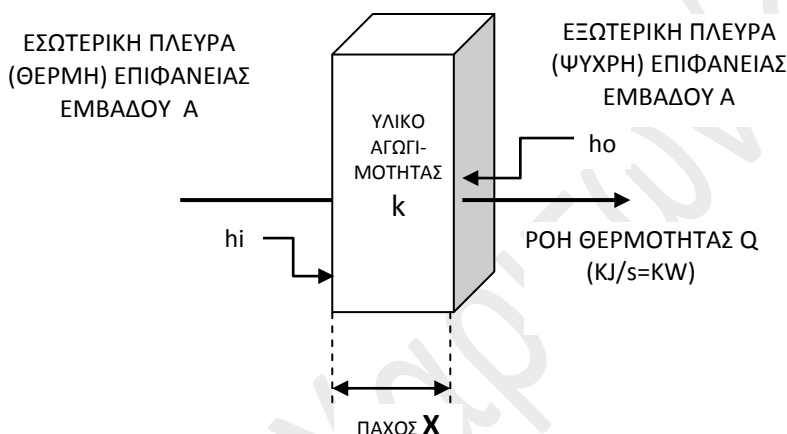


## ΠΕΡΙ ΕΥΚΟΛΙΑΣ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ

12-7-13

Συμφωνά με το 2<sup>ο</sup> θερμοδυναμικό αξίωμα, η θερμότητα ρέει από ένα σώμα ψηλότερης προς ένα σώμα χαμηλότερης θερμοκρασίας. Αν παρεμβάλλεται ένα σώμα στην οδό της ροής της θερμότητας, το σώμα αυτό δημιουργεί ένα εμπόδιο στη ροή, μικρό ή μεγάλο. Ανάλογα την εφαρμογή, άλλες φορές θέλουμε το σώμα να δημιουργεί μεγάλο εμπόδιο (π.χ. μονωτικά υλικά) και άλλες φορές μικρό εμπόδιο (π.χ. εναλλάκτες, πρόψυξη). Για απλούστευση, ας υποθέσουμε ότι το «εμπόδιο» είναι ένα ορθογώνιο παραλληλεπίπεδο (σχ. 1).



Ισχύει :  $Q = U \cdot A \cdot \Delta t$  (1), όπου :

$Q$  η ταχύτητα ροής θερμότητας (KJ/s=KW).

$A$  : Το εμβαδόν της εξωτερικής - εσωτερικής επιφάνειας ( $m^2$ ) (στη προκείμενη περίπτωση είναι ίδιο μέσα - έξω).

$\Delta t$  : Η διαφορά θερμοκρασιών «θερμό» - «ψυχρό» (K).

$U$  : Ο **συνολικός** συντελεστής θερμικής μεταφοράς (KW/ $m^2 \cdot K$ ).

Στο τύπο αυτό, τα  $A$  και  $\Delta t$  είναι εύκολα. Η δυσκολία παρουσιάζεται στον υπολογισμό του συντελεστή  $U$ , τον οποίο εξετάζουμε στα επόμενα :

Ο συντελεστής  $U$  επηρεάζεται από τα εξής :

1. Τη «θερμική συμπεριφορά» της εξωτερικής επιφάνειας (interface), δηλαδή την ευκολία, με την οποία «σκατζάρει» η θερμότητα από το υλικό του σώματος - εμποδίου προς τον (ψυχρό

- εξωτερικό) αέρα (ή άλλο ρευστό). Η συμπεριφορά αυτή εκφράζεται μέσω του **συντελεστή θερμικής μεταγωγής μεταξύ εξωτερικού ρευστού και υλικού σώματος**, τον οποίο συμβολίζουμε με **ho** (KW/m<sup>2</sup>·K).
2. Τη φύση του υλικού του σώματος – εμποδίου (π.χ. μονωτικό υλικό, μέταλλο εναλλάκτη, υλικό τροφίμου προς πρόψυξη), η οποία εκφράζεται μέσω του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας του υλικού **k** (KW/m·K).
  3. Τη «θερμική συμπεριφορά» της εσωτερικής επιφάνειας (interface), δηλαδή την ευκολία, με την οποία «σκατζάρει» η θερμότητα από τον (εσωτερικό θερμό) αέρα (ή άλλο ρευστό) προς το υλικό του σώματος. Η συμπεριφορά αυτή εκφράζεται μέσω του **συντελεστή θερμικής μεταγωγής μεταξύ εσωτερικού ρευστού και υλικού σώματος**, την οποία συμβολίζουμε με **hi** (KW/m<sup>2</sup>·K).

Η σχέση που συνδέει τα U, ho, hi και k είναι η εξής :

$$1/U = 1/ho + x/k + 1/hi, \quad (2)^1$$

όπου x το «πάχος» του σώματος κατά τη διεύθυνση ροής της θερμότητας. Τα μεγέθη ho και hi εξαρτώνται από τη φύση των επιφανειών (τραχύτητα κλπ) και κύρια από τη ταχύτητα των ρευστών (π.χ. αέρα), που βρίσκονται εξωτερικά – εσωτερικά αντίστοιχα. Η ποσότητα 1/U ονομάζεται και **συνολικός συντελεστής θερμικής αντίστασης**.

**ΕΦΑΡΜΟΓΗ** : Να εξεταστούν οι ποιοτικοί παράγοντες που επηρεάζουν τη ταχύτητα πρόψυξης οπωρολαχανικών με τη μέθοδο του ψυχρού αέρα.

Εξετάζοντας το τύπο (1), προφανώς ο χρόνος πρόψυξης μειώνεται, όταν αυξάνεται η ταχύτητα ροής της θερμότητας Q (KW), ή ισοδύναμα όταν αυξάνεται το γινόμενο U·A·Δt. Προς τούτο, μπορούμε να κάνουμε τις εξής ενέργειες, ή συνδυασμό αυτών :

1. Να αυξήσουμε το Δt, δηλαδή να μειώσουμε τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος αέρα (αύξηση ψυκτικής ισχύος).
2. Να μεγαλώσουμε την εξωτερική επιφάνεια του προϊόντος A. Τούτο επιτυγχάνεται με το «αραιώμα» των προϊόντων. Στα αραιωμένα προϊόντα η εξωτερική επιφάνεια A είναι το άθροισμα των εξωτερικών επιφανειών των μεμονωμένων συσκευασιών, αφού τώρα περιβάλλονται όλες από ψυχρό αέρα.

<sup>1</sup> Ο τύπος αυτός ισχύει μόνο αν τα εμβαδά και από τις δυο πλευρές του σώματος – εμποδίου είναι ίσα (A στο σχήμα).

**3.** Αύξηση του συντελεστή θερμικής μεταγωγής εξωτερικής επιφάνειας  $h_o$ . Τούτο επιτυγχάνεται με αύξηση της ταχύτητας του αέρα: Ο συντελεστής θερμικής μεταγωγής (convection coefficient) μεταξύ αέρα – επιφάνειας προϊόντος  $h_o$  μπορεί να ληφθεί προσεγγιστικά από τη σχέση (αναφορά 1) :  **$h_o = 25 \cdot (V)^{0,6}$** , όπου  $V$  η ταχύτητα του αέρα. Εφόσον η ταχύτητα του αέρα είναι σε m/s, το  $h_o$  είναι σε  $W/m^2 \cdot K$ .

**ΣΗΜΕΙΩΣΕΙΣ :**

1. Θεωρούμε ότι το υλικό συσκευασίας είναι απόλυτα διαπερατό και πρακτικά δεν παρουσιάζει εμπόδιο στη ροή θερμότητας (αλλιώς θα έπρεπε να θεωρηθεί σαν ξεχωριστό «σώμα», με τα δικά του  $h_o$ ,  $h_i$  και  $k$ ).
2. Σαν σώμα – εμπόδιο θεωρείται το ίδιο το προϊόν. Δεν υπάρχει «εσωτερικό» ρευστό ( $h_i$ ), παρά μόνο εξωτερικό ρευστό ( $h_o$ ), δηλαδή ο ψυχρός αέρας.
3. Σαν πάχος  $x$  θεωρείται η απόσταση του γεωμετρικού κέντρου του προς πρόψυξη σώματος (προϊόντος) μέχρι την εξωτερική επιφάνεια (αέρα). Είναι προφανές, ότι με το αραιώμα των συσκευασιών, μειώνεται κατά πολύ η διάσταση  $x$ , άρα και ο λόγος  $x/k$  στον τύπο (2) και κατ' επέκταση ο λόγος  $1/U$ . Όταν όμως μειώνεται το  $1/U$ , αυξάνεται το  $U$ , άρα και η ταχύτητα ροής θερμότητας  $Q$  (παγώματος), σύμφωνα με το τύπο (1). Αν δεν γίνει αραιώμα, η απόσταση  $x$  είναι το γεωμετρικό κέντρο της παλέτας, που είναι πολλαπλάσια από αυτή της προηγούμενης περίπτωσης (άρα πολύ μεγαλύτερο το  $1/U \rightarrow$  μικρότερο  $U \rightarrow$  μικρότερο  $Q \rightarrow$  βραδύτερο πάγωμα).
4. Ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας του προϊόντος  $k$  ( $W/m \cdot K$ ) μπορεί να ληφθεί προσεγγιστικά από τις σχέσεις (αναφορά 1) :
  - a. Για φρούτα και λαχανικά  **$k=0,148+0,493F_w$** , όπου  $F_w$  η αναλογία (κατά βάρος) νερού στο προϊόν.
  - b. Για κρέατα  **$k=0,08+0,52F_w$** , όπου  $F_w$  η αναλογία (κατά βάρος) νερού στο προϊόν.

**Αναφορές :**

1. Wilbert F. Stoecker "Industrial Refrigeration Handbook", McGraw Hill, 1998
2. Roy J. Dossat "Principles of Refrigeration", 4<sup>th</sup> edition, Prentice Hall