

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.

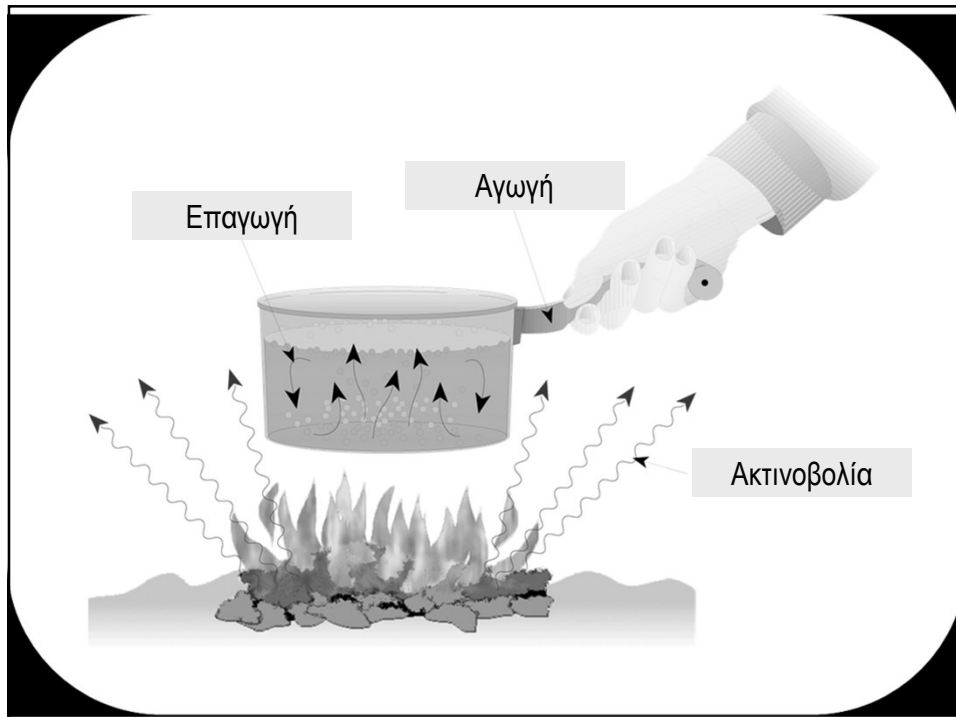
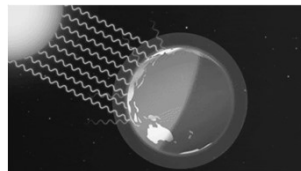
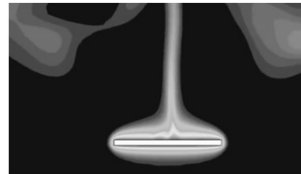
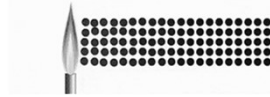
Μηχανισμοί μεταφοράς Θερμότητας

- * 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

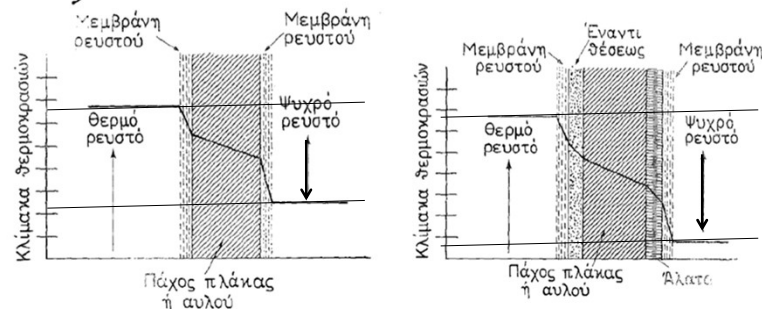
- * Η μεταφορά θερμότητας σε ένα ρευστό με χαμηλό ιξώδες γίνεται με κυκλοφορία (επαγωγή) αλλά σε ένα μικρό βαθμό και με αγωγή.
- * Η κυκλοφορία μπορεί να είναι φυσική ή εξαναγκασμένη.
- * Η βασική εξίσωση που περιγράφει τη μεταφορά θερμότητας με κυκλοφορία είναι:
 $Q = h_c \cdot A \cdot (T_s - T_\infty)$ 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

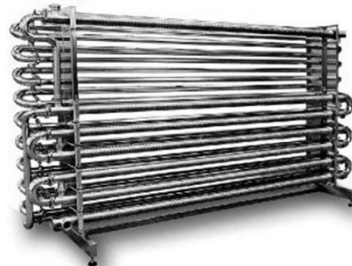
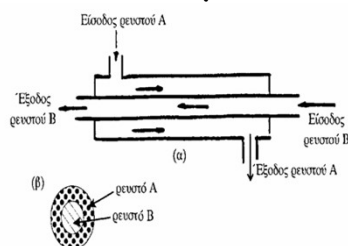
- Για να αντιμετωπισθεί η πολυπλοκότητα των μαθηματικών εκφράσεων της μεταφοράς θερμότητας από και προς διάφορα σώματα, πολλές ομάδες εξισώσεων έχουν αντικατασταθεί με εμπειρικούς συντελεστές.
- Τέτοιοι συντελεστές είναι οι αριθμοί: Nusselt (Nu), Graetz (Gz), Prandtl (Pr) και Reynolds (Re).
- Οι αριθμοί 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

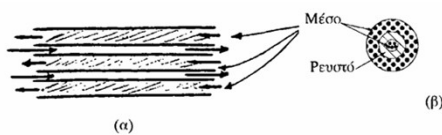
1. Εναλλάκτες διπλού σωλήνα

- 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 3-2

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

3. Εναλλάκτες σωλήνων-κελύφους

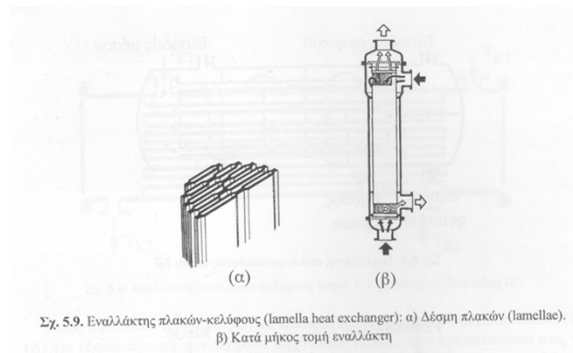
- ✱ Δέσμες σωλήνων που περικλείονται μέσα σε κέλυφος μεταφοράς του μέσου. Με πλατειά εφαρμογή στην βιομηχανία τροφίμων όπου απαιτείται επεξεργασία ρευστών με συνεχή ροή και μεγάλες παροχές.
- ✱ Η αναλογία διαδρομών μέσου- ρευστού μπορεί να ποικίλει ανάλογα (1-1, 2-2, 2-4, 3-6 κλπ).
- ✱ Ειδικές διατάξεις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



Σχ. 5.6. Εναλλάκτης σωλήνων-κέλυφος τύπου 1-1 με διατετακτο διατετακτός (1)

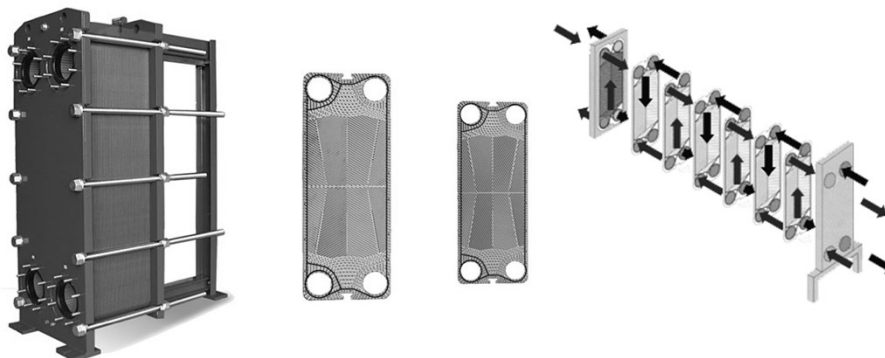
4. Εναλλάκτες πλακών-κελύφους

- ✱ 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).



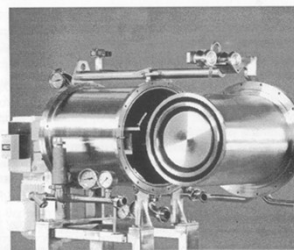
6. Σπειροειδείς εναλλάκτες

- ✱ 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

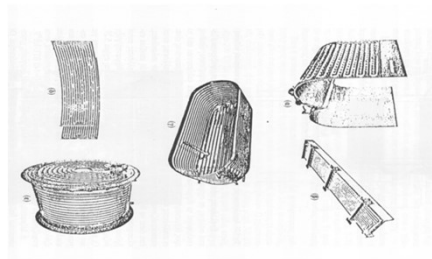
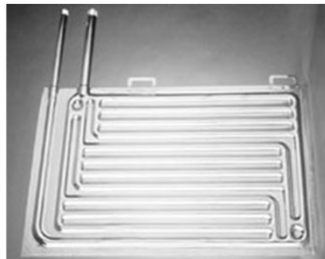
- ✱ Από τους πλέον περίπλοκους αλλά και δαπανηρούς τύπους που χρησιμοποιούνται στην περίπτωση ρευστών με υψηλό ιξώδες ή για μίγματα ρευστών με τεμάχια στερεών.



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

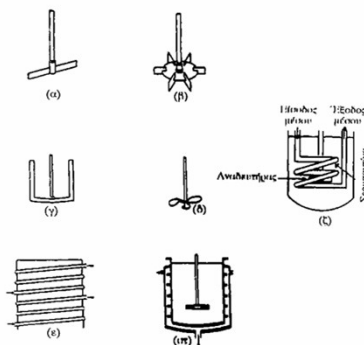
8. Εναλλάκτες τύπου σερπαντίνας

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



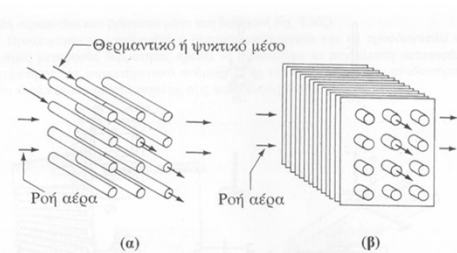
9. Δεξαμενές θέρμανσης/ψύξης

- ✱ 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.

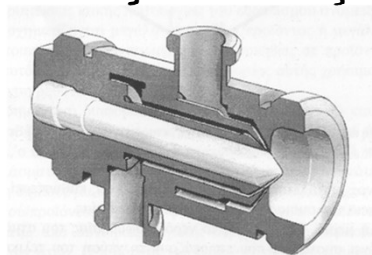


Σχ. 5.31. Πρότυπα ροής σε εναλλάκτες κάθετης ροής: α) Δέσμη σωλήνων, β) Δέσμη σωλήνων με κάθετα πτερύγια

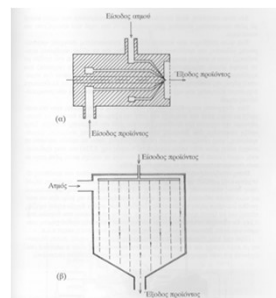


11. Εναλλάκτες άμεσης μεταφοράς θερμότητας.

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



Σχ. 5.33. Κατά μήκος τομή ακροφυσίου εκτοξευτή ατμού



Σχ. 5.32. Σχηματική παράσταση εκτοξευτή ατμού, α) εκτοξευτής ατμού, β) εκτοξευτής ατμού με αφυδάτωση

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?