργασία χρησιμοποιώντας διαφορετικές αποστάσεις μεταξύ των καναλιών. Οι αποστάσεις αυτές είναι συνήθως από 5 έως 25 mm, που αντιστοιχούν σε υδραυλικές διαμέτρους 10mm έως 50 mm αντίστοιχα. Αυτό συμβαίνει προκειμένου να μπορεί να επιτευχθεί ο εκάστοτε απαραίτητος συνδυασμός μεγάλης πυκνότητας επιφάνειας ανταλλαγής θερμότητας και μικρής κλίσης για την αποφυγή ρύπανσης.

Η κατασκευή των σπειροειδών εναλλακτών θερμότητας γίνεται κυρίως με ραφή με τη χρήση μεγάλου εύρους μετάλλων που μπορούν να υποστούν κρύα επεξεργασία και συγκόλληση. Τέτοια υλικά είναι ο χάλυβας, το ανοξείδωτο ατσάλι και το τιτάνιο. Για την αποφυγή διάβρωσης χρησιμοποιούνται υψηλής ποιότητας κράματα.



Εικόνα 3.6.2 Κατασκευή σπειροειδών εναλλακτών [19]

Τα κανάλια που δημιουργούνται μπορεί να είναι λεία ή κυματοειδή (εικόνα 3.6.3). Σε μερικές περιπτώσεις συγκολλούνται πείροι στη μία πλευρά καθεμίας από τις δύο μεταλλικές λωρίδες, τα οποία παρέχουν βοήθεια στη ρύθμιση και σταθεροποίηση της απόστασης μεταξύ τους και παράλληλα δημιουργούν μηχανική αντοχή και ένα είδος αναταραχής, η οποία αυξάνει τη μεταφορά θερμότητας.



Εικόνα 3.6.3 Διάταξη μεταλλικής πλάκας σπειροειδούς εναλλάκτη [18]

Η λειτουργία των συγκεκριμένων εναλλακτών δεν περιορίζεται μόνο σε επεξεργασία ρευστών. Με κατάλληλες τροποποιήσεις μπορούν να έχουν τις παρακάτω λειτουργίες:

- Ρεύματα σε πλήρη αντιρροή: Σε αυτή τη λειτουργία το θερμό μέσο ρέει σπειροειδώς από το κέντρο του εναλλάκτη προς τα έξω, ενώ το ψυχρό μέσο ρέει από έξω προς τα μέσα. Χρησιμοποιείται σε εφαρμογές που περιλαμβάνουν δύο υγρά, για συμπύκνωση και ψύξη αερίων.
- Σταυρωτή ροή: Το ένα μέσο ρέει σπειροειδώς σε μια διαδρομή ροής αμφίπλευρα συγκολλητή για στεγανότητα, ενώ το άλλο μέσο ρέει αξονικά μέσα από την αμφίπλευρα ανοιχτή άλλη διαδρομή ροής. Χρησιμοποιείται για αέρια μικρής πυκνότητας που περνάνε αξονικά εμποδίζοντας την πτώση πίεσης. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί και μεταξύ δύο ρευστών αρκεί το ένα από τα δύο να έχει σημαντικά μεγαλύτερο ρυθμό ροής από το άλλο.
- Συνδυασμός: Αυτός ο σχεδιασμός είναι για συμπυκνωτές. Το ψυκτικό μέσο κινείται σπειροειδώς και φεύγει από την κορυφή. Τα θερμά αέρια που εισέρχονται φεύγουν συμπυκνωμένα από το κάτω μέρος.

Μερικά πλεονεκτήματα των εναλλακτών αυτών είναι η αντοχή σε διαβρωτικά ρευστά και σε θερμικά και μηχανικά σοκ, μεγάλη παροχή σε μικρό όγκο, μικρό βάρος και δυνατότητα δημιουργίας πολλών διόδων. Η εταιρεία Sentry [19] προσφέρει εναλλάκτες με παροχή 378 λίτρα το λεπτό.

Οι σπειροειδείς εναλλάκτες είναι αρκετά συμπαγείς και απαιτούν ελάχιστο χώρο για την εγκατάσταση και συντήρησή τους. Τα αφαιρούμενα καλύμματα παρέχουν εύκολη πρόσβαση στις εσωτερικές επιφάνειες του εναλλάκτη δίνοντας τη δυνατότητα για επιθεώρησή τους, συντηρήσεις ρουτίνας όπως και για χειροκίνητο καθαρισμό, αν θεωρηθεί απαραίτητο. Δε χρειάζονται συχνό καθαρισμό γιατί συχνά τείνουν να καθαρίζονται μόνοι τους.

3.6.3 ΟΡΙΑ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ

Η μέγιστη θερμοκρασία λειτουργίας καθορίζεται από την αντοχή του στεγανοποιητικού του καπακιού και είναι τυπικά 400°C. Ειδικές κατασκευές που γίνονται χωρίς στεγανοποιητικά μπορεί να φτάσουν και θερμοκρασίες έως και 850°C. Η μέγιστη πίεση είναι τα 17 bar και μπορεί να φτάσει και τα 30 bar μια ειδική σχεδίαση.

3.6.4 ΚΥΡΙΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ

Οι σπειροειδείς εναλλάκτες θερμότητας αποτελούν ένα σημαντικό κομμάτι της ιστορίας των εναλλακτών και χρησιμοποιούνται κυρίως για τη μεταφορά θερμότητας μεταξύ υγρών που περιέχουν αιωρούμενα υλικά, όπως οι πολτοί. Οι δίοδοι μονής ροής στους σπειροειδείς εναλλάκτες θερμότητας δημιουργούν μεγάλο ρυθμό διάτμησης, ο οποίος βοηθάει στην απομάκρυνση των ιζημάτων. Λόγω του μεγάλου εύρους των καναλιών από τα οποία αποτελούνται, είναι ιδανικοί για ρευστά που είναι επιρρεπή στη ρύπανση, στη βιομηχανία τροφίμων, στη ζυθοποιία ή στην οινοποιία. Μια άλλη εφαρμογή των σπειροειδών εναλλακτών θερμότητας στη χημική

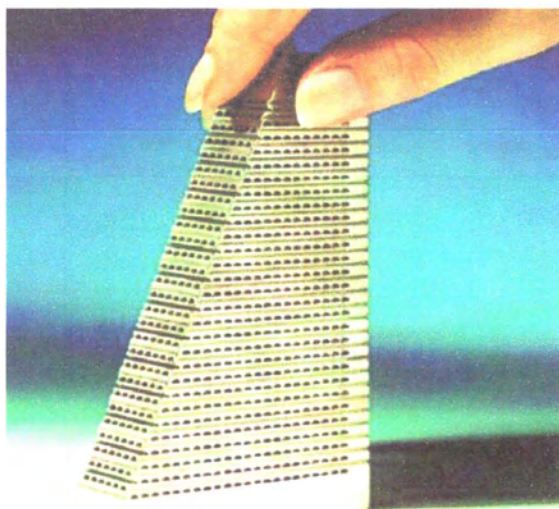
βιομηχανία είναι η επεξεργασία τσιμεντολάσπης από PVC , η επεξεργασία υγρών με μεγάλο ιξώδες ,όπως λάδι , η ανάκτηση θερμότητας από βιομηχανικά ρευστά καθώς και η ρύθμιση της θερμοκρασίας της υλούς αποχέτευσης. Ειδική κατασκευαστική μορφή σπειροειδών εναλλακτών είναι ο συμπυκνωτής , ο οποίος μπορεί να εγκατασταθεί στην κεφαλή μιας στήλης απόσταξης.

3.7 ΕΝΑΛΛΑΚΤΕΣ ΤΥΠΩΜΕΝΩΝ ΚΥΚΛΩΜΑΤΩΝ

3.7.1 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ

Οι εναλλάκτες τυπωμένων κυκλωμάτων(εικόνα 3.7.1) είναι ιδιαίτερα συμπαγείς, δεν διαβρώνονται και μπορούν να λειτουργήσουν σε πολύ μεγάλες πιέσεις και σε θερμοκρασίες με εύρος από κρυογονικές μέχρι εκατοντάδες βαθμούς Κελσίου. Αρχικά δημιουργήθηκαν για εφαρμογές στην ψύξη και χρησιμοποιείται για την παραγωγή τους η μέθοδος συγκόλλησης με διάχυση.

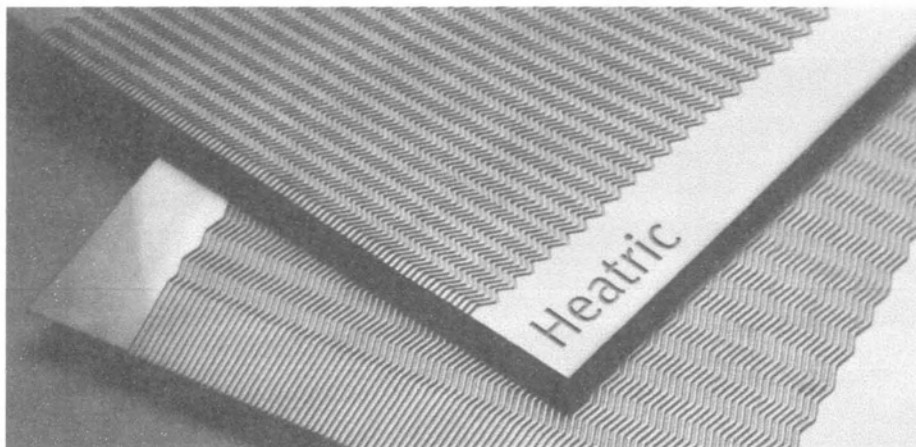
Οι εναλλάκτες τυπωμένων κυκλωμάτων αποτελούνται από επίπεδες πλάκες κατασκευασμένες από κράμα μετάλλου με διόδους ροής ρευστών χαραγμένων φωτοχημικά επάνω τους. Αρχικά, αυτό το είδος εναλλακτών κατασκευάστηκε στην Αυστραλία από την εταιρία Heatric [43], όπου χρησιμοποιήθηκε κυρίως για ψύξη το 1985. Το 1990, η εταιρία μεταφέρθηκε στο Ηνωμένο Βασίλειο , όπου συνεχίζει μέχρι σήμερα κάνοντας και εξαγωγές. Ο σχεδιασμός των εναλλακτών τυπωμένων κυκλωμάτων προσφέρει ένα μοναδικό συνδυασμό από καινοτόμες κατασκευαστικές διαδικασίες και ένα εύρος πιθανών εφαρμογών. Σε σχέση με άλλους συμπαγείς εναλλάκτες είναι δυνητικά κάτι περισσότερο από απλός συμπαγής εναλλάκτης πλακών. Η δομή του έχει εφαρμογές και σε άλλες λειτουργικές μονάδες, όπως αντιδραστήρες, μεταφορά μάζας και αναμείκτες.



Εικόνα 3.7.1 Εναλλάκτης τυπωμένων κυκλωμάτων της εταιρείας Heatric [43]

3.7.2 ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ

Όπως αναφέρει ο Hesselgreaves [3], στους εναλλάκτες τυπωμένων κυκλωμάτων, όπως υποδηλώνει και το όνομά τους, χρησιμοποιείται η ίδια τεχνική που χρησιμοποιείται στη βιομηχανία ηλεκτρονικών για την κατασκευή τυπωμένων ηλεκτρονικών πλακετών. Το πρώτο στάδιο περιλαμβάνει το σχηματισμό διόδων ροής του ρευστού με χημική εγχάραξη πάνω στην μία πλευρά καθεμίας από τις μεταλλικές πλάκες (εικόνα 3.7.2). Αυτή η τεχνική επιτρέπει εύρος καναλιών ροής από 1 έως 2 mm, βάθος που κυμαίνεται από 0,5 έως 2 mm και υδραυλικές διαμέτρους από 1,5 έως 3 mm. Το σχήμα των διόδων μπορεί να είναι αυλακωτό. Το δεύτερο στάδιο περιλαμβάνει την ένωση με διάχυση στοιβάδων από πλάκες, που φέρουν τις κατάλληλες για το εκάστοτε υγρό, χαραγμένες διόδους ροής. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία ενός εναλλάκτη που αποτελείται αποκλειστικά από μέταλλο και είναι συμπαγής και πολύ ανθεκτικός.



Εικόνα 3.7.2 Μεταλλική πλάκα εναλλάκτη τυπωμένων κυκλωμάτων της εταιρείας Heatric [43]

Η συγκόλληση με διάχυση συμβαίνει όταν δύο καθαρές επίπεδες πλάκες έρχονται σε επαφή μεταξύ τους σε περιβάλλον με πολύ μεγάλη θερμοκρασία σε ελεγχόμενη ατμόσφαιρα και επιτρέπει τη δημιουργία κρυσταλλικής δομής με ιδιότητες που πλησιάζουν σημαντικά σε αυτές του αρχικού μετάλλου. Σε αυτή την επεξεργασία δε χρειάζονται ελαστομερή στεγανοποιητικά ούτε κόλληση με χαλκό. Λόγω της ένωσης με διάχυση η διάρκεια ζωής του συγκεκριμένου εναλλάκτη είναι πολύ μεγαλύτερη από κάθε άλλο εναλλάκτη θερμότητας που έχει υποστεί κόλληση.

Το τελικό στάδιο δημιουργίας του εναλλάκτη περιλαμβάνει τη συγκόλληση των στοιβάδων μεταξύ τους προκειμένου να επιτευχθεί η επιθυμητή θερμοχωρητικότητα. Τέλος, ακροφύσια συγκολλούνται στο κύριο σώμα για να οδηγήσουν το ρευστό στα σωστά περάσματα.

Τα υλικά της κατασκευής περιλαμβάνουν ανοξείδωτο ασάλι (SS300) και τιτάνιο. Συνηθισμένη είναι και η χρήση νικελίου ή κραμάτων νικελίου, τα οποία εμποδίζουν

τη διάβρωση. Αναπτύσσεται πλέον και μία παραλλαγή από χαλκό. Ο απλός χάλυβας δε χρησιμοποιείται για δύο βασικούς λόγους. Πρώτον, η μικρή διατομή των καναλιών ροής δεν αφήνει περιθώρια διάβρωσης, αφού αυτό θα δημιουργούσε στενώσεις, ίσως και εμπόδιση της ροής. Δεύτερον, ο χάλυβας δεν μπορεί να υποστεί επεξεργασία διάχυσης.

3.7.3 ΟΡΙΑ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ

Σύμφωνα με την εταιρεία Heatric [43], το βάρος τους μπορεί να φτάσει από 1 κιλό έως 60 τόνους. Οι συγκεκριμένοι εναλλάκτες ανήκουν στην κατηγορία των συμπαγών εναλλακτών θερμότητας καθώς διαθέτουν μεγάλη επιφάνεια ανταλλαγής θερμότητας με πηλίκιο προς τον όγκο από $1300 \text{ m}^2/\text{m}^3$ σε πίεση 100 bar και $650 \text{ m}^2/\text{m}^3$ σε πίεση 500 bar, έως και $2500 \text{ m}^2/\text{m}^3$. Η μέγιστη επιφάνεια εναλλαγής μπορεί να είναι 10000 m^2 ανά εναλλάκτη. Το μέγεθος της πλάκας φτάνει και το $1,2\text{m} \times 0,6\text{m}$ και το πάχος κυμαίνεται από . Η απόδοση του εναλλάκτη φτάνει το 98%.

Οι εναλλάκτες τυπωμένων κυκλωμάτων δίνουν τη δυνατότητα λειτουργίας σε μεγάλη θερμοκρασία και πίεση ταυτόχρονα. Μπορούν να λειτουργούν σε πιέσεις από 500 έως 1000 bar και σε θερμοκρασίες από $-200 \text{ }^\circ\text{C}$ έως $1160 \text{ }^\circ\text{C}$. Η ελάχιστη θερμοκρασιακή διαφορά είναι $1-2 \text{ }^\circ\text{C}$.

3.7.4 ΚΥΡΙΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ

Οι εναλλάκτες τυπωμένων κυκλωμάτων χρησιμοποιούνται κυρίως σε εφαρμογές που χρειάζονται αντοχή σε μεγάλες πιέσεις, μεγάλες θερμοκρασίες και διάβρωση, τα οποία αποτελούν αποτρεπτικούς παράγοντες για τη χρήση των απλών εναλλακτών θερμότητας πλακών.

Οι συγκεκριμένοι εναλλάκτες υποστηρίζουν τη λειτουργία με αέρια, υγρά αλλά και ροή δύο φάσεων. Χρησιμοποιούνται στην επεξεργασία καυσίμων, η οποία περιλαμβάνει την επεξεργασία αερίων (ψύξη συμπιεστή), την αφυδάτωση, την παραγωγή σύνθετων καυσίμων (μεθανόλη). Άλλη βασική εφαρμογή έχουν στην χημική βιομηχανία για την επεξεργασία οξέων (νιτρικά οξέα, φωσφορικά οξέα), την επεξεργασία αλκαλίων (καυστική σόδα, καυστική ποτάσα), την επεξεργασία λιπασμάτων, την επεξεργασία πετροχημικών, την παραγωγή φαρμακευτικών προϊόντων και πλαστικών. Στον τομέα της ενέργειας χρησιμοποιούνται στη θέρμανση νερού τροφοδοσίας, στη γεωθερμία και στις χημικές αντλίες θερμότητας.

3.8 ΕΝΑΛΛΑΚΤΕΣ Marbond™

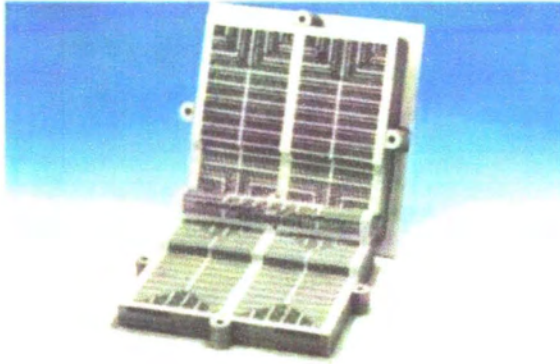
3.8.1 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ

Το Marbond™ είναι η εμπορική ονομασία των εναλλακτών που σχεδιάστηκαν και δημιουργήθηκαν από την εταιρεία Chart Marston. Ο εναλλάκτης και αντιδραστήρας Marbond™ είναι από τους πιο πρόσφατους συμπαγείς εναλλάκτες θερμότητας. Στόχος της κατασκευής του είναι ο συνδυασμός των πλεονεκτημάτων των συμπαγών εναλλακτών θερμότητας με τη δυνατότητα δημιουργίας αντιδράσεων μέσα στον εναλλάκτη θερμότητας. Την ευελιξία και τη μεγάλη αντοχή που προσφέρει ο σχεδιασμός των εναλλακτών τυπωμένων κυκλωμάτων έρχεται να ανταγωνιστεί ο καινοτόμος σχεδιασμός του εναλλάκτη Marbond™. Μερικά από τα πολλά πλεονεκτήματά του είναι ότι έχει μικρότερο όγκο και βάρος, έχει μικρότερο κόστος εγκατάστασης και προσφέρει εξοικονόμηση ενέργειας, αφού η θερμοκρασιακή διαφορά μεταξύ των ρευστών που αλληλεπιδρούν είναι σχετικά μικρή. Τέλος, οι διαδικασίες είναι πιο ασφαλείς, αφού χρειάζονται μικρότερες ποσότητες ρευστών και υπάρχει αυστηρός έλεγχος της θερμοκρασίας που καθιστά απίθανες τις διαρροές.

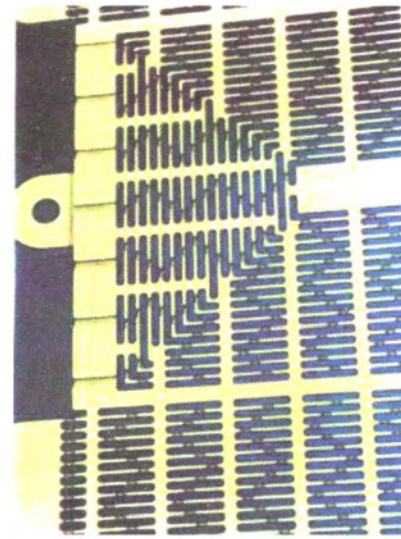
3.8.2 ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ

Ο συμπαγής εναλλάκτης Marbond™ κατασκευάζεται με παρόμοιο τρόπο με αυτόν που κατασκευάζεται ο συμπαγής εναλλάκτης τυπωμένων κυκλωμάτων (εικόνα 3.8.1). Όπως αναφέρουν οι Piyush Sabharwall και Eung Soo Kim [5], κατασκευάζεται από επίπεδες πλάκες με αυλακώσεις, φωτοχημικά χαραγμένες (εικόνα 3.8.2). Στη συνέχεια οι στοιβάδες συγκολλούνται μεταξύ τους με διάχυση. Σε αντίθεση με τους εναλλάκτες τυπωμένων κυκλωμάτων, η κατασκευαστική διαδικασία αυτών των εναλλακτών επιτρέπει τη δημιουργία μικρών διαδρόμων ροής ρευστού το οποίο μεγαλώνει σημαντικά την πυκνότητα επιφάνειας του εναλλάκτη και κατά συνέπεια την απόδοσή του στη μεταφορά θερμότητας. Η δημιουργία των διαδρόμων αυτών γίνεται με την τοποθέτηση μερικών πιο μικρών διάτρητων πλακών, δίνοντας τη δυνατότητα μικρότερων υδραυλικών διαμέτρων, ανάλογα με το πάχος των πλακών και το πλάτος των σχισμών. Η επιφάνειά του έχει πολλές διαφορετικές διαμορφώσεις που επιτρέπουν τη δημιουργία περασμάτων με μεγάλη ακρίβεια.

Τα υλικά από τα οποία κατασκευάζεται περιορίζονται από την προϋπόθεση ότι μπορούν να δεχθούν συγκόλληση με διάχυση. Τέτοια υλικά είναι το τιτάνιο, το ανοξείδωτο ατσάλι και το νικέλιο, τα οποία μπορούν να υποστηρίξουν τη λειτουργία του εναλλάκτη και σε πιθανώς διαβρωτικό περιβάλλον. Το μέγεθός του είναι περίπου το ίδιο με αυτό ενός φορητού υπολογιστή με διόδους διαμέτρου περίπου 1mm.



Εικόνα 3.8.1 Αναπτυγμένη μορφή εναλλάκτη Marbond™



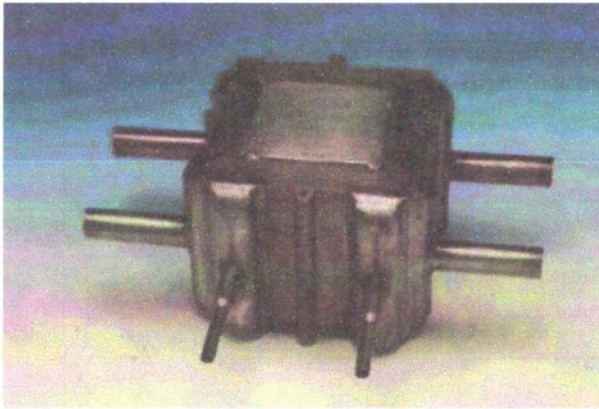
Εικόνα 3.8.2 Φωτοχημικά χαραγμένες πλάκες

3.8.3 ΟΡΙΑ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ

Ο εναλλάκτης Marbond™ θεωρείται συμπαγής εναλλάκτης που μπορεί να λειτουργήσει σε ένα αρκετά μεγάλο εύρος πιέσεων και θερμοκρασιών, σε αντίθεση με τους συμπαγείς εναλλάκτες με στεγανομερή ελαστοποιητικά . Οι θερμοκρασίες κυμαίνονται από $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$ έως $900\text{ }^{\circ}\text{C}$. Οι πιέσεις μπορούν να φτάσουν και να ξεπεράσουν τα 400 bar.

3.8.4 ΚΥΡΙΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ

Οι συγκεκριμένοι εναλλάκτες παρουσιάζουν μεγάλη ευελιξία όσον αφορά την κατασκευή τους κι έτσι μπορούν να προσφέρουν ένα μεγάλο εύρος στη γεωμετρία των διόδων ροής. Επίσης επιτρέπουν το πέρασμα πολλών ρευμάτων ταυτόχρονα και διαφορετικής φύσης. Αυτός ο τύπος εναλλάκτη επιτρέπει τη χρήση ρευστών μονής και διπλής φάσης και χρησιμοποιείται και ως αντιδραστήρας. Έχουν πολλές εφαρμογές στη βιομηχανία επεξεργασίας τροφίμων . Ακόμη, έχουν αποδειχθεί ιδιαίτερα χρήσιμοι στη χημική βιομηχανία αφού αποτελούν μηχανήματα που μπορούν να χρησιμοποιηθούν τόσο για ανάμειξη , όσο και για χημικές αντιδράσεις(εικόνα 3.8.3) και για ανταλλαγή θερμότητας .



Εικόνα 3.8.3 Αντιδραστήρας Marbond™

3.9 ΕΝΑΛΛΑΚΤΕΣ ΑΠΟ ΠΟΛΥΜΕΡΗ

3.9.1 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ

Τα πολυμερή είναι μεγάλα μόρια , ή μακρομόρια , που αποτελούνται από πολλές επαναλαμβανόμενες υπομονάδες. Όπως αναφέρει ο Hesselgreaves[3], οι εναλλάκτες από πολυμερή έχουν γίνει αρκετά δημοφιλείς σαν εναλλακτική λύση των μεταλλικών εναλλακτών καθώς προσφέρουν μεγάλη αντοχή σε διάβρωση σε διαδικασίες που περιλαμβάνουν ισχυρά οξέα. Αυτοί οι εναλλάκτες μπορούν να υποστηρίξουν διαδικασίες με ρευστά και αέρια και να αντισταθούν στη ρύπανση . Σημαντικό στοιχείο είναι ότι η κατασκευή και η συντήρηση τους γίνεται πιο εύκολα σε σχέση με τους εναλλάκτες που κατασκευάζονται από μέταλλο , άρα και το συνολικό κόστος τους είναι μικρότερο. Επίσης οι εναλλάκτες από πολυμερή έχουν μικρότερο βάρος και όγκο. Λαμβάνοντας υπόψη την πρόοδο που έχει σημειωθεί στα συνθετικά υλικά και σε σύνθετα υλικά ναοκλίμακας, η χρήση των πολυμερών για την κατασκευή εναλλακτών έχει πολλά να προσφέρει στο μέλλον.

3.9.2 ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ

Τα κύρια είδη πολυμερών υψηλής απόδοσης που μπορούν να χρησιμοποιηθούν στην κατασκευή συμπαγών εναλλακτών θερμότητας είναι (οι πληροφορίες για τα παρακάτω πολυμερή προήλθαν κυρίως από την εταιρεία resinex [32]):

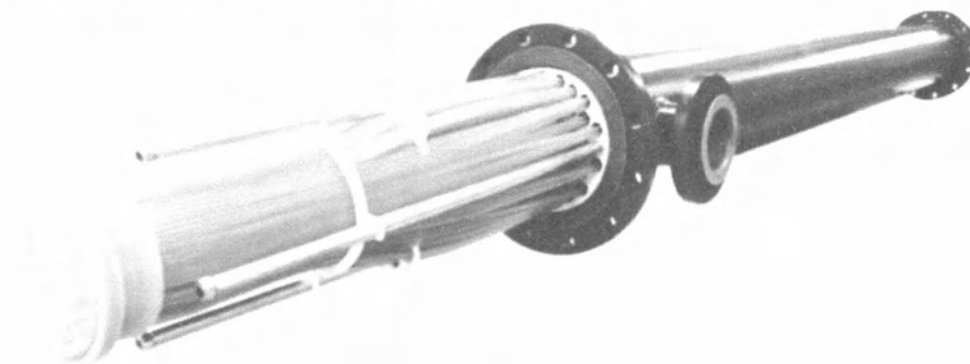
- Το PVDF (φθοριούχο πολυβινυλιδένιο ή διφθοριούχο πολυβινυλιδένιο) είναι ένα θερμοπλαστικό φθοροπολυμερές, με εξαιρετικό βαθμό αδράνειας . Το PVDF λαμβάνεται με πολυμερισμό του διφθοριούχου βινυλιδενίου. Αντέχει σε θερμοκρασίες έως και 175°C. Τα μέρη που παράγονται από PVDF μέσω χύτευσης με έγχυση ή με εξώθηση χρησιμοποιούνται για εφαρμογές που περιλαμβάνουν χημικές ουσίες όπως αλογόνα (χλώριο, βρώμιο, φθόριο, ιώδιο) και σε ισχυρά οξέα, ακόμη και σε υψηλές θερμοκρασίες, καθώς είναι χημικά ανθεκτικά σε αυτές. Ως μανδύας καλωδίων, η ρητίνη PVDF μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε θερμοκρασίες έως 175°C με εγγενείς ιδιότητες αντοχής στις φλόγες.

- Το PTFE (TEFLON) είναι η κοινή ονομασία του πολυτετραφθοροαιθυλενίου , το οποίο είναι ένα δυνάμει τοξικό οργανικό πολυμερές που χρησιμοποιείται κυρίως ως επικάλυψη αντικειμένων και συστατικό πλαστικών αντικειμένων. Το τεφλόν είναι χημικά αδρανές, αντέχει σε υψηλές θερμοκρασίες είναι ολισθηρό και άκαυστο. Εκλύει τοξικές ουσίες κυρίως όταν θερμαίνεται, ενώ το ίδιο το υλικό δεν είναι τοξικό. Επιπλέον, το πολυτετραφθοροαιθυλένιο έχει πολύ καλές διηλεκτρικές ιδιότητες και προτιμάται στην κατασκευή ηλεκτρικών κυκλωμάτων γιατί ταυτόχρονα έχει υψηλή θερμοκρασιακή αντοχή. Λειτουργεί σε θερμοκρασίες έως και 204°C.
- Το πολυπροπυλένιο (PP) είναι εύκολο στην επεξεργασία, έχει χαμηλή πυκνότητα και είναι σχετικά φθινό σε σχέση με άλλα πολυμερή. Οι πρόσφατες τεχνολογικές εξελίξεις έχουν δημιουργήσει πιο σκληρά, πιο διαυγή και πιο διαφανή προϊόντα. Ένα άλλο χαρακτηριστικό του πολυπροπυλενίου είναι η εξαιρετική χημική αντοχή του σε πολλούς χημικούς διαλύτες, βάσεις και οξέα και είναι μη τοξικό. Ένα εμπορικό πολυπροπυλένιο έχει σημείο τήξης που κυμαίνεται από 160 έως 166 °C , ανάλογα με το υλικό διαύγειας.
- Το πολυαιθυλένιο (PE) είναι ένα από τα πιο ευρέως χρησιμοποιούμενα πλαστικά στον κόσμο και είναι ιδιαίτερα διαδεδομένο σε πολλές βιομηχανίες, κλάδους της αγοράς και εφαρμογές. Είναι διαφανές , στιβαρό ώστε να μη σπάει και ταυτόχρονα αρκετά εύκαμπτο. Χρησιμοποιείται σε εφαρμογές με μέγιστη θερμοκρασία τους 340°C.
- Οι πολυανθρακικές ρητίνες (PC) έχουν έναν μοναδικό συνδυασμό σκληρότητας, οπτικής διαφάνειας, ακαμψίας και αντοχής. Οι πολυανθρακικές ρητίνες (PC) εμφανίζουν επίσης εξαιρετικές ηλεκτρικές ιδιότητες. Το πολυανθρακικό είναι άμορφο και διαφανές. Το πολυανθρακικό είναι κατάλληλο τόσο για χύτευση με έγχυση και όσο και για χύτευση με εξώθηση. Ενώ παρουσιάζει μεγάλη χημική αντοχή στα οξέα , δεν είναι τόσο ανθεκτικό στα αλκάλια και τους διαλύτες. Χρησιμοποιείται σε εφαρμογές με μέγιστη θερμοκρασία τους 135°C.
- Το θειούχο πολυφαινυλένιο (PPS) είναι ένα ημι-κρυσταλλικό, υψηλής απόδοσης πλαστικό προηγμένης τεχνολογίας με εξαιρετικά υψηλές μηχανικές ιδιότητες (αντοχή στον ερπυσμό, ακαμψία και σκληρότητα), αντοχή στην υψηλή θερμοκρασία και χημική αντίσταση, οι οποίες συχνά καθιστούν το PPS την προτιμώμενη εναλλακτική αντί των μετάλλων ή των θερμοσκληρυνόμενων υλικών. Το θειούχο πολυφαινυλένιο εμφανίζει μία από τις υψηλότερες αντοχές στη θερμοκρασία μεταξύ των θερμοπλαστικών. Ορισμένα ενισχυμένα προϊόντα PPS επιτυγχάνουν θερμοκρασία θερμικής παραμόρφωσης 270°C.
- Το οξειδίο του πολυφαινυλενίου (PPO) έχει παρόμοια χημική σύσταση με το τον αιθέρα πολυφαινυλενίου(PPE) και θεωρούνται ισάξια. Έχει καλή θερμική αντίσταση αλλά χαμηλή χημική αντίσταση. Παρ' όλα αυτά η αντοχή και η σταθερότητα το καθιστούν χρήσιμο στη βιομηχανία.

- Η πολυαιθεροαιθεροκετόνη (PEEK) είναι ένα ισχυρό και άκαμπτο θερμοπλαστικό υλικό που χρησιμοποιείται συχνά σε εφαρμογές όπου απαιτούνται υψηλές θερμοκρασίες. Έχει εξαιρετικές μηχανικές ιδιότητες ακόμη και σε υψηλές θερμοκρασίες, μεγάλη αντοχή σε χημικά, είναι ανθεκτικό σε υψηλής ενέργειας ακτινοβολία και έχει συνεχή θερμοκρασία λειτουργίας έως και 260°C.
- Η πολυσουλφόνη (PSU) είναι γνωστή για την αντοχή και τη σταθερότητα της σε υψηλές θερμοκρασίες. Έχει καλή αντοχή ερπυσμού και αντέχει τους περισσότερους διαλύτες, έλαια, οξέα και αλκάλια. Μπορεί να λειτουργεί σε συνεχή θερμοκρασία έως και 260°C.

Είναι γνωστό ότι τα πολυμερή έχουν χαμηλή αντοχή, μικρή αντοχή ερπυσμού, μικρή θερμική αγωγιμότητα και μεγάλη θερμική διαστολή. Ωστόσο, έχουν υψηλή αντοχή σε χημική διάβρωση και σχετικά χαμηλό κόστος που τους καθιστά ελκυστικές επιλογές σε ορισμένες εφαρμογές.

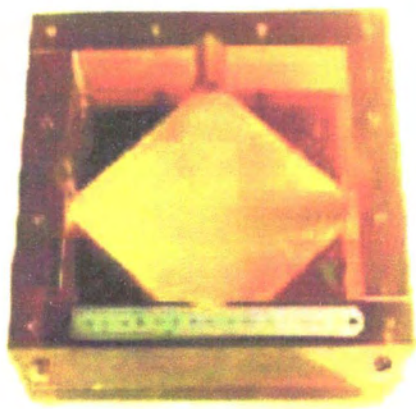
Στη βιομηχανία υπάρχουν τρία κύρια είδη εναλλακτών θερμότητας από πολυμερή, τα οποία είναι οι πολυμερείς εναλλάκτες πλακών, οι πολυμερείς σπειροειδείς εναλλάκτες και οι πολυμερείς εναλλάκτες αυλών κελύφους (εικόνα 3.9.1). Ο τρόπος κατασκευής τους είναι παρόμοιος με αυτόν που χρησιμοποιείται για τους μεταλλικούς αντίστοιχους συμπαγείς εναλλάκτες.



Εικόνα 3.9.1 Εναλλάκτης αυλών κελύφους από Teflon [46]

Σύμφωνα με στοιχεία από την ευρωπαϊκή κοινότητα έρευνας CORDIS [38], πρόσφατα σχεδιάστηκε ένα νέο είδος εναλλακτών θερμότητας με πολυμερική μεμβράνη που προσφέρουν μεγάλη θερμική απόδοση, μειωμένη ρύπανση, σημαντικά μικρό βάρος και κόστος κατασκευής, αντίσταση σε χημικά επιθετικά υλικά και ικανότητα να διαχειριστούν ταυτόχρονα υγρά και αέρια. Είναι συμπαγείς και μπορεί να είναι τετράγωνοι (εικόνα 3.9.2) ή σπειροειδείς (εικόνα 3.9.3). Ένα στοιχείο που τους ξεχωρίζει από τους υπόλοιπους είναι ότι αποτελούνται από πολυαιθεροαιθεροκετόνη (PEEK) και μπορεί να έχει συνεχόμενη θερμοκρασία λειτουργίας 220 °C. Παρά το ότι η θερμική αγωγιμότητα των πολυμερών δεν είναι τόσο μεγάλη όσο των μετάλλων, ο συγκεκριμένος εναλλάκτης κατασκευάζεται από μεμβράνες με πάχος 100μm που παρέχει καλύτερη θερμική απόδοση παρόλο που ο

συντελεστής μεταφοράς θερμότητας είναι λιγότερο από $4000 \text{ W/m}^2\text{k}$. Η ένωση γίνεται με συγκόλληση με λέιζερ , με συνεξώθηση χρησιμοποιώντας διαφορετικά υλικά και με εποξικά φύλλα.



Εικόνα 3.9.2 Τετράγωνος εναλλάκτης με πολυμερική μεμβράνη[47]



Εικόνα 3.9.3 Σπειροειδής εναλλάκτης με πολυμερική μεμβράνη [47]

3.9.3 ΟΡΙΑ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ

Οι πολυμερείς εναλλάκτες πλακών από πολυπροπυλένιο (PP) έχουν εύρος θερμοκρασιών $-40 \text{ }^{\circ}\text{C}$ έως $90 \text{ }^{\circ}\text{C}$ και παρουσιάζουν πτώση πίεσης από 10 έως 400 Pa . Εναλλάκτες πλακών που κατασκευάζονται από μίγμα PVDF (φθοριούχο πολυβινυλιδένιο ή διφθοριούχο πολυβινυλιδένιο) και PP (πολυπροπυλένιο) λειτουργούν σε θερμοκρασίες $75 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

Έχουν κατασκευαστεί πλαστικοί εναλλάκτες θερμότητας που μπορούν να φτάσουν πιέσεις άνω των 60 bar .

3.9.4 ΚΥΡΙΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ

Οι πολυμερείς εναλλάκτες πλακών χρησιμοποιούνται ως κλιματιστικά , αφού έχουν τη δυνατότητα να μειώσουν τις ενεργειακές ανάγκες στον κλιματισμό χρησιμοποιώντας τον αέρα εξάτμισης για να ρυθμίσουν τον αέρα εισαγωγής χωρίς φυσική ανάμιξη.

Άλλοι τέτοιοι εναλλάκτες που κατασκευάζονται από μίγμα PVDF (φθοριούχο πολυβινυλιδένιο ή διφθοριούχο πολυβινυλιδένιο) και PP (πολυπροπυλένιο) χρησιμοποιούνται εντατικά σε συστήματα θέρμανσης και κλιματισμού , όπως το καλοριφέρ αυτοκινήτου.

Οι πολυμερείς σπειροειδείς εναλλάκτες είναι γενικά κατάλληλοι στη βιομηχανία ηλεκτρονικών ειδών για χάραξη, στην επένδυση με πολύτιμα μέταλλα και στις δεξαμενές απιονισμένου νερού χρησιμοποιούνται για την παραγωγή των πλακιδίων, μικροκυκλωμάτων και συνδέσμων.

Σύμφωνα με τους Sadik Kakaç , Hongtan Liu και Anchasa Pramuanjaroenkij [10] , οι εναλλάκτες αυλών κελύφους από τεφλόν χρησιμοποιούνται για ψύξη θειικού οξέος

και για να βοηθήσουν τους κατασκευαστές του χαλκού να μειώσουν το κόστος και να βελτιώσουν την παραγωγή θειικού οξέος.

Οι πιθανές εφαρμογές των εναλλακτών με πολυμερείς μεμβράνες έχουν μεγάλο εύρος και περιλαμβάνουν τη χημική βιομηχανία και βιομηχανίες φαγητών και τροφίμων. Θα μπορούσαν να λειτουργήσουν ως εξατμιστές ,σε εργοστάσια ψύξης, στην αεροπορία, σε βιομηχανίες κυψελών καυσίμου, στις αυτοκινητοβιομηχανίες ως ψύκτες, ως ψύκτες με φίλτρα και ως καλοριφέρ.

3.10 ΚΕΡΑΜΙΚΟΙ ΕΝΑΛΛΑΚΤΕΣ

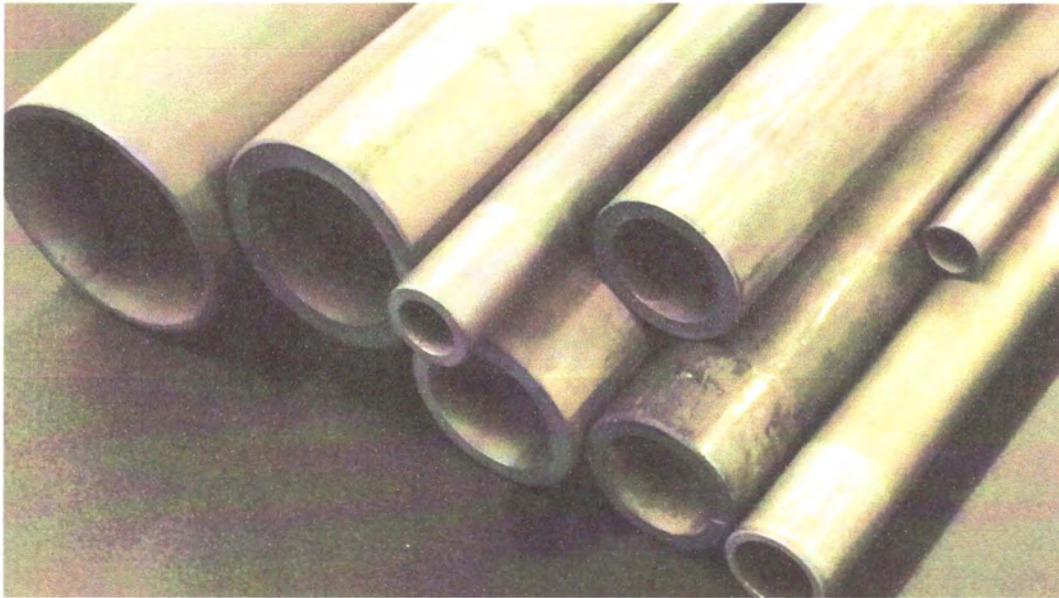
3.10.1 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ

Οι μεταλλικοί εναλλάκτες θερμότητας έχουν αποδειχθεί πολύ σημαντικοί σε πολλές εφαρμογές στη βιομηχανία , όμως οι διάφορες διαδικασίες και η τεχνολογική ανάπτυξη έχουν δημιουργήσει ανάγκες που υπερβαίνουν τα όρια αυτών των εναλλακτών. Προκειμένου να ανταπεξέλθουν σε μεγάλες θερμοκρασίες και σε περιβάλλον με διάβρωση , απαιτούνται υλικά με μεγάλο κόστος , γεγονός που αυξάνει το συνολικό κόστος των συστημάτων και θέτει σε κίνδυνο την αντοχή τους. Η έρευνα και η πρόοδος στα κεραμικά υλικά ,εδώ και 50 χρόνια σχεδόν, ήρθε να δώσει τη λύση σε αυτό το πρόβλημα. Κεραμικό υλικό είναι κάθε ανόργανο μη μεταλλικό υλικό, το οποίο έχει υποστεί θερμική κατεργασία σε υψηλές θερμοκρασίες (>1000 °C) και περιλαμβάνει δύο ή περισσότερα στοιχεία, τα οποία συνδέονται μεταξύ τους με ισχυρούς δεσμούς, δηλαδή ιοντικούς, ομοιοπολικούς ή συνδυασμό αυτών και ακολουθούν είτε περιοδική διάταξη (κρυσταλλικά κεραμικά) είτε τυχαία διάταξη (άμορφα γυαλιά).

3.10.2 ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ

Οι κεραμικοί εναλλάκτες κατασκευάζονται είτε αντικαθιστώντας στους ήδη υπάρχοντες συμπαγείς εναλλάκτες θερμότητας κάποια μέρη με αντίστοιχα κεραμικά είτε με την κατασκευή νέων διαμορφώσεων. Τα κύρια μέρη που αντικαθίστανται είναι οι σωλήνες (εικόνα 3.10.1) και τα πτερύγια. Η κατασκευαστική διαδικασία περιλαμβάνει την παραγωγή και σύνδεση των κύριων εξαρτημάτων με μηχανική κατεργασία , συναρμολόγηση και συγκόλληση προκειμένου να προκύψει μία κατασκευή ενιαία ή αποτελούμενη από αφαιρετά τμήματα. Στην πρώτη κατηγορία δεν παρουσιάζεται πρόβλημα στεγανότητας, αφού δεν υπάρχουν εσωτερικές συνδέσεις και το τελικό αποτέλεσμα είναι ενιαίο, ωστόσο μπορεί να προκύψουν μεγάλες συγκεντρώσεις πίεσης σε ακραίες συνθήκες λειτουργίας. Επίσης, σε περίπτωση αστοχίας θα πρέπει να αντικατασταθεί ολόκληρος ο εναλλάκτης. Στη δεύτερη κατηγορία, τα διαφορετικά εξαρτήματα έχουν τη δυνατότητα να αποσυναρμολογηθούν, ώστε να επισκευαστούν, εφόσον χρειάζεται. Σε αυτή την περίπτωση όμως υπάρχει κίνδυνος διαρροών , λόγω των ενώσεων, οι οποίες αφ' ενός γίνονται μεταξύ κεραμικών υλικών που παρουσιάζουν ευθραυστότητα και αφ' ετέρου γίνονται από μεταλλικό σε κεραμικό υλικό με διαφορετικό συντελεστή

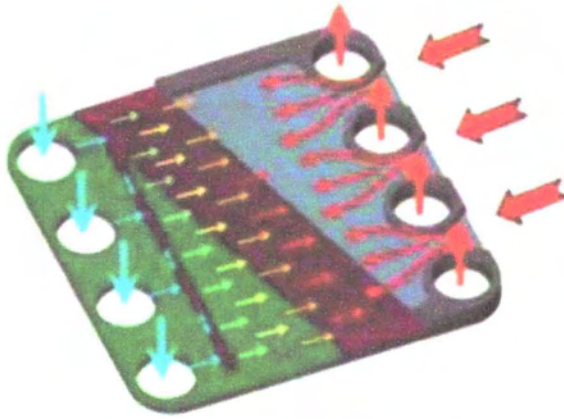
θερμικής διαστολής και παρουσιάζουν μικρή αντοχή. Για το λόγο αυτό έχουν αναπτυχθεί νέες τεχνικές συγκόλλησης με λέιζερ.



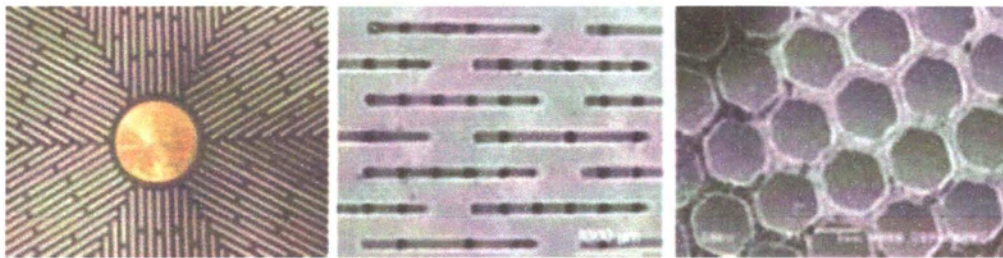
Εικόνα 3.10.1 Κεραμικοί σωλήνες [30]

Πρόσφατα, η εταιρία Ceramates [30] έχει αναπτύξει νέες σχεδιαστικές και κατασκευαστικές μεθόδους για τη δημιουργία συμπαγών εναλλακτών μικροδιαύλων με μικρό κόστος. Σύμφωνα με την επίσημη σελίδα της εταιρίας, η κατασκευαστική διαδικασία στηρίζεται στη δημιουργία πλάκων (εικόνα 3.10.2) με στοιχεία από χυτό υλικό σε μορφή ταινίας επενδυμένα με πλαστικό (εικόνα 3.10.3), οι οποίες λειτουργούν ως βασικό εξάρτημα που επαναλαμβάνεται για τη δημιουργία του συνόλου του εναλλάκτη. Αυτή η μέθοδος παραγωγής είναι όμοια με αυτή που χρησιμοποιείται για την παραγωγή των πυκνωτών. Τα υλικά που χρησιμοποιούνται είναι καρβίδιο του πυριτίου, μολύβδος, αλουμίνα και ζιρκονία. Αυτές οι πλάκες μικροδιαύλων δημιουργούνται με ανάμιξη σκονών επιθυμητών συνθέσεων με συνδετικά, πλαστικοποιητές και διαλύτες προκειμένου να δημιουργηθεί ένα εναιώρημα. Οι χυτές ταινίες έχουν πάχος από 10μm έως 1000μm. Επάνω στις ταινίες δημιουργούνται προεξοχές με διάφορες μεθόδους όπως μηχανική διάτρηση, κοπή με λέιζερ, κοπή με εκτόξευση νερού ή εγχάραξη. Οι ταινίες με τις προεξοχές συνδέονται μεταξύ τους με πλαστικοποίηση, προκειμένου να σχηματίσουν τους μικροδιαύλους και στη συνέχεια συντήκονται. Το συνολικό σώμα του εναλλάκτη κατασκευάζεται αφού συνδεθούν οι πλάκες μεταξύ τους. Κάτι τέτοιο συμβαίνει με πολλές πιθανές μεθόδους οι οποίες μπορεί να είναι η συγκόλληση με διάχυση, η κόλληση με χαλκό, ένωση με γυαλί, κεραμικό τσιμέντο και κεραμικές κόλλες που προέρχονται από πολυμερή. Οι ενώσεις προκειμένου να είναι αξιόπιστες πρέπει να έχουν επαρκείς μηχανικές ιδιότητες για την εκάστοτε εφαρμογή, χαμηλό ποσοστό διαρροών για αποφυγή ανάμιξης των ρευστών, και σωστή κατασκευή με τρόπο που

δεν κοστίζει σε απόδοση. Οι κεραμικοί αυτοί μικροεναλλάκτες μπορούν να φτάσουν 87% απόδοση και πτώση πίεσης της ροής αέρα μικρότερη από 1%.



Εικόνα 3.10.2 Σχηματική απεικόνιση της πλάκας μικροδιαύλων για κεραμικό εναλλάκτη [30]



Εικόνα 3.10.3 Διάφοροι σχεδιασμοί μικροδιαύλων των πλακών της εταιρείας Ceramatec [30]

Βασικά πλεονεκτήματα των κεραμικών εναλλακτών που τους καθιστούν προτιμότερους σε σχέση με τους μεταλλικούς είναι η αντοχή τους στη μεγάλη θερμοκρασία και στη διάβρωση.

Πέρα από τα πλεονεκτήματα που προσφέρουν οι κεραμικοί εναλλάκτες θερμότητας παρουσιάζουν κάποια μειονεκτήματα. Ένα από αυτά είναι η ευθραυστότητα των κεραμικών υλικών, που κάνει δύσκολη την μορφοποίηση τους, κάνει τους εναλλάκτες να μην αντέχουν μεγάλα θερμικά σοκ και αυξάνει το κόστος παραγωγής τους. Ο συντελεστής διάχυσης θερμότητας μπορεί να αλλάξει κατά τις διεργασίες και να δημιουργηθούν ρωγμές. Για το λόγο αυτό γίνεται έρευνα και δίνεται μεγάλη προσοχή στη δημιουργία νέων, σύνθετων κεραμικών υλικών. Ένα άλλο μειονέκτημα είναι ότι οι ενώσεις μεταξύ των εξαρτημάτων του εναλλάκτη δεν μπορούν να γίνουν πολύ γερές και μπορεί να προκληθεί διαρροή.

3.10.3 ΟΡΙΑ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ

Οι κεραμικοί συμπαγείς εναλλάκτες θερμότητας έχουν ως κύριο χαρακτηριστικό τους την αντοχή σε πολύ μεγάλες θερμοκρασίες . Ανάλογα με το υλικό κατασκευής τους έχουν και τα αντίστοιχα όρια θερμοκρασιών . Το καρβίδιο του πυριτίου (SiC) έχει μέγιστη θερμοκρασία τους 1400 °C, το νιτρίδιο του πυριτίου (Si₃N₄) τους 1900 °C, το οξειδίο του αργιλίου (Al₂O₃) τους 1500-1700 °C και το νιτρίδιο του αλουμινίου (AlN) τους 1300 °C.

3.10.4 ΚΥΡΙΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ

Υπάρχουν τρεις κύριες βιομηχανικές εφαρμογές για τους κεραμικούς εναλλάκτες θερμότητας , η διαδικασία μεταφοράς θερμότητας , η διαδικασία παραγωγής ενέργειας και η βιομηχανική ανάκτηση ενέργειας αποβλήτων. Χρησιμοποιούνται για εξάτμιση σε συστήματα κλιματισμού , σε συστήματα ανάκτησης θερμότητας από απόβλητα αέρια ,ως γεννήτριες σε συστήματα σε ψύκτη απορρόφησης LiBr/H₂O και ως κύριοι εναλλάκτες θερμότητας σε κλιβάνους αερίου με καύση , για τη θέρμανση του χώρου. Οι περισσότεροι βιομηχανικοί κλιβανοί μπορούν να προσαρμόσουν έναν εναλλάκτη στην κατασκευή τους. Τέτοια παραδείγματα είναι οι κλιβανοί αναθέρμανσης αιθάλης , οι κλιβανοί σκραπ αλουμινίου αφυγραντήρες και άλλα παρόμοια συστήματα που διαχειρίζονται καυσαέρια σε υψηλή θερμοκρασία που περιέχουν διαβρωτικά υλικά ή σωματίδια.

4.ΘΕΡΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ

Κατά τη θερμική ανάλυση των εναλλακτών θερμότητας κύριος στόχος είναι ο υπολογισμός της επιφάνειας εναλλαγής θερμότητας με δεδομένο ρυθμό, για συγκεκριμένες επιφάνειες και παροχές ρευστών. Για να πραγματοποιηθεί αυτός ο υπολογισμός είναι απαραίτητη η χρήση της παρακάτω σχέσης που είναι θεμελιώδης για τον υπολογισμό του ρυθμού μετάδοσης θερμότητας q .

$$q = U \cdot A \cdot \overline{\Delta T} \quad (4.1)$$

όπου U είναι ο ολικός συντελεστής μετάδοσης θερμότητας και μετρείται στο SI σε $[W/(m^2 \cdot K)]$, A η επιφάνεια που είναι κάθετη στην επιφάνεια της θερμορροής σε $[m^2]$ και $\overline{\Delta T}$ η μέση θερμοκρασιακή διαφορά για όλο τον εναλλάκτη σε $[K]$.

4.1 ΟΛΙΚΟΣ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ

Ο ολικός συντελεστής είναι ανάλογος με το ανάλογο του αθροίσματος των θερμικών αντιστάσεων. Η εξίσωση του συντελεστή μετάδοσης θερμότητας για επίπεδο τοίχωμα είναι:

$$U = \frac{1}{1/h_o + L/k + 1/h_i} \quad (4.2)$$

και για κυλινδρικό τοίχωμα είναι

$$U_o = \frac{1}{r_o/(r_i \cdot h_i) + [r_o \cdot \ln(r_o/r_i)]/k + 1/h_o} \quad (4.3)$$

$$U_i = \frac{1}{1/h_i + [r_i \cdot \ln(r_o/r_i)]/k + r_i/r_o \cdot h_o} \quad (4.4)$$

όπου r είναι η ακτίνα του σωλήνα, L το πάχος του τοιχώματος, k η θερμική αγωγιμότητα του τοιχώματος και h ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας. Οι δείκτες i και o αντιπροσωπεύουν τις εσωτερικές και εξωτερικές επιφάνειες του τοιχώματος, αντίστοιχα. Στην περίπτωση του κυλινδρικού τοιχώματος, η επιφάνεια της συναγωγής δεν είναι η ίδια για τα δύο ρευστά γι' αυτό ο ολικός συντελεστής μετάδοσης θερμότητας και η επιφάνεια μετάδοσης πρέπει να είναι συμβατοί, δηλαδή

$$q = U_o \cdot A_o \cdot \overline{\Delta T} = U_i \cdot A_i \cdot \overline{\Delta T} \quad (4.5)$$

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 κυρίως από το χαμηλότερο συντελεστή συναγωγής. Για την βελτιστοποίηση της

απόδοσης του εναλλάκτη, θα πρέπει να δίνεται μεγάλη προσοχή στην πλευρά του ρευστού με τον χαμηλότερο συντελεστή συναγωγής. Για παράδειγμα αν από τη μία πλευρά λαμβάνει χώρα συμπύκνωση ή βρασμός και από την άλλη θέρμανση ή ψύξη ενός αερίου, η κρίσιμη πλευρά είναι αυτή του αερίου. Στην πλευρά αυτή είναι συνετό να τοποθετηθούν πτερύγια για την εντατικοποίηση της μετάδοσης θερμότητας.

4.2 ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΡΥΠΑΝΣΗΣ

Η απόδοση των εναλλακτών θερμότητας, προϋποθέτει ότι οι επιφάνειες εναλλαγής θερμότητας, είναι καθαρές, χωρίς αποθέσεις και σκουριά. Όταν όμως ένας εναλλάκτης λειτουργεί για μεγάλο χρονικό διάστημα υπάρχουν επιφανειακές αποθέσεις, οπότε η θερμική αντίσταση αυξάνει, με αποτέλεσμα να ελαττώνεται η απόδοση, ενώ αυξάνεται η πτώση πίεσης και η ισχύς άντλησης του ρευστού. Αυτή η επιπρόσθετη αντίσταση, συχνά εκφράζεται με τη μορφή κάποιου συντελεστή ρύπανσης (fouling factor), ο οποίος για την εσωτερική επιφάνεια είναι ο R_{fi} και για την εξωτερική επιφάνεια είναι ο R_{fo} , και πρέπει να συμπεριλαμβάνεται μαζί με τις άλλες θερμικές αντιστάσεις, στον υπολογισμό του ολικού συντελεστή μετάδοσης θερμότητας. Οι συντελεστές ρύπανσης υπολογίζονται πειραματικά, δοκιμάζοντας τον εναλλάκτη κάτω από διάφορες συνθήκες (καθαρές επιφάνειες και επιφάνειες με αποθέσεις) και ορίζονται από την σχέση

$$R_f = \frac{d_f}{k_f} \quad (4.6)$$

Όπου d_f το μέσο πάχος ρύπανσης στον εναλλάκτη θερμότητας και k_f η θερμική αγωγιμότητα του ρυπαντή.

Επηρεάζουν τον ολικό συντελεστή μεταφοράς θερμότητας, ο οποίος πλέον υπολογίζεται με τη σχέση:

$$\frac{1}{U_{f*P}} = \frac{1}{U*P} + \frac{R_{fh}}{P_h} + \frac{R_{fc}}{P_c} \quad (4.7)$$

Όπου

U_f : συνολικός συντελεστής μεταφοράς θερμότητας σε εναλλάκτη με ρύπανση [W/(m² *K)]

P : περίμετρος του εναλλάκτη [m]

P_c : περίμετρος του εναλλάκτη στην πλευρά που διέρχεται το ψυχρό ρευστό [m]

P_h : περίμετρος του εναλλάκτη που στην πλευρά που διέρχεται το θερμό ρευστό [m]

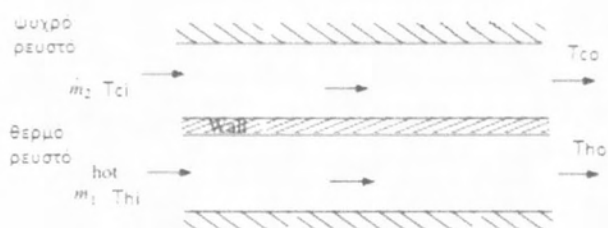
U : συνολικός συντελεστής μεταφοράς θερμότητας σε εναλλάκτη χωρίς ρύπανση [W/(m² *K)]

R_{fc} : συντελεστής αντίστασης στην πλευρά του εναλλάκτη που διέρχεται το ψυχρό ρευστό $[(m^2 \cdot K)/W]$

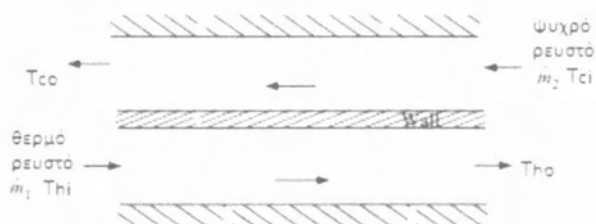
R_{fh} : συντελεστής αντίστασης στην πλευρά του εναλλάκτη που διέρχεται το θερμό ρευστό $[(m^2 \cdot K)/W]$

4.3 ΜΕΘΟΔΟΣ ΜΕΣΗΣ ΛΟΓΑΡΙΘΜΙΚΗΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΚΗΣ ΔΙΑΦΟΡΑΣ (Log Mean Temperature Difference- LMTD)

Θεωρούμε δύο ρευστά που ρέουν παράλληλα. Οι δείκτες h και c χαρακτηρίζουν το θερμό και ψυχρό ρευστό αντίστοιχα και οι δείκτες i και o χαρακτηρίζουν την είσοδο και έξοδο αντίστοιχα. Η παροχή μάζας συμβολίζεται με \dot{m} . Στα σχήματα 4.1 και 4.2 φαίνονται κανάλια παράλληλης παροχής μέσω ενός τοιχώματος με ομοροή και αντιροή αντίστοιχα. Το θερμό ρευστό με θερμοκρασία T_{hi} , εισέρχεται στο χαμηλότερο κανάλι και εξέρχεται με μειωμένη θερμοκρασία T_{ho} , ενώ το ψυχρό ρευστό εισέρχεται στο επάνω κανάλι με θερμοκρασία T_{ci} και εξέρχεται με μεγαλύτερη θερμοκρασία T_{co} .

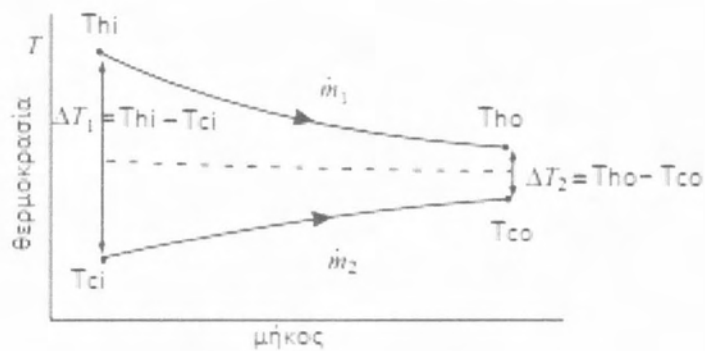


Σχήμα 4.1 Ρευστά σε ομοροή [8]

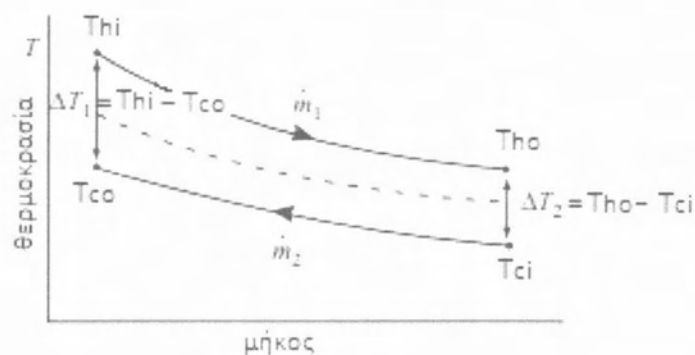


Σχήμα 4.2 Ρευστά σε αντιροή [8]

Η κατανομή της θερμοκρασίας για ομορροή και αντιρροή αντίστοιχα φαίνεται στα παρακάτω διαγράμματα 4.1 και 4.2, όπου η διακεκομμένη γραμμή δείχνει τις θερμοκρασίες του τοιχώματος κατά μήκος του καναλιού. Είναι εμφανές ότι η θερμοκρασία του τοιχώματος στην ομορροή είναι σχεδόν σταθερή σε σχέση με την αντιρροή.



Διάγραμμα 4.1 Κατανομή θερμοκρασίας σε ομορροή [8]



Διάγραμμα 4.2 Κατανομή θερμοκρασίας σε αντιρροή [8]

Ο συνολικός ρυθμός μεταφοράς θερμότητας μεταξύ των δύο ρευστών μπορεί να εκφραστεί λαμβάνοντας υπόψη μια ροή ενθαλπίας, που είναι προϊόν του ρυθμού παροχής μάζας, της ειδικής θερμότητας και της θερμοκρασιακής διαφοράς. Για το θερμό ρεύμα, ο ρυθμός μεταφοράς θερμότητας είναι:

$$q = \dot{m}_h \cdot c_{p_h} \cdot (T_{hi} - T_{ho}), \quad (4.8)$$

όπου \dot{m}_1 είναι ο ρυθμός παροχής μάζας για το θερμό ρευστό και c_{p1} η ειδική θερμότητα για το ψυχρό ρευστό.

Για το ψυχρό ρευστό ο ίδιος ρυθμός μεταφοράς θερμότητας είναι:

$$q = \dot{m}_c \cdot c_{p_c} \cdot (T_{co} - T_{ci}), \quad (4.9)$$

όπου \dot{m}_2 είναι ο ρυθμός παροχής μάζας για το ψυχρό ρευστό και c_{p2} η ειδική θερμότητα για το ψυχρό ρευστό.

Ο ίδιος ρυθμός μεταφοράς θερμότητας μπορεί να εκφραστεί σε όρους του συντελεστή της συνολικής μεταφοράς θερμότητας :

$$q = U \cdot A \cdot F \cdot \overline{\Delta T} \quad (4.10)$$

όπου U είναι ο συντελεστής συνολικής μεταφοράς θερμότητας και A είναι η συνολική επιφάνεια μεταφοράς θερμότητας από την θερμή ή την ψυχρή πλευρά. F είναι ο συντελεστής διόρθωσης σύμφωνα με το είδος της ροής. Για παράδειγμα είναι $F=1$ για αντιρροή και ομορροή σε εναλλάκτες όπως διπλού σωλήνα και $F \leq 1$ για άλλους τύπους ροής.

$$\text{Ισχύει : } U \cdot A = U^*_h \cdot A_h = U_c \cdot A_c \quad (4.11)$$

$\overline{\Delta T}$ είναι η θερμοκρασιακή διαφορά , που ορίζεται ως :

$$\overline{\Delta T} = (\Delta T_1 - \Delta T_2) / \ln (\Delta T_1 / \Delta T_2) = \Delta T_{lm} \quad (4.12)$$

όπου

$$\Delta T_h = T_{hi} - T_{ci} \text{ και } \Delta T_c = T_{ho} - T_{co} \text{ για ομορροή και} \quad (4.13)$$

$$\Delta T_h = T_{hi} - T_{ho} \text{ και } \Delta T_c = T_{ho} - T_{ci} \text{ για αντιρροή} \quad (4.14)$$

όπου ΔT_{lm} είναι η μέση λογαριθμική θερμοκρασιακή διαφορά (log-mean temperature difference, LMTD). Μπορεί να αποδειχτεί εύκολα ότι οι δείκτες 1 και 2 μπορούν να αλλάξουν θέση μεταξύ τους στη σχέση, χωρίς να αλλάξει η τιμή της ΔT_{lm} .

Οι παραπάνω σχέσεις ισχύουν και για άλλους εναλλάκτες μονής διαδρομής όπως για πλακοειδείς εναλλάκτες αντιρροής, καθώς και για εναλλάκτες διπλού σωλήνα ομορροής και αντιρροής . Επίσης, αυτές οι σχέσεις χρησιμοποιούνται για εξατμιστήρες και συμπυκνωτήρες ομορροής και αντιρροής μονής διαδρομής, όπου ένα από τα ρευστά παραμένει σε σταθερή θερμοκρασία. Η αποτελεσματικότητα στην αντιρροή ξεπερνά αυτή στην ομορροή και για το λόγο αυτό προτιμώνται οι εναλλάκτες με αντιρροή. Παρόλα αυτά η σταθερή θερμοκρασία τοιχώματος , που αποτελεί χαρακτηριστικό της ομορροής χρειάζεται σε πολλές εφαρμογές όπως συμβαίνει π.χ. στους θερμικούς εναλλάκτες καυσαερίου προκειμένου να αποφευχθεί η διάβρωση.

Η επιφάνεια εναλλαγής θερμότητας υπολογίζεται από τη σχέση

$$A_h = P_h \cdot L \text{ ή } A_c = P_c \cdot L \quad (4.15)$$

όπου P_h και P_c οι παράμετροι του θερμού και ψυχρού ρεύματος αντίστοιχα.

4.4 ΜΕΘΟΔΟΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ ΤΩΝ ΜΟΝΑΔΩΝ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ (Effectiveness NTU)

Η μέθοδος υπολογισμού της θερμορροής σε έναν εναλλάκτη μέσω του προσδιορισμού της θερμοκρασιακής διαφοράς είναι εύχρηστη μόνο όταν είναι γνωστές οι θερμοκρασίες εισόδου και εξόδου των δύο ροών ή όταν ορισμένες από

αυτές είναι γνωστές και οι υπόλοιπες μπορούν να υπολογισθούν εύκολα. Όταν όμως κάτι από τα παραπάνω δε συμβαίνει, η εφαρμογή της μεθόδου απαιτεί μια χρονοβόρα επανάληψη. Προκειμένου να αποφευχθεί αυτό αναπτύχθηκε μία άλλη μέθοδος, η οποία ονομάστηκε Μέθοδος απόδοσης των μονάδων μεταφοράς. Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιήθηκε αρχικά για την επίλυση προβλημάτων μεταφοράς μάζας και στη συνέχεια εφαρμόστηκε σε υπολογισμούς μετάδοσης θερμότητας.

Ο συντελεστής θερμοχωρητικότητας προσδιορίζεται από το ρυθμό μεταφοράς θερμότητας και την ειδική θερμότητα :

$$C_1 = \dot{m}_1 * c_{p1}. \quad (4.16)$$

Προκειμένου να ορισθεί η αποτελεσματικότητα ενός εναλλάκτη θερμότητας θα πρέπει να βρεθεί η μέγιστη πιθανή μεταφορά θερμότητας που θα μπορούσε υποθετικά να επιτευχθεί σ' έναν εναλλάκτη με αντιρροή και άπειρη επιφάνεια εναλλαγής. Έτσι, ένα από τα ρευστά θα μπορεί να υποστεί τη μέγιστη δυνατή μεταβολή της θερμοκρασίας του, που είναι $(T_{hi} - T_{ci})$ (θερμοκρασιακή διαφορά μεταξύ της θερμοκρασίας εισόδου του θερμού και του ψυχρού ρεύματος). Στη συνέχεια υπολογίζονται οι συντελεστές θερμοχωρητικότητας, δηλαδή ο ρυθμός ροής μάζας πολλαπλασιάζεται με την ειδική θερμότητα: $C = \dot{m} * c_p$. C_h και C_c του θερμού και ψυχρού ρευστού αντίστοιχα και χρησιμοποιείται αυτό με τη μικρότερο συντελεστή (C_{min}).

Ο μέγιστος ρυθμός μεταφοράς θερμότητας που μπορεί να μεταφερθεί μεταξύ των ρευστών στη μονάδα του χρόνου υπολογίζεται από την παρακάτω σχέση:

$$q_{max} = C_{min} * (T_{hi} - T_{ci}) \quad (4.17)$$

όπου $(T_{hi} - T_{ci})$ η μέγιστη θερμοκρασιακή διαφορά

Η αποτελεσματικότητα (ϵ) ορίζεται ως το λόγο της πραγματικής μεταφοράς θερμότητας προς τη μέγιστη δυνατή μεταφορά θερμότητας, είναι αδιάστατη και παίρνει τιμές από 0 έως 1:

$$\epsilon = \frac{\text{πραγματική μεταφορά θερμότητας}}{\text{μέγιστη δυνατή μεταφορά θερμότητας}} = \frac{q}{q_{max}} \quad (4.18)$$

Η πραγματική μεταφορά θερμότητας υπολογίζεται είτε από την ενέργεια που χάνεται από το θερμό ρευστό, είτε από την ενέργεια που ανακτάται από το ψυχρό ρευστό. Το πραγματικό ποσό θερμότητας q που μεταφέρεται είναι:

$$q = C_h * (T_{hi} - T_{ho}) = C_c * (T_{co} - T_{ci}) \quad (4.19)$$

Επομένως, σε εναλλάκτες που δεν είναι γνωστές οι θερμοκρασίες εξόδου και είναι όμως οι θερμοκρασίες εισόδου και η αποτελεσματικότητα μπορεί να γίνει υπολογισμός της μετάδοσης θερμότητας από τον τύπο:

$$q = \epsilon * C_{min} * (T_{hi} - T_{ci}) \quad (4.20)$$

Ο λόγος θερμοχωρητικότητας ορίζεται ως:

$$C = \frac{C_{min}}{C_{max}} \quad (4.21)$$

Ο αριθμός απόδοσης των μονάδων μεταφοράς (NTU) είναι:

$$NTU = \frac{U \cdot A}{C_{min}} \quad (4.22)$$

όπου U είναι ο ολικός συντελεστής μεταφοράς θερμότητας και A η επιφάνεια εναλλαγής.

Συμπερασματικά, η μέθοδος υπολογισμού με βάση τη μέση λογαριθμική διαφορά είναι κατάλληλη, όταν οι θερμοκρασίες εισόδου και εξόδου των ρευστών είναι γνωστές και ζητούνται το είδος του εναλλάκτη και η απαιτούμενη επιφάνεια εναλλαγής. Η μέθοδος NTU προσφέρεται όταν ο τύπος και το μέγεθος του εναλλάκτη είναι δεδομένα και στόχος είναι ο υπολογισμός της θερμορροής και των θερμοκρασιών εξόδου.

Παρακάτω δίνονται κάποιοι πίνακες, σύμφωνα με τον HoSung Lee, με τις σχέσεις υπολογισμού της απόδοσης των εναλλακτών και τις σχέσεις μεθόδου NTU για τους εναλλάκτες θερμότητας για ένα εύρος διατάξεων ροής.

Διάταξη ροής	Αποτελεσματικότητα
Ομορροή	$\varepsilon = \frac{1 - \exp[-NTU(1 + C_r)]}{1 + C_r}$ (4.23)
Αντιρροή	$\varepsilon = \frac{1 - \exp[-NTU(1 - C_r)]}{1 - C_r \exp[-NTU(1 - C_r)]}$ (4.24)
<u>Σταυρωτή ροή</u>	
Στρωτή ροή και των δύο ρευστών	$\varepsilon = 1 - \exp \left\{ \left(\frac{1}{C_r} \right) NTU^{0.22} [\exp(-C_r \cdot NTU^{0.78}) - 1] \right\}$ (4.25)
C_{max} μικτή ροή, C_{min} στρωτή ροή	$\varepsilon = \frac{1}{C_r} (1 - \exp[-C_r (1 - \exp(-NTU))])$ (4.26)
C_{min} μικτή ροή, C_{max} στρωτή ροή	$\varepsilon = 1 - \exp \left\{ -\frac{1}{C_r} [1 - \exp(-C_r \cdot NTU)] \right\}$ (4.27)
Εναλλάκτες με $C_r = 0$	$\varepsilon = 1 - \exp(-NTU)$ (4.28)

Πίνακας 4.1 Σχέσεις υπολογισμού της απόδοσης των εναλλακτών θερμότητας [8]

Διαταξη ροής	NTU	
Ομοροροή	$NTU = -\frac{1}{1+C_r} \ln[1 - \epsilon(1 + C_r)]$	(4.29)
Αντιροροή	$NTU = \frac{1}{1-C_r} \ln\left(\frac{1-\epsilon C_r}{1-\epsilon}\right)$	(4.30)
<u>Σταυρωτή ροή</u>		
C_{max} μικτή ροή, C_{min} στρωτή ροή	$NTU = -\ln\left[1 + \frac{1}{C_r} \ln(1 - \epsilon C_r)\right]$	(4.31)
C_{min} μικτή ροή, C_{max} στρωτή ροή	$NTU = -\frac{1}{C_r} \ln[1 + C_r \cdot \ln(1 - \epsilon)]$	(4.32)
Εναλλάκτες με $C_r = 0$	$NTU = -\ln(1 - \epsilon)$	(4.33)

Πίνακας 4.2 Σχέσεις της μεθόδου NTU για τους εναλλάκτες θερμότητας [8]

4.5 ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΡΟΗΣ

Στα κανάλια ροής οι μη κυκλικές διάμετροι υπολογίζονται προσεγγιστικά με την υδραυλική διάμετρο για τον αριθμό Reynolds και με την ισοδύναμη διάμετρο για τον αριθμό Nusselt.

Η υδραυλική διάμετρος υπολογίζεται από την παρακάτω σχέση

$$D_h = \frac{4 \cdot A_c}{P_{wetted}} = \frac{4 \cdot A_c \cdot L}{P_{wetted} \cdot L} = \frac{4 \cdot A_c \cdot L}{A_t} \quad (4.34)$$

όπου P_{wetted} είναι η περίμετρος απ' όπου διέρχεται το ρευστό, A_t η συνολική επιφάνεια θερμοροής και L μήκος του καναλιού.

Ο αριθμός Reynolds εκφράζεται από τη σχέση

$$Re_D = \frac{\rho \cdot u_m \cdot D_h}{\mu} = \frac{\dot{m} \cdot D_h}{A_c \cdot \mu} = \frac{G \cdot D_h}{\mu} \quad (4.35)$$

Όπου D_h είναι η υδραυλική διάμετρος, μ το απόλυτο ιξώδες, ρ η πυκνότητα ρευστού, u_m η μέση ταχύτητα του ρευστού, \dot{m} ο ρυθμός μεταφοράς μάζας και G η ταχύτητα μάζας. Όταν $Re_D > 4000$ η ροή είναι τυρβώδης, όταν $Re < 2300$ η ροή είναι στρωτή και όταν $2300 < Re_D < 4000$, η ροή είναι μεταβατική τυρβώδης.

Η ισοδύναμη διάμετρος υπολογίζεται από τη σχέση

$$D_e = \frac{4 \cdot A_c}{P_{heated}} \quad (4.36)$$

όπου P_{heated} είναι η περίμετρος που θερμαίνεται.

Ο αριθμός Nusselt είναι μια σταθερά και εξαρτάται από την θερμική κατάσταση της επιφάνειας για πλήρως αναπτυγμένη στρωτή ροή σε σωλήνες εκφράζεται από τη σχέση

$$Nu = \frac{h \cdot D_h}{k_f} \quad (4.37)$$

όπου D_h η υδραυλική διάμετρος, k_f ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας του ρευστού και h ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας με συναγωγή.

Για την τυρβώδη ροή σε σωλήνες υπάρχουν δύο κύριοι μέθοδοι υπολογισμού:

Σε περιπτώσεις που η επιφάνεια δεν είναι λεία, αλλά και για μεγάλο εύρος τιμών του αριθμού Reynolds, ακόμα και για μερικώς τυρβώδη ροή, χρησιμοποιείται η σχέση κατά Gnielinski:

$$Nu_D = \frac{(f/2)(Re_D - 1000) \cdot Pr}{1 + 12.7 \cdot (f/2)^{1/2} \cdot (Pr^{2/3} - 1)} \quad (4.38)$$

όπου το f υπολογίζεται από τον τύπο

$$f = (1.58 \cdot \ln(Re_D) - 3.28)^{-2} \quad (4.39)$$

Η σχέση κατά Gnielinski έχει εφαρμογή όταν

$$0,5 \leq Pr \leq 2000$$

$$3000 \leq Re_D \leq 5 \times 10^6$$

Σε περιπτώσεις που η επιφάνεια είναι λεία και η ροή τυρβώδης χρησιμοποιείται η εξίσωση Dittus-Boelter. Είναι εύκολη στη χρήση, όμως δεν είναι τόσο ακριβής όταν στο ρευστό παρουσιάζονται μεγάλες διαφορές θερμοκρασίας.

$$Nu_D = 0.023 \cdot (Re_D)^{4/5} \cdot Pr^n \quad (4.40)$$

όπου D είναι η εσωτερική διάμετρος του σωλήνα και Pr ο αριθμός Prandtl. Είναι $n=0,4$ για θέρμανση ρευστού και $n=0,3$ για ψύξη ρευστού.

Η εξίσωση αυτή ισχύει όταν

$$0,6 \leq Pr \leq 160$$

$$Re_D \geq 10000$$

$$L/D \geq 10$$

Τέλος, υπάρχει η σχέση Sieder-Tate για στρωτή ροή, η οποία δίνει πιο ακριβή αποτελέσματα, καθώς λαμβάνει υπόψη τη μεταβολή στο ιξώδες, λόγω της διαφοράς της θερμοκρασίας μεταξύ του ρευστού και της επιφάνειας μεταφοράς θερμότητας. Η μέθοδος αυτή είναι επαναληπτική, αφού αλλάζει το ιξώδες όσο αλλάζει ο αριθμός Nusselt.

$$Nu_D = 1.86 * \left(\frac{D_h * Re_D * Pr}{L} \right)^{1/3} * \left(\frac{\mu}{\mu_s} \right)^{0.14} \quad (4.41)$$

όπου μ το ιξώδες του ρευστού στη μέση θερμοκρασία του και μ_s το ιξώδες του ρευστού στη θερμοκρασία της οριακής επιφάνειας μεταφοράς θερμότητας.

Η εξίσωση αυτή ισχύει όταν

$$0,48 \leq Pr \leq 16700$$

$$0.0044 < (\mu/\mu_s) < 9.75$$

4.6 ΠΤΩΣΗ ΠΙΕΣΗΣ ΕΝΑΛΛΑΚΤΗ

Το κύριο στοιχείο για το σχεδιασμό των συμπαγών εναλλακτών θερμότητας βασίζεται στην γενική ιδέα ότι η πτώση πίεσης πρέπει να αξιοποιηθεί πλήρως, έτσι ο υπολογισμός της είναι πολύ σημαντικός. Ένας κύριος λόγος είναι ότι το ρευστό πρέπει να αντληθεί μέσω του εναλλάκτη που σημαίνει ότι απαιτείται η αντίστοιχη ισχύς για να γίνει αυτό. Αυτή η ισχύς είναι ανάλογη της πτώσης πίεσης.

Επίσης είναι απαραίτητη η παραγωγή ενός θερμοδραυλικού μοντέλου που συσχετίζει την πτώση πίεσης ενός ρεύματος μιας διαδικασίας με το συντελεστή μεταφοράς θερμότητας στη συγκεκριμένη πλευρά του εναλλάκτη. Αυτή η σχέση περιλαμβάνει τις φυσικές ιδιότητες του ρεύματος και τη γεωμετρία του εναλλάκτη.

Η συνολική πτώση πίεσης στην οποία υπόκειται κάθε ρεύμα ρευστού που διέρχεται από τον εναλλάκτη είναι αποτέλεσμα τεσσάρων βασικών όρων: α) πτώση πίεσης λόγω εισόδου, β) η πτώση πίεσης λόγω τριβής στο κύριο σώμα του εναλλάκτη, γ) η πτώση πίεσης λόγω της επιτάχυνσης (μεταβολή πυκνότητας), δ) η πτώση πίεσης λόγω εξόδου. Οι απώλειες λόγω επιτάχυνσης που οφείλονται στη μεταβολή της ταχύτητας είναι μικρές στην περίπτωση υγρών και στην περίπτωση μικρού μήκους ροής σε εφαρμογές με αέρια, και σε σχέση με τις απώλειες εισόδου και εξόδου αποτελούν το 10% της συνολικής πτώσης πίεσης. Από όλους τους συντελεστές της πτώσης πίεσης, αυτός που οφείλεται στην τριβή σχετίζεται με τη χωρητικότητα του ρευστού σε μεταφορά θερμότητας. Όταν αυτή η σχέση εκφραστεί σε θερμοδραυλικό μοντέλο, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να εξαχθεί μια μεθοδολογία για τον κατάλληλο σχεδιασμό μεγέθους του πυρήνα του εναλλάκτη.

Οι τυπικές τιμές πτώσης πίεσης είναι 70kPa για διεργασίες με νερό σε τυπικούς εναλλάκτες αυλών-κελύφους, ενώ είναι 250Pa σε διεργασίες με αέρα για συμπαγείς εναλλάκτες.

Η ισχύς άντλησης του ρευστού δίνεται από τον τύπο:

$$\dot{W} = \frac{\dot{m}}{\rho} * \Delta P \quad (4.42)$$

Εντάσσοντας την απόδοση της αντλίας προκύπτει η συνολική ισχύς άντλησης:

$$\dot{W} = \frac{\dot{m}}{n_p \cdot \rho} * DP \quad (4.43)$$

Στο κύριο σώμα ενός εναλλάκτη πλακών πλαισίου, σύμφωνα με τον Martin Picon Nuñez, στο βιβλίο του Spencer T. Branson [14], η πτώση πίεσης είναι:

$$\Delta P = \frac{2 \cdot N_p \cdot f \cdot L \cdot G^2}{\rho \cdot d_h} \quad (4.44)$$

Όπου f είναι ο συντελεστής τριβής, L είναι το μήκος του εναλλάκτη, N_p είναι ο αριθμός περασμάτων, ρ η πυκνότητα, d_h η υδραυλική διάμετρος και το G είναι συνάρτηση του ρυθμού ροής μάζας (m), του διαστήματος μεταξύ των πλακών (δ), του αριθμού καναλιών ανά ρεύμα (N_c) και από το εύρος των πλακών (W) και δίνεται από τη σχέση:

$$G = \frac{m}{N_c \cdot \delta \cdot W} \quad (4.47)$$

Ενώ για σπειροειδή εναλλάκτη :

$$\Delta P = \frac{2 \cdot f \cdot L \cdot m^2}{\rho \cdot d_h \cdot A_c^2} \quad (4.48)$$

Όπου f είναι ο συντελεστής τριβής, L είναι το μήκος του εναλλάκτη, m είναι ο ρυθμός ροής μάζας και ρ η πυκνότητα.

Σύμφωνα με στοιχεία από το βιβλίο των Sadik Kakaç και Hongtan Liu [9] οι σχέσεις πτώσεις πίεσης (που προέρχονται από το βιβλίο των Kays και London) στους εναλλάκτες πτερυγιοφόρων σωλήνων είναι:

$$\Delta P = \frac{G^2}{2 \cdot \rho_i} \left[f \cdot \frac{A_t}{A_{min}} \cdot \frac{\rho_i}{\rho} + (1 + \sigma^2) \cdot \left(\frac{\rho_i}{\rho_o} - 1 \right) \right] \quad (4.50)$$

Ενώ από την ίδια πηγή οι σχέσεις πτώσης πίεσης στους εναλλάκτες πτερυγιοφόρων πλακών είναι:

$$\Delta P = \frac{G^2}{2 \cdot \rho_i} \cdot \left[(k_c + 1 - \sigma^2) + 2 \cdot \left(\frac{\rho_i}{\rho_o} - 1 \right) + f \cdot \frac{A}{A_{min}} \cdot \frac{\rho_i}{\rho} - (1 - k_c - \sigma^2) \cdot \frac{\rho_i}{\rho_o} \right] \quad (4.51)$$

Το πρώτο στοιχείο που βρίσκεται μέσα σε παρενθέσεις στην εξίσωση αντιπροσωπεύει την πτώση πίεσης λόγω εισόδου, το δεύτερο την πτώση πίεσης λόγω επιτάχυνσης, το τρίτο την πτώση πίεσης λόγω τριβής στο κύριο σώμα του εναλλάκτη και το τελευταίο την πτώση πίεσης λόγω εξόδου.

Σύμφωνα με τον HoSung Lee [8] σε έναν εναλλάκτη αυλών – κελύφους η πτώση πίεσης στην πλευρά των σωλήνων είναι:

$$\Delta P = 4 * \left(\frac{f * L_t}{d_i} + 1 \right) * N_p * \frac{1}{2} * \rho * v^2 \quad (4.52)$$

όπου για στρωτή και τυρβώδη ροή το f είναι αντίστοιχα :

$$f = 16/Re_D$$

$$f = (1.58 * \ln(Re_D) - 3.28)^{-2} \quad (4.39)$$

Ενώ στην πλευρά του κελύφους

$$\Delta P = f * \frac{D_s}{D_e} (N_b + 1) * \frac{1}{2} * \rho * v^2 \quad (4.54)$$

Όπου

$$f = \exp(0.576 - 0.19 * \ln(Re_s)) \quad (4.55)$$

5.ΓΕΝΙΚΑ ΚΡΙΤΗΡΙΑ ΕΠΙΛΟΓΗΣ ΕΝΑΛΛΑΚΤΗ

Κατά την επιλογή ενός εναλλάκτη σε μία εφαρμογή υπάρχουν θεωρητικά πολλές εναλλακτικές λύσεις , ωστόσο μόνο μια από αυτές είναι η ιδανικότερη για τις εκάστοτε απαιτήσεις. Προκειμένου να γίνει επιλογή ενός εναλλάκτη πρέπει να ληφθούν υπόψη οι παρακάτω παράγοντες.

Υλικά κατασκευής. Προκειμένου οι εναλλάκτες να μπορούν να χρησιμοποιηθούν για μεγάλο χρονικό διάστημα και να προσφέρουν αξιοπιστία , πρέπει να είναι κατασκευασμένοι από υλικά που έχουν το κατάλληλο ποσοστό διάβρωσης για τις συγκεκριμένες συνθήκες λειτουργίας. Αυτό πρέπει να ληφθεί σοβαρά υπόψη όταν χρησιμοποιείται αλουμίνιο ή ελαστομερή στεγανοποιητικά. Το πάχος των τοιχωμάτων των συμπαγών εναλλακτών θερμότητας είναι μικρότερο από αυτό των συμβατικών εναλλακτών, γεγονός που κάνει την αξιολόγηση των ορίων διάβρωσης να χρήζει ιδιαίτερης προσοχής.

Επίσης το υλικό κατασκευής πρέπει να έχει την απαιτούμενη αντοχή τόσο σε μηχανικές, όσο και σε θερμικές τάσεις που μπορεί να δεχθεί ο εναλλάκτης κατά τη διάρκεια της διεργασίας.

Συνθήκες λειτουργίας. Ο εναλλάκτης θερμότητας θα πρέπει να πληροί τις προϋποθέσεις της διεργασίας.

Η πίεση σχεδιασμού είναι καθοριστική για τον προσδιορισμό του πάχους των επιμέρους στοιχείων που δέχονται αυτή την πίεση. Όσο υψηλότερη είναι η πίεση, τόσο μεγαλύτερο πρέπει είναι το πάχος των στοιχείων που συγκρατούν το ρευστό. Σε χαμηλές πιέσεις, ο ρυθμός ογκομετρικής παροχής είναι μεγάλος και οι επιτρεπόμενες τιμές πτώσης πίεσης είναι μικρές , επομένως απαιτείται μεγάλη έκταση ροής, κάτι που επιτυγχάνεται, για παράδειγμα, με τη σταυρωτή ροή. Αντίθετα, σε υψηλές πιέσεις ο ρυθμός ογκομετρικής παροχής είναι μικρότερος και τα επιτρεπόμενα όρια πτώσης πίεσης μεγαλύτερα, γεγονός που επιτρέπει τη χρήση πιο συμπαγών κατασκευών.

Η θερμοκρασία σχεδιασμού είναι σημαντική καθώς δείχνει εάν κάποιο υλικό στην κατασκευή μπορεί να αντέξει τα μηχανικά φορτία και τα φορτία πίεσης που δέχεται. Σε χαμηλές θερμοκρασίες και κρυογονικές εφαρμογές, η ανθεκτικότητα αποτελεί προϋπόθεση. Σε εφαρμογές με υψηλές θερμοκρασίες , τα υλικά πρέπει να έχουν καλή αντίσταση στον ερπυσμό.

Οι συνεχόμενες εναλλαγές πίεσης και θερμοκρασίας μπορούν να επιφέρουν αστοχίες που σχετίζονται με τη μεγάλη ένταση σε κάποιους εναλλάκτες. Επίσης , πρέπει να ληφθούν υπόψη δονήσεις που λαμβάνουν χώρα , κυρίως σε κάποιους εναλλάκτες δύο φάσεων.

Μέγεθος και βάρος. Σε πολλές εφαρμογές ο όγκος που καταλαμβάνει ένας εναλλάκτης είναι βασικό κριτήριο επιλογής , σε άλλες είναι το βάρος , ενώ σε κάποιες άλλες και τα δύο. Χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι η αεροδιαστημική βιομηχανία

όπου το φορτίο πρέπει να είναι όσο το δυνατόν μικρότερο, τόσο για τεχνικούς όσο και για οικονομικούς λόγους.

Τύποι και φάσεις ρευστών. Οι φάσεις των ρευστών σε έναν εναλλάκτη αποτελεί επίσης σημαντικό παράγοντα στην επιλογή του κατάλληλου εναλλάκτη θερμότητας. Τα υγρά είναι τα πιο εύκολα διαχειρίσιμα μέσα. Η μεγάλη πυκνότητα και οι καλές ιδιότητες μεταφοράς θερμότητας, επιτρέπουν μεγάλους συντελεστές μεταφοράς με σχετικά χαμηλές πτώσεις πίεσης.

Ρύπανση. Η ρύπανση ορίζεται ως ο σχηματισμός ανεπιθύμητων επικαθίσεων σε επιφάνειες εναλλάκτη θερμότητας που παρεμποδίζουν την μεταφορά θερμότητας και έχουν ως αποτέλεσμα την αύξηση της αντίστασης στη ροή του ρευστού, με αποτέλεσμα την υψηλότερη πτώση πίεσης. Ο σχηματισμός αυτών των επικαθίσεων μειώνει σταδιακά την απόδοση του εναλλάκτη και αυξάνει την κατανάλωση ενέργειας στις βιομηχανικές διεργασίες. Ειδικά οι συμπαγείς εναλλάκτες θερμότητας έχουν εφαρμογή κυρίως σε διεργασίες που εξασφαλίζουν μικρό ποσοστό ρύπανσης. Τέτοιες διεργασίες είναι συνήθως τα συστήματα κλειστού βρόγχου, όπως αυτά που χρησιμοποιούνται στην κατάψυξη. Σε περιπτώσεις ανοιχτού βρόγχου, η ρύπανση είναι πολύ πιθανή και για την πρόληψη της χρησιμοποιούνται ειδικά φίλτρα, προκειμένου να απομακρυνθούν σωματίδια, ίνες κλπ., ή χημική επεξεργασία, για την αποφυγή ανάπτυξης μικροοργανισμών, επικαθίσεων και διάβρωσης. Σε κάθε περίπτωση τα ρεύματα πρέπει να ελέγχονται τακτικά. Οι σπειροειδείς εναλλάκτες είναι εκείνοι που μπορούν να διαχειριστούν ρευστά με τάση για ρύπανση πιο καλά από τα υπόλοιπα είδη συμπαγών εναλλακτών, ωστόσο αναπτύσσονται και νέες τεχνολογίες.

Συντήρηση. Κατά την επιλογή εναλλάκτη πρέπει να εξετασθεί προσεκτικά το θέμα της συντήρησης, της επιθεώρησης, του καθαρισμού, της επισκευής και μιας ενδεχόμενης επέκτασης. Τα χαρακτηριστικά των ρευμάτων που λαμβάνουν χώρα στη διεργασία πρέπει να μελετηθούν ώστε να εκτιμηθούν σωστά οι απαιτήσεις για καθαρισμό της μονάδας, μηχανικό ή χημικό, καθώς και η αντικατάσταση των επιμέρους εξαρτημάτων κατά περιόδους. Σε περιπτώσεις που οι συνθήκες λειτουργίας είναι πιθανό να αλλάξουν, είναι απαραίτητη η δυνατότητα εύκολης τροποποίησης της μονάδας. Για παράδειγμα, στις βιομηχανίες φαρμάκων, τροφίμων και γαλακτοκομικών απαιτείται γρήγορη πρόσβαση στα εσωτερικά στοιχεία του εναλλάκτη για συχνό καθαρισμό.

Κόστος. Προφανώς, στην περίπτωση που περισσότερα από ένα είδη εναλλακτών πληρούν όλους τους παραπάνω φυσικούς παράγοντες, αυτό που θα καθορίσει την επιλογή του εναλλάκτη είναι το κόστος. Υπάρχουν δύο κύρια κόστη που πρέπει να ληφθούν υπόψη. Το ένα είναι το κόστος κατασκευής, ενώ το άλλο είναι το κόστος λειτουργίας, στο οποίο συμπεριλαμβάνεται το κόστος συντήρησης. Το κόστος λειτουργίας προέρχεται από τις συσκευές άντλησης των ρευστών, όπως ανεμιστήρες, φυσητήρες και αντλίες. Το κόστος συντήρησης περιλαμβάνει το κόστος για τα διάφορα ανταλλακτικά, που χρειάζονται λόγω διάβρωσης καθώς και το κόστος

των μέσων που χρησιμοποιούνται για την πρόληψη και τον έλεγχο ρύπανσης ή διάβρωσης.

Στον παρακάτω πίνακα 5.1 δίνονται συγκεντρωτικά πληροφορίες για κάποιες ιδιότητες των συμπαγών εναλλακτών. Οι τιμές είναι προσεγγιστικές.

ΤΥΠΟΣ ΕΝΑΛΛΑΚΤΗ	ΕΥΡΟΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΩΝ	ΕΥΡΟΣ ΠΙΕΣΕΩΝ	ΤΡΟΠΟΣ ΚΑΘΑΡΙΣΜΟΥ	ΑΝΤΟΧΗ ΣΤΗ ΔΙΑΒΡΩΣΗ
Εναλλάκτες πλακών με ελαστομερή στεγανοποιητικά	-35°C έως 200 °C	40 bar	Μηχανικός	Καλή
Συγκολλητοί εναλλάκτες πλακών	-100 °C έως 538 °C	82,7 bar	Μηχανικός ή Χημικός	Εξαιρετική
Κολλητοί εναλλάκτες πλακών	-195 °C έως 400 °C	30 bar	Χημικός	Καλή
Συμπαγείς εναλλάκτες αυλών-κελύφους	Έως 130 °C	16 bar	Μηχανικός ή Χημικός	Καλή
Εναλλάκτες πλακών-κελύφους	-164 °C έως 900 °C	150 bar	Μηχανικός ή Χημικός	Καλή
Εναλλάκτες δέσμης πτερυγιοφόρων πλακών	Έως 800 °C	120 bar	Χημικός	Καλή
Εναλλάκτες δέσμης πτερυγιοφόρων σωλήνων	Έως 400 °C	140 bar	Μηχανικός ή Χημικός	Καλή
Σπειροειδείς εναλλάκτες	Έως 850 °C	30 bar	Μηχανικός	Καλή
Εναλλάκτες δέσμης τυπωμένων κυκλωμάτων	-200 °C έως 1160°C	500 έως 1000 bar	Χημικός	Εξαιρετική
Εναλλάκτες Marbond™	-200 °C έως 900 °C	400 bar	Χημικός	Εξαιρετική
Εναλλάκτες από πολυμερή	Έως 350 °C	60 bar	Με νερό	Εξαιρετική
Κεραμικοί εναλλάκτες	Έως 1900 °C	25 bar	Μηχανικός ή Χημικός	Εξαιρετική

Πίνακας 5.1 Συγκεντρωτικός πίνακας ιδιοτήτων των συμπαγών εναλλακτών

6.ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Οι συμπαγείς εναλλάκτες θερμότητας διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στην προσπάθεια για εξοικονόμηση ενέργειας άλλα και για αξιοποίησή της στο έπακρο, επιτυγχάνοντας υψηλές αποδόσεις. Δεν είναι αποτελούν νέα τεχνολογική εξέλιξη, ωστόσο συνεχώς παράγονται νέα προϊόντα προκειμένου να καλυφθούν οι ανάγκες της αγοράς. Επιπλέον, η ανάπτυξη της τεχνολογίας συμβάλει συνεχώς στην ανάπτυξη τους, κάτι που θα αυξήσει στο μέλλον το εύρος των εφαρμογών τους.

Ένα σημαντικό πλεονέκτημα των συμπαγών εναλλακτών θερμότητας είναι η ικανότητά τους να παρέχουν μεγαλύτερη αποτελεσματικότητα στη μεταφορά θερμότητας. Η αποτελεσματικότητα μπορεί να εκφραστεί με απλό τρόπο ως ο λόγος της πραγματικής μεταφοράς θερμότητας προς την μέγιστη πιθανή μεταφορά θερμότητας. Εξαρτάται από τη θερμοχωρητικότητα των ρευστών, τον ολικό συντελεστή μεταφοράς θερμότητας και της επιφάνειας εναλλαγής. Σημαντικό αντίκτυπο της μεγάλης αποτελεσματικότητας είναι η μεγάλη εξοικονόμηση ενέργειας κυρίως σε διαδικασίες θέρμανσης και ψύξης.

Οι συμπαγείς εναλλάκτες θερμότητας έχουν μεγάλους συντελεστές μεταφοράς θερμότητας, λόγω των μικρών υδραυλικών διαμέτρων των διόδων ροής των μέσων. Επίσης, βασικό χαρακτηριστικό τους είναι η μεγάλη επιφάνεια εναλλαγής θερμότητας σε σχέση με τον όγκο που καταλαμβάνουν. Σε σχέση με τους εναλλάκτες αυλών κελύφους, οι συμπαγείς εναλλάκτες θερμότητας έχουν πολύ μεγαλύτερη πυκνότητα επιφάνειας. Επιπλέον, δεν παρουσιάζουν μεγάλη πτώση πίεσης.

Θετικό χαρακτηριστικό των συμπαγών εναλλακτών θερμότητας είναι το μικρό μέγεθος τους αλλά και το μικρό βάρος τους. Υπάρχουν περιπτώσεις όπου δεν υπάρχει μεγάλος χώρος ή σωστή στήριξη σε πολλές βιομηχανικές διεργασίες. Επίσης, σε εφαρμογές της αεροδιαστημικής το βάρος είναι σημαντικός παράγοντας και οι συμπαγείς εναλλάκτες θεωρούνται ιδανικοί. Στο θέμα της συντήρησης, επίσης, οι απαιτήσεις της αποσυναρμολόγησης τους είναι μικρότερες σε χώρο και εργασία, όπως και στην αρχική εγκατάστασή τους, λόγω του μικρότερου μεγέθους τους σε σχέση με τους αντίστοιχους εναλλάκτες αυλών κελύφους.

Κάποια είδη συμπαγών εναλλακτών, και κυρίως οι εναλλάκτες πτερυγιοφόρων πλακών και τυπωμένων κυκλωμάτων προσφέρουν τη δυνατότητα πολλαπλών ρευμάτων, χωρίς να μειώνεται η απόδοσή τους. Επίσης, σε γενικές γραμμές παρέχουν καλύτερο έλεγχο θερμοκρασίας γεγονός που τους καθιστά κατάλληλους σε εφαρμογές με μέσα που είναι ευαίσθητα στις μεταβολές της θερμοκρασίας.

Στους συμπαγείς εναλλάκτες παρουσιάζεται μικρότερη στασιμότητα υγρών σε σχέση με τους συμβατικούς εναλλάκτες. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα μεγαλύτερη ασφάλεια σε περιπτώσεις που τα ρευστά της διαδικασίας είναι επικίνδυνα, αφού δεν υπάρχουν μεγάλες συγκεντρώσεις. Επίσης, λόγω αυτού του χαρακτηριστικού τους, μπορούν να προσαρμόζονται πιο γρήγορα σε πιθανές αλλαγές των συνθηκών πίεσης και θερμοκρασίας.

Η ανάπτυξη της τεχνολογίας έχει συμβάλει στη δημιουργία νέων συμπαγών εναλλακτών που συνδυάζουν και τη λειτουργία του αντιδραστήρα, όπως ο εναλλάκτης Marbond™. Σε αυτούς τους εναλλάκτες μπορεί να γίνει ανάμιξη, χημική αντίδραση καθώς και εναλλαγή θερμότητας σε μία μονάδα. Με τη χρήση αυτής της τεχνολογίας αυξάνεται τόσο η απόδοση της αντίδρασης όσο και η ανάκτηση θερμότητας και περιορίζεται ο σχηματισμός παραπροϊόντων.

Παρά το γεγονός ότι οι συμπαγείς εναλλάκτες θερμότητας μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε πολλές διεργασίες, η έλλειψη ενημέρωσης των μηχανικών στον τομέα αυτό περιορίζει τη χρήση τους. Σε περιπτώσεις, δηλαδή, που είναι απαραίτητη η χρήση εναλλάκτη, οι βιομηχανίες τείνουν να χρησιμοποιούν τα είδη εναλλακτών που έχουν καθιερωθεί εδώ και πολλά χρόνια και είναι περισσότερο διαδεδομένα. Συνήθως, κάτι τέτοιο σημαίνει την επιλογή του εναλλάκτη αυλών- κελύφους. Η αντίστοιχη επιλογή ενός συμπαγή εναλλάκτη θα μπορούσε να παρέχει μεγαλύτερους συντελεστές μεταφοράς θερμότητας, μεγαλύτερη απόδοση και συνεπώς μικρότερο κόστος.

Μια άλλη ανησυχία σχετικά με τους συμπαγείς εναλλάκτες θερμότητας είναι η ρύπανση. Είναι φυσικό, λόγω των μικρών υδραυλικών διαμέτρων, να υπάρχει η πεποίθηση ότι δεν είναι κατάλληλοι για εφαρμογές με μεγάλη τάση για σχηματισμό επικαθίσεων. Ωστόσο, με τη σωστή πρόληψη αλλά και τη σωστή συντήρηση, κάτι τέτοιο μπορεί να αποφευχθεί. Κάποια συγκεκριμένα είδη συμπαγών εναλλακτών αποτελούνται από αφαιρετά εξαρτήματα και έτσι μπορούν εύκολα να καθαριστούν μηχανικά. Επιπλέον, υπάρχει και η επιλογή του χημικού καθαρισμού σε περιπτώσεις που δεν μπορεί να αποσυναρμολογηθεί εύκολα η μονάδα. Η χρήση κατάλληλων φίλτρων θα μπορούσε να αποτρέψει με μεγάλη αποτελεσματικότητα τη ρύπανση. Σε κάθε περίπτωση, βέβαια, είναι απαραίτητη η επιλογή του σωστού είδους εναλλάκτη ανάλογα με το είδος των ρευστών ώστε να μπορεί να ανταποκριθεί με μεγαλύτερη επιτυχία στην εκάστοτε διαδικασία.

Είναι λοιπόν προφανές ότι είναι πολύ σημαντικό να γίνεται σωστή αξιοποίηση των νέων τεχνολογιών που παρέχονται στην αγορά, τόσο για το συμφέρον των ίδιων των βιομηχανιών, που είναι κυρίως οικονομικό, όσο και για το όφελος ολόκληρου του πλανήτη, με σκοπό τη μέγιστη δυνατή εξοικονόμηση ενέργειας.

7.ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Μποντόζογλου Β., Πανεπιστημιακές Σημειώσεις του μαθήματος Συσκευές Θερμικών Διεργασιών, Βόλος, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας
- [2] Κωνσταντίνος Γ.Πασπαλάς, “ Εναλλάκτες Θερμότητας” , Θεσσαλονίκη: εκδ.ΤΖΙΟΛΑ, 2014
- [3] Hesselgreaves, J.E., “Compact heat exchangers, selection, Design and Operation”, Pergamon, 2001
- [4] Κέντρο ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, “Οδηγός εξοικονόμησης ενέργειας με συστήματα ανάκτησης θερμότητας”
(http://www.cres.gr/kape/education/ODHGOS_ANAKTHSHS_THERMOTHTAS.pdf)
- [5] Piyush Sabharwall and Eung Soo Kim, “High Temperature Thermal Devices for Nuclear Process Heat Transfer Applications” , Idaho National Laboratory, United States of America, 2011 by InTeck
- [6] Kuppan Thulukkanam, “Heat Exchanger Design Handbook”, Second edition,2013 by Taylor and Francis Group
- [7] Andrzej Stankiewicz, Jacob A. Moulijn, “ Re-engineering the chemical processing plant, process intensification”,2004 by Marcel Dekker, Inc.
- [8] HoSung Lee, “Thermal Design ,Heat Sinks, Thermoelectrics, Heat Pipes, Compact Heat Exchangers, and Solar Cells”, 2010 by John Wiley & Sons, Inc
- [9] Sadik Kakaç, Hongtan Liu, “Heat Exchangers: Selection, Rating, and Thermal Design, Second Edition”,2002 by CRC Press LLC
- [10] Sadik Kakaç, Hongtan Liu, Anchasa Pramuanjaroenkij, “Heat Exchangers: Selection, Rating, and Thermal Design, Third Edition”,2012 by CRC Press LLC
- [11] B.Thonon , E.Breuil, “Compact heat exchanger technologies for the HTRs recuperator application”, Gas turbine power conversion systems for modular HTGRs, Report of a technical committee meeting ,2000 ,France
- [12] A. Sommers, Q. Wang, X. Han ,C. T'Joel, Y. Park, A. Jacobi , “Ceramics and ceramic matrix composites for heat exchangers in advanced thermal systems -A review”, 2010 by Elsevier Ltd
- [13] C. T'Joel, Y. Park, Q. Wang, A. Sommers, X. Hanc, A. Jacobi, “A review on polymer heat exchangers for HVAC&R applications”, 2008 by Elsevier Ltd
- [14] Spencer T. Branson, “Heat Exchangers: Types, Design, and Applications”, 2011 Nova Science Publishers, Inc
- [15] <http://www.frigohellas.gr/misc/sweep.pdf>
- [16] <http://www.cheresources.com>
- [17] <http://www.goochthermal.com>
- [18] <http://www.spiralheatexchangers.ca>

- [19] <http://sentry-equip.com/Public/Steam--Water/Specialty-Heat-Exchanger/SpiralHE-12.1.1-rev8.pdf>
- [20] https://en.wikipedia.org/wiki/Heat_exchanger
- [21] http://www.cres.gr/energy_saving/biomixania/paragogiki_diadikasia_enallaktes.htm
- [22] <http://processengineering.co.uk/article/1272968/going-through-the-proper-channels>
- [23] http://www.vahterus.com/sites/default/files/pshe_eng.pdf
- [24] <http://www.exergyllc.com/shell-and-tube-heat-exchangers.html>
- [25] http://www.mie.uth.gr/ekp_yliko/CEP_Shell_and_Tube_HX.pdf
- [26] http://www.academia.edu/3641995/Selection_and_Use_of_Printed_Circuit_Heat_Exchangers
- [27] <http://www.krones.com/en/magazine/compact-shell-and-tube-heat-exchanger.php>
- [28] <http://www.brighthubengineering.com/hvac/63955-a-fin-tube-heat-exchanger-gives-good-air-heat-exchanger-efficiency/>
- [29] <http://www.kelvion.com>
- [30] <http://www.ceramatec.com/>
- [31] www.heatxfer.com
- [32] <http://www.resinex.gr/>
- [33] <http://www.tranter.com/>
- [34] <http://www.itm-go.com>
- [35] <http://www.alfalaval.com/>
- [36] <http://www.lytron.com/>
- [37] <http://me.umn.edu/labs/polymer/abstracts.shtml>
- [38] http://cordis.europa.eu/result/rcn/80595_en.html
- [39] http://forgingmagazine.com/heating/understanding-ceramic-heat-exchangers-advantages#slide-2-field_images-9231
- [40] <http://plateheatexchanger.in/gasket-type-plate-heat-exchangers.html>
- [41] <http://www.sondex.net/>
- [42] <http://www.process-worldwide.com/index.cfm?pid=9890&pk=367972&fk=0&type=article>
- [43] <http://www.heatric.com/>
- [44] www.hisaka.co.jp/english/phe/product/bhe_structure.html
- [45] <http://www.brighthubengineering.com/hvac/63955-a-fin-tube-heat-exchanger-gives-good-air-heat-exchanger-efficiency>
- [46] <http://www.kansetu-intl.com/kic-product126.htm>
- [47] http://pig.ncl.ac.uk/polymer_film_compact_heat_exchangers.htm

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΗ



004000135195

