

# 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
  - \*  $\Delta T$ : °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
  - \*  $\lambda_f$ : 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
  - \*  $\lambda_v$ : 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.

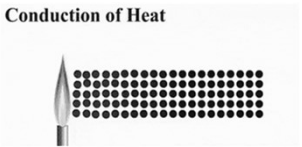
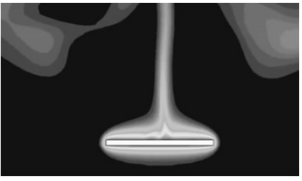
## Καταστάσεις μεταφοράς Θερμότητας

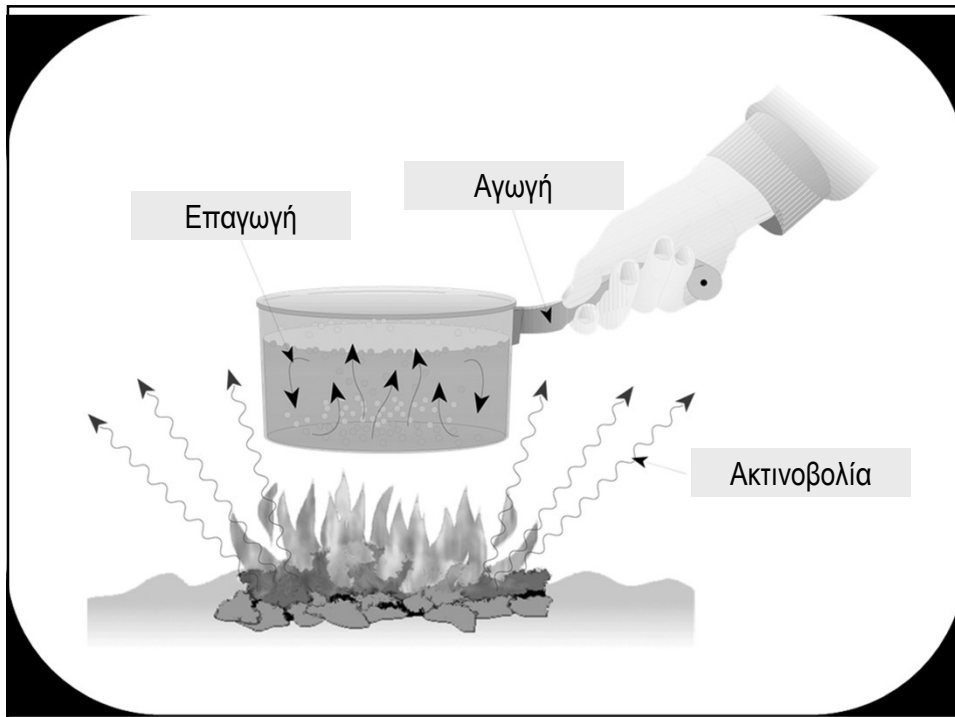
- \* Υπό σταθερή κατάσταση, όπου οι συνθήκες σε όλα τα σημεία του συστήματος μεταφοράς παραμένουν σταθερές σε σχέση με τον χρόνο. Είναι χαρακτηριστικό των συνεχών διεργασιών.
- \* Υπό ασταθή κατάσταση, όπου οι συνθήκες μεταφοράς δεν παραμένουν σταθερές σε όλα τα σημεία του συστήματος. Η κατάσταση αυτή 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). 
- Με ακτινοβολία (radiation) ηλεκτρομηχανικά όπου η μεταφορά θερμότητας μεταφέρεται ανεμπόδιστα στον χώρο από ένα σώμα υψηλής θερμοκρασίας σε ένα άλλο χαμηλότερης. 



## 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<sup>ος</sup> 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<sup>ο</sup> 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

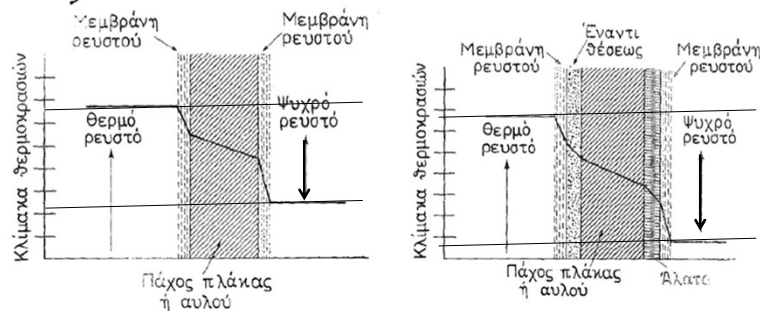
- \* Η μεταφορά θερμότητας σε ένα ρευστό με χαμηλό ιξώδες γίνεται με κυκλοφορία (επαγωγή) αλλά σε ένα μικρό βαθμό και με αγωγή.
- \* Η κυκλοφορία μπορεί να είναι φυσική ή εξαναγκασμένη.
- \* Η βασική εξίσωση που περιγράφει τη μεταφορά θερμότητας με κυκλοφορία είναι:  
 $Q = h_c \cdot A \cdot (T_s - T_\infty)$  όπου:  
 $h_c$  ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας  
 $A$  η επιφάνεια μεταφοράς θερμότητας  
 $T_s$  και  $T_\infty$  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:  $Q = A \cdot e \cdot \sigma \cdot T_A^4$   
 $\sigma$ : 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

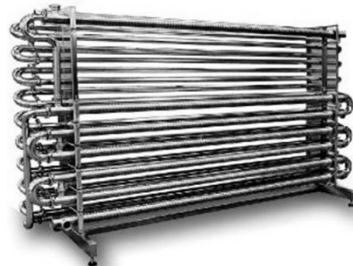
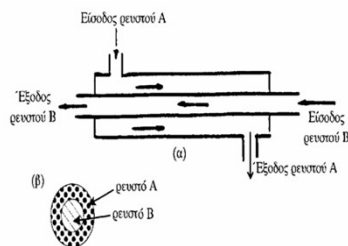
- Για να αντιμετωπισθεί η πολυπλοκότητα των μαθηματικών εκφράσεων της μεταφοράς θερμότητας από και προς διάφορα σώματα, πολλές ομάδες εξισώσεων έχουν αντικατασταθεί με εμπειρικούς συντελεστές.
- Τέτοιοι συντελεστές είναι οι αριθμοί: Nusselt ( $Nu$ ), Graetz ( $Gz$ ), Prandtl ( $Pr$ ) και Reynolds ( $Re$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

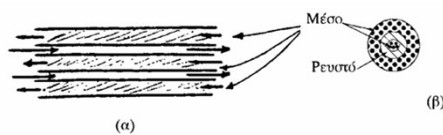
- \* Είναι ο απλούστερος τύπος εναλλάκτη. Κατάλληλος για μικρές παροχές με ποικίλο μήκος σωληνώσεων. Ανάλογα με την χρήση απαιτούν ή όχι τακτική συντήρηση.





## 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' αντήρση

## 3. Εναλλάκτες σωλήνων-κελύφους

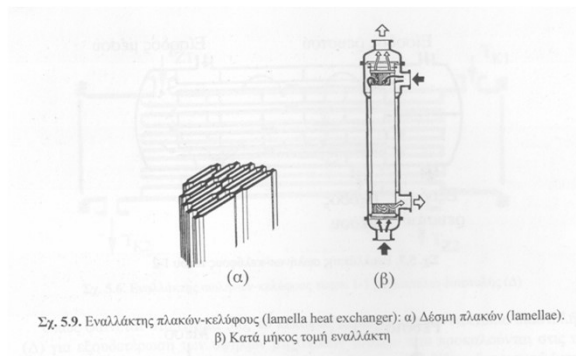
- ✱ Δέσμες σωλήνων που περικλείονται μέσα σε κέλυφος μεταφοράς του μέσου. Με πλατειά εφαρμογή στην βιομηχανία τροφίμων όπου απαιτείται επεξεργασία ρευστών με συνεχή ροή και μεγάλες παροχές.
- ✱ Η αναλογία διαδρομών μέσου- ρευστού μπορεί να ποικίλει ανάλογα (1-1, 2-2, 2-4, 3-6 κλπ).
- ✱ Ειδικές διατάξεις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



Σχ. 5.6. Εναλλάκτης σωλήνων-κέλυφος τύπου 1-1 με βασικό διάτομο (1)

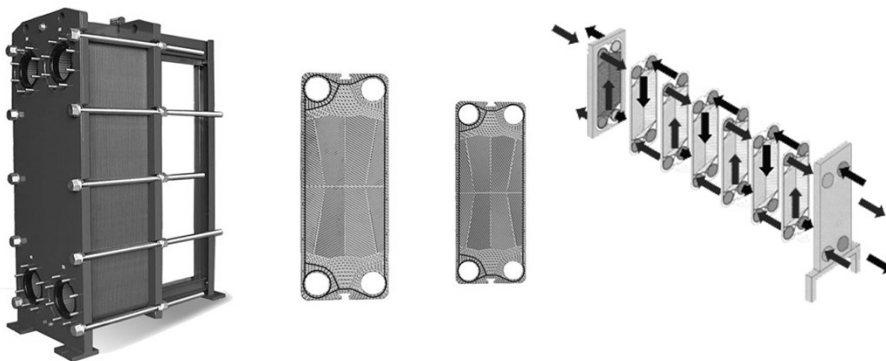
## 4. Εναλλάκτες πλακών-κελύφους

- ✱ 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).



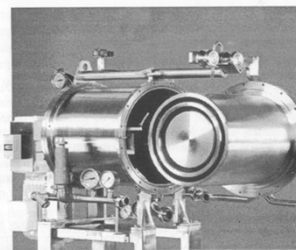
## 6. Σπειροειδείς εναλλάκτες

- ✱ 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

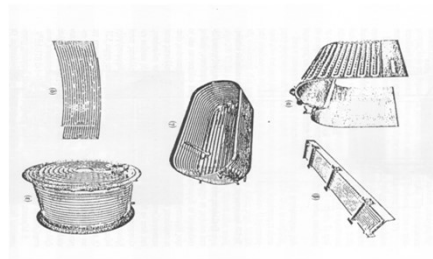
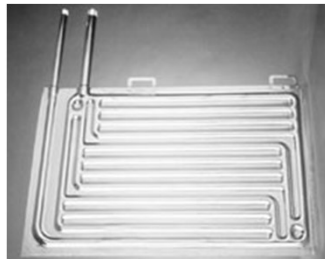
- ✱ Από τους πλέον περίπλοκους αλλά και δαπανηρούς τύπους που χρησιμοποιούνται στην περίπτωση ρευστών με υψηλό ιξώδες ή για μίγματα ρευστών με τεμάχια στερεών.



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

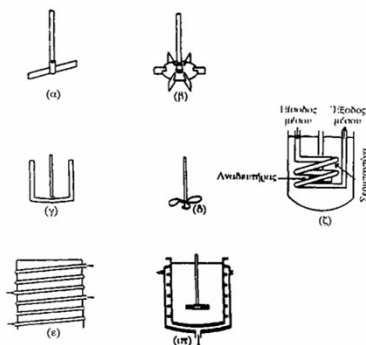
## 8. Εναλλάκτες τύπου σερπαντίνας

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



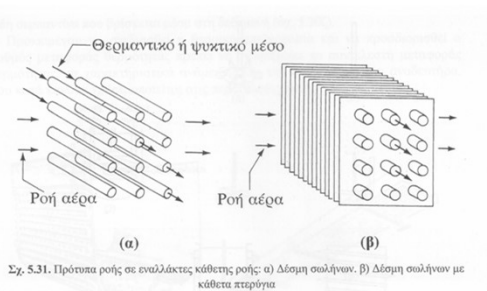
## 9. Δεξαμενές θέρμανσης/ψύξης

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



## 10. Εναλλάκτες κάθετης ροής

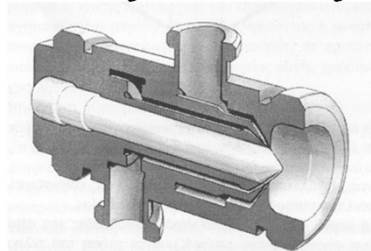
- ✱ Χρησιμοποιούνται στην θέρμανση/ψύξη αερίων. Αποτελούνται από σωλήνες μεταφοράς του ψυκτικού/θερμαντικού οι οποίοι κάθετα ενώνονται με λεπτά μεταλλικά πτερύγια.



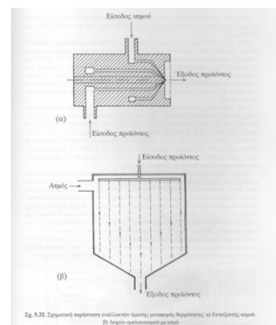
Σχ. 5.31. Πρότυπα ροής σε εναλλάκτες κάθετης ροής: α) Δέσμη σωλήνων. β) Δέσμη σωλήνων με κάθετα πτερύγιο

## 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) ατμός, β) ρευστό

## 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.