



ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΤΡΟΦΙΜΩΝ

Μεταφορά Θερμότητας
Εναλλάκτες Θερμότητας



Μεταφορά Θερμότητας

- Για την θέρμανση ενός σώματος (γενικότερα) ή ενός τροφίμου (ειδικότερα) απαιτείται μεταφορά θερμότητας από ένα θερμαντικό μέσο προς το σώμα. Το αποτέλεσμα της θέρμανσης θα είναι: αύξηση της θερμότητας του σώματος ή/και αλλαγή της φάσης του.
- Στις διεργασίες θέρμανσης δύο βασικά μεγέθη μας ενδιαφέρουν: α) η συνολική μεταφερόμενη θερμότητα και β) ο ρυθμός με τον οποίο η θερμότητα αυτή μεταφέρεται.

Αισθητή, λανθάνουσα θερμότητα

- Αισθητή θερμότητα $Q_s = m \cdot C_p \cdot \Delta T$
 - Q_s : Kcal ή BTU
 - m : kg ή lbm
 - C_p : kcal/kg °C ή BTU/lbm °F
 - ΔT : °C ή °F
- Λανθάνουσα θερμότητα τήξης ή πήξης $Q_f = m_f \cdot \lambda_f$
 - Q_f : Kcal ή BTU
 - m_f : kg ή lbm
 - λ_f : kcal/kg °C ή BTU/lbm °F
- Λανθάνουσα θερμότητα συμπύκνωσης ή εξάτμισης $Q_v = m_v \cdot \lambda_v$
 - Q_v : Kcal ή BTU
 - m_v : kg ή lbm
 - λ_v : kcal/kg °C ή BTU/lbm °F

Μεταφορά Θερμότητας

- Το άθροισμα της θερμότητας που απαιτείται ή ελευθερώνεται σε κάθε περίπτωση είναι:
$$Q_s + Q_f + Q_v = m \cdot C_p \cdot \Delta T + m_f \cdot \lambda_f + m_v \cdot \lambda_v$$

(Μεταφερόμενη Αισθητή θερμότητα + λανθάνουσα θερμότητα πήξης ή τήξης + λανθάνουσα θερμότητα συμπύκνωσης ή εξάτμισης)
- Για να υπολογίσουμε τον ρυθμό μεταφοράς αρκεί να διαιρέσουμε τις αντίστοιχες εξισώσεις με τον χρόνο (t).
- Η θέρμανση ενός προϊόντος μπορεί να γίνει με άμεση και έμμεση επαφή με το θερμαντικό μέσο.



Καταστάσεις μεταφοράς Θερμότητας

- Υπό σταθερή κατάσταση, όπου οι συνθήκες σε όλα τα σημεία του συστήματος μεταφοράς παραμένουν σταθερές σε σχέση με τον χρόνο. Είναι χαρακτηριστικό των συνεχών διεργασιών.
- Υπό ασταθή κατάσταση, όπου οι συνθήκες μεταφοράς δεν παραμένουν σταθερές σε όλα τα σημεία του συστήματος. Η κατάσταση αυτή είναι χαρακτηριστική των ασυνεχών διεργασιών ή του μεσοδιαστήματος μέχρι την επίτευξη των συνεχών διεργασιών.



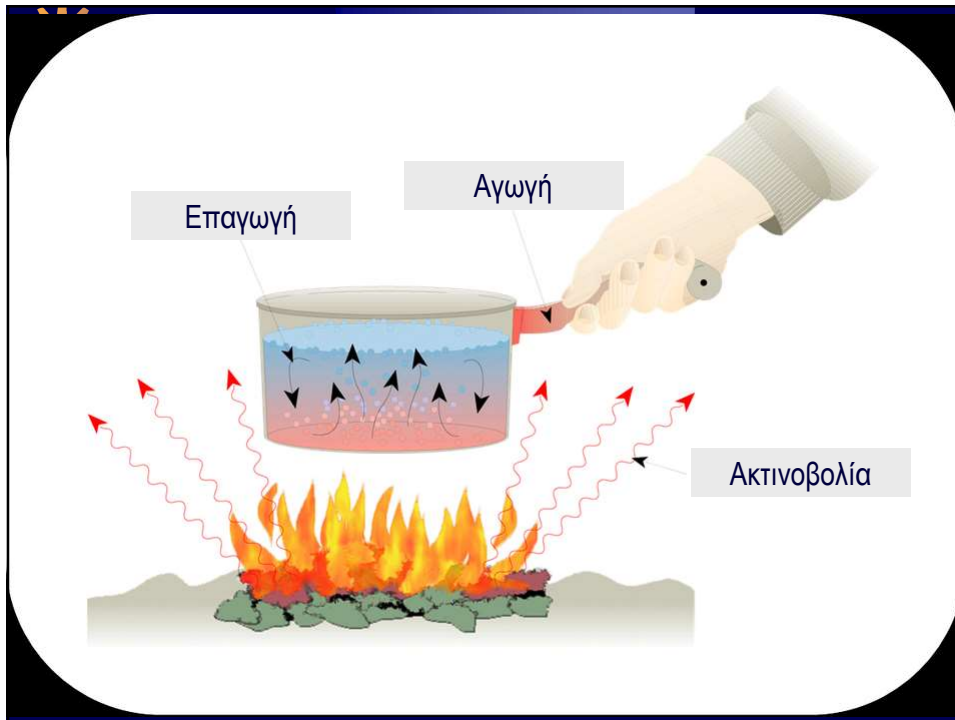
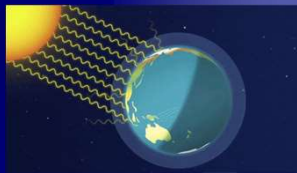
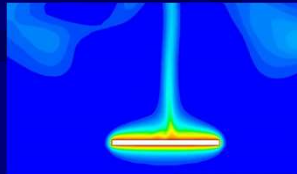
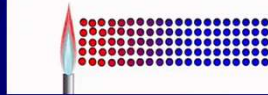
Μηχανισμοί μεταφοράς Θερμότητας

- Η μεταφορά θερμότητας είναι μια δυναμική διεργασία κατά την οποία θερμότητα μεταφέρεται από ένα θερμό σώμα σε ένα ψυχρό.
- Η ταχύτητα μεταφοράς εξαρτάται από την διαφορά θερμοκρασίας (κινητήρια δύναμη), ενώ η ίδια η μεταφορά συναντά και αντίσταση, οπότε :
 $\text{Ρυθ. μεταφ.} = \text{κινητήρια δύναμη} / \text{αντίσταση}$
- Υπάρχουν τρεις βασικοί μηχανισμοί μεταφοράς θερμότητας
 - Αγωγή
 - Επαγωγή
 - Ακτινοβολία

Μηχανισμοί μεταφοράς

- Με αγωγή (conduction), όπου η θερμική ενέργεια μεταφέρεται από μόριο σε μόριο χωρίς αλλαγή της σχετικής θέσης των μορίων (πχ εντός της μάζας στα στερεά).
- Με κυκλοφορία ή επαγωγή (convection), όπου τα μόρια κινούνται ελεύθερα και επιτυγχάνεται ανάμιξη των θερμότερων με τα ψυχρότερα μέρη του προϊόντος (πχ στα ρευστά χαμηλού ιξώδους και αέρια).
- Με ακτινοβολία (radiation) ηλεκτρομηχανικά όπου η μεταφορά θερμότητας μεταφέρεται ανεμπόδιστα στον χώρο από ένα σώμα υψηλής θερμοκρασίας σε ένα άλλο χαμηλότερης.

Conduction of Heat



Μεταφορά Θερμότητας με αγωγή

- Η μεταφορά με αγωγή εξαρτάται από τις βασικές ιδιότητες του στερεού υλικού και την γεωμετρία του.
- Ο βασικός νόμος μεταφοράς θερμότητας με αγωγή περιγράφεται από τη εξίσωση Fourier (1^{ος} νόμος του Fourier), που ορίζει:
 - $Q = -k \cdot A \cdot (dT/dx)$
 - Q: ο ρυθμός μεταφοράς θερμότητας
 - k: η θερμοαγωγιμότητα του υλικού
 - A: η κάθετη επιφάνεια στην ροή της θερμότητας (επιφάνεια μεταφοράς)
 - dT/dx : το θερμοκρασιακό προφίλ (διαφορά θερμότητας στη μονάδα πάχους του προϊόντος)

- Σε ασταθή κατάσταση (όπου το θερμοκρασιακό προφίλ μεταβάλλεται με τον χρόνο), ο ρυθμός μεταφοράς δίνεται από: $dQ/dt = -kA(dT/dx)$
- Ο ρυθμός μεταβολής της θερμότητας σε ένα συγκεκριμένο σημείο ενός ξηρού προϊόντος, δίνεται από την εξίσωση που αποτελεί τον 2^ο Νόμο του Fourier:

$$\frac{dT}{dt} = \frac{k}{\rho \cdot Cp} \cdot \left(\frac{d^2T}{dx^2} + \frac{d^2T}{dy^2} + \frac{d^2T}{dz^2} \right)$$

όπου λαμβάνεται υπ όψη η ροή της θερμότητας κατά τις τρεις κατευθύνσεις x, y & z.

Μεταφορά Θερμότητας με επαγωγή

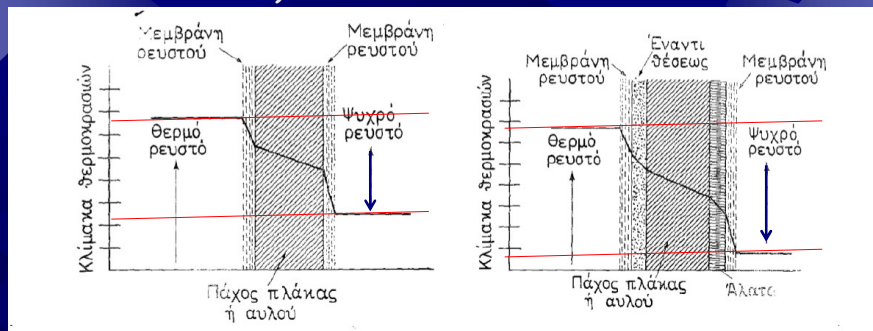
- Η μεταφορά θερμότητας σε ένα ρευστό με χαμηλό ιξώδες γίνεται με κυκλοφορία (επαγωγή) αλλά σε ένα μικρό βαθμό και με αγωγή.
- Η κυκλοφορία μπορεί να είναι φυσική ή εξαναγκασμένη.
- Η βασική εξίσωση που περιγράφει τη μεταφορά θερμότητας με κυκλοφορία είναι:
 $Q = h_c \cdot A \cdot (T_s - T_\infty)$ όπου:
 h_c ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας
 A η επιφάνεια μεταφοράς θερμότητας
 T_s και T_∞ η θερμοκρασία στην επιφάνεια του θερμαινόμενου τοιχώματος και στο ελεύθερο ρεύμα του ρευστού.

Μεταφορά Θερμότητας με ακτινοβολία

- Η μεταφορά θερμότητας με ακτινοβολία είναι ανάλογη με τη θερμοκρασία της εκπέμπουσας επιφάνειας.
- Η ενέργεια που εκπέμπεται από μία επιφάνεια (A) σε θερμοκρασία (T_A) δίνεται από την εξίσωση: $Q = A \cdot e \cdot \sigma \cdot T_A^4$
 σ : η σταθερά των Stefan-Boltzmann
 e : εγγύτητα του σώματος με το «μελανό σώμα», 1 για μελανό σώμα.

Τυπική μεταφορά με έμμεση θέρμανση

- Περιλαμβάνει αρκετά θερμοκρασιακά profiles
- Θα πρέπει να λαμβάνεται υπ όψη ο συντελεστής μεταφοράς ανάμεσα στα ρευστά, στα στερεά, και στην (σχεδόν) ακίνητη στοιβάδα του ρευστού (film coefficient).



Συντελεστές μεταφοράς θερμότητας

- Για να αντιμετωπισθεί η πολυπλοκότητα των μαθηματικών εκφράσεων της μεταφοράς θερμότητας από και προς διάφορα σώματα, πολλές ομάδες εξισώσεων έχουν αντικατασταθεί με εμπειρικούς συντελεστές.
- Τέτοιοι συντελεστές είναι οι αριθμοί: Nusselt (Nu), Graetz (Gz), Prandtl (Pr) και Reynolds (Re).
- Οι αριθμοί αυτοί είναι συγκροτημένοι ώστε να είναι αδιάστατοι και να συνδέονται μεταξύ τους με χαρακτηριστικές εξισώσεις τις οποίες πρέπει να χρησιμοποιούμε ανάλογα με την περίπτωση.



Εξοπλισμός μεταφοράς θερμότητας

Ο κυριότερος τύπος εξοπλισμού για την μεταφορά θερμότητας είναι οι εναλλάκτες (μεταφορά με έμμεση κυρίως επαφή), οι οποίοι χωρίζονται σε:

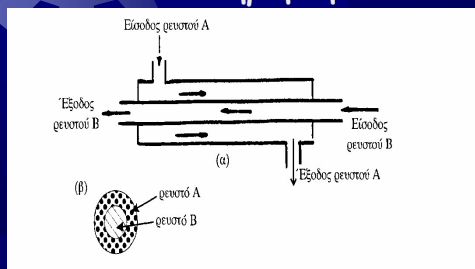
1. Εναλλάκτες διπλού σωλήνα
2. Εναλλάκτες τριπλού σωλήνα
3. Εναλλάκτες σωλήνων-κελύφους ή πολλαπλών αυλών (ροή ρευστού/μέσου: 1-1, 1-2, 2-4, 3-6 κλπ).
4. Εναλλάκτες πλακών-κελύφους
5. Εναλλάκτες πλακών
6. Σπειροειδείς εναλλάκτες (με ελάσματα ή με σωλήνες)
7. Εναλλάκτες αποξέωμενης επιφάνειας
8. Εναλλάκτες σερπαντίνας
9. Δεξαμενές Θέρμανσης/ψύξης
10. Εναλλάκτες κάθετης ροής

Άλλος τύπος είναι οι εναλλάκτες άμεσης μεταφοράς θερμότητας



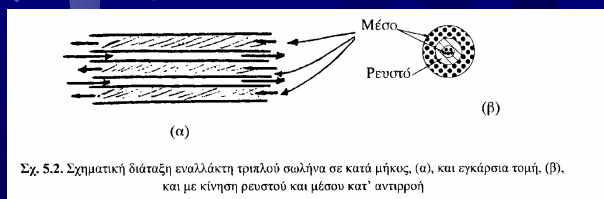
1. Εναλλάκτες διπλού σωλήνα

Είναι ο απλούστερος τύπος εναλλάκτη. Κατάλληλος για μικρές παροχές με ποικίλο μήκος σωληνώσεων. Ανάλογα με την χρήση απαιτούν ή όχι τακτική συντήρηση.



2. Εναλλάκτες τριπλού σωλήνα

- Σύνθετος τύπος του διπλού σωλήνα. Εδώ έχουμε αύξηση της επιφάνειας μεταφοράς θερμότητας και υψηλότερους συντελεστές αλλά και ρυθμούς μεταφοράς.

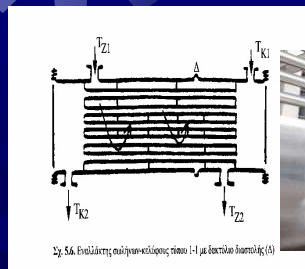


Τύπος 2-1

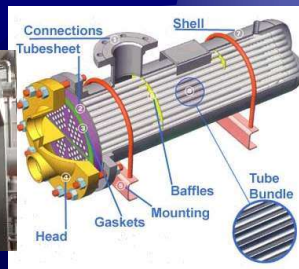
Σχ. 5.2. Σχηματική διάταξη εναλλάκτη τριπλού σωλήνα σε κατά μήκος, (α), και εγκάρσια τομή, (β), και με κίνηση ρευστού και μέσου κατ' αντίρροφη

3. Εναλλάκτες σωλήνων-κελύφους

- Δέσμες σωλήνων που περικλείονται μέσα σε κέλυφος μεταφοράς του μέσου. Με πλατειά εφαρμογή στην βιομηχανία τροφίμων όπου απαιτείται επεξεργασία ρευστών με συνεχή ροή και μεγάλες παροχές.
- Η αναλογία διαδρομών μέσου- ρευστού μπορεί να ποικίλει ανάλογα (1-1, 2-2, 2-4, 3-6 κλπ).
- Ειδικές διατάξεις (ανακλαστήρες) ρυθμίζουν τον τύπο ροής του μέσου για καλύτερες αποδόσεις.

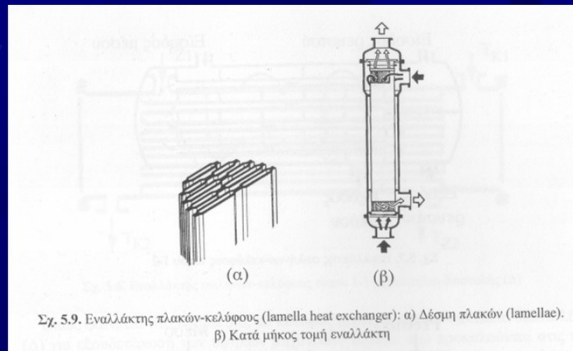


Σχ. 5.6. Εναλλάκτης σωλήνων-κελύφους είσοδο 1-1 με βασικό διατομή (1)



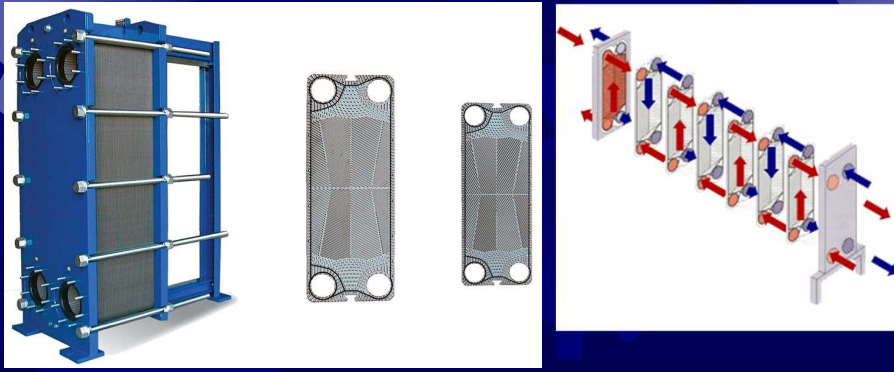
4. Εναλλάκτες πλακών-κελύφους

- ✦ Παραλλαγή του προηγούμενου τύπου με υποκατάσταση των σωλήνων από επίπεδα φύλλα με πτυχές.



5. Εναλλάκτες πλακών

- ✦ Ιδιαίτερα αποδοτικά συστήματα με δυνατότητες αυξομείωσης της παροχής. Χρησιμοποιούνται από την βιομηχανία τροφίμων στην επεξεργασία (βλ. παστερίωση ή εμπορική αποστείρωση κλπ) ρευστών χαμηλού ιξώδους (χυμοί, γάλα).



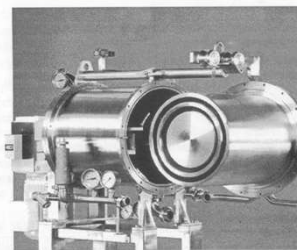
6. Σπειροειδείς εναλλάκτες

- Παραλλαγή των πλακοειδών αλλά πιο συμπαγείς και καταλαμβάνουν λιγότερο χώρο. Αντέχουν σε υψηλότερες πιέσεις από τους προηγούμενους αλλά και σε μηχανική καταπόνηση.



7. Εναλλάκτες αποξεώμενης επιφάνειας

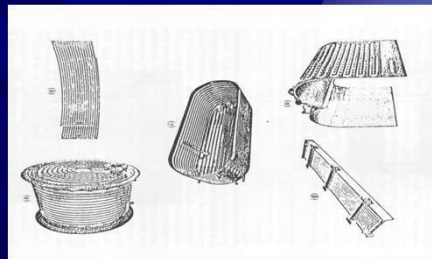
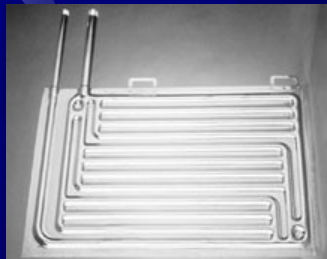
- Από τους πλέον περίπλοκους αλλά και δαπανηρούς τύπους που χρησιμοποιούνται στην περίπτωση ρευστών με υψηλό ιξώδες ή για μίγματα ρευστών με τεμάχια στερεών.



Σχ. 5.27. Εσωτερική άποψη τηλεσκοπικού εναλλάκτη αποξεώμενης επιφάνειας με πολλαπλούς θαλάμους εναλλαγής θερμότητας

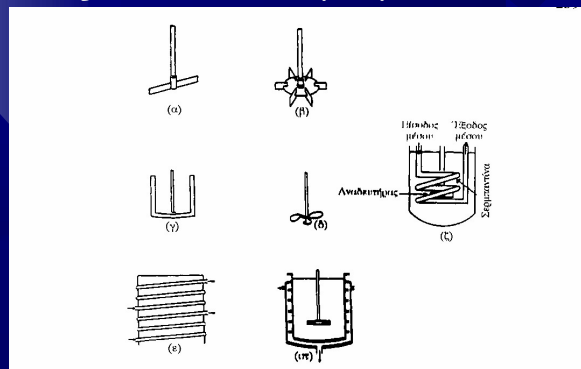
8. Εναλλάκτες τύπου σερπαντίνας

- Λεπτοί σπειροειδείς σωλήνες οι οποίοι εμβαπτίζονται μέσα σε δεξαμενές ρευστών (ή τις διατρέχουν) προκειμένου το ψυκτικό/θερμαντικό μέσο να ψύξει/θερμάνει το ρευστό.



9. Δεξαμενές θέρμανσης/ψύξης

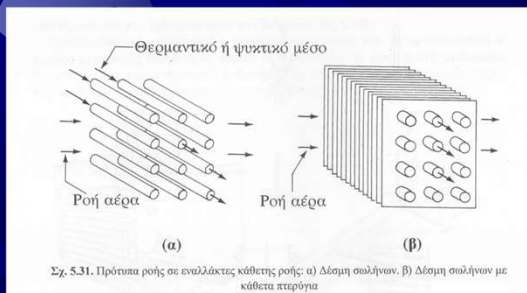
- Απλούστερες διατάξεις που χρησιμοποιούνται σε ασυνεχείς διεργασίες συνήθως σε συνδυασμό με ανάδευση.





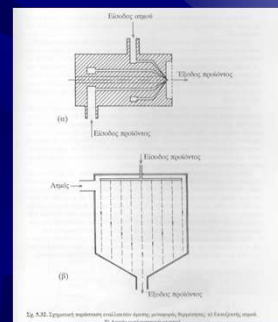
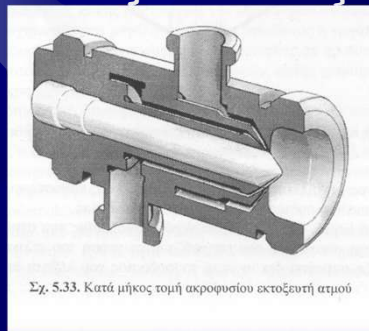
10. Εναλλάκτες κάθετης ροής

- Χρησιμοποιούνται στην θέρμανση/ψύξη αερίων. Αποτελούνται από σωλήνες μεταφοράς του ψυκτικού/θερμαντικού οι οποίοι κάθετα ενώνονται με λεπτά μεταλλικά πτερύγια.



11. Εναλλάκτες άμεσης μεταφοράς θερμότητας.

- Πρόκειται για διατάξεις εκτόξευσης ατμού προς ή μαζί με το ρευστό. Προϋποθέτει πόσιμη ποιότητα νερού καθώς και διατάξεις αφυδάτωσης.



12. Άμεσοι τρόποι μεταφοράς θερμότητας

- Τα τελευταία χρόνια στην βιομηχανία τροφίμων εφαρμόζονται σε μεγάλο βαθμό οι μέθοδοι της Ωμικής Θέρμανσης ή των Παλλόμενων Ηλεκτρικών Πεδίων.
- Τα πλεονεκτήματα των μεθόδων αυτών είναι η αποδοτική χρήση της ενέργειας, ο θερμοκρασιακός έλεγχος και η εύκολη συντήρηση.

Άσκηση

- Τι επιπτώσεις έχουν οι αποθέσεις στερεών στους εναλλάκτες θερμότητας και πώς καταλαβαίνουμε την παρουσία τους?