

# Αρχές Επεξεργασίας Τροφίμων

Κατάψυξη τροφίμων

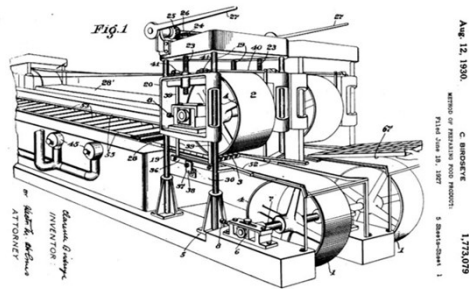
## Κατάψυξη

- Απομάκρυνση θερμότητας από ένα προϊόν με αποτέλεσμα την μείωση της θερμοκρασίας του κάτω από το σημείο πήξης.
- Ως μέθοδος συντήρησης βασίζεται:
  - Στην αναστολή της μικροβιακής δράσης
  - Στην επιβράδυνση των χημικών διεργασιών
- Τα παραπάνω είναι αποτέλεσμα:
  - Των χαμηλών θερμοκρασιών
  - Της χαμηλής ενεργότητας του νερού, αλλά και
  - Στην συμβολή άλλων προκαταρκτικών επεξεργασιών

## Ιστορικά

- Αν και η ψύξη έχει χρησιμοποιηθεί σαν μέθοδος συντήρησης για αιώνες, η μηχανική μέθοδος της ταχείας κατάψυξης των τροφίμων ανακαλύφθηκε από τον Αμερικανό C. Birdseye στις αρχές του 20<sup>ου</sup> αιώνα.

Ο Birdseye μελέτησε τις συνθήκες ψύξης των τροφίμων και κατοχύρωσε το μηχανικό του σύστημα το 1930. Θεωρείται ο πατέρας των κατεψυγμένων τροφίμων και οι εταιρείες που ίδρυσε κυριαρχούν στον χώρο έως και σήμερα.



## Φάσεις κατάψυξης

- Φάση κατάψυξης
  - Απομάκρυνση θερμότητας, μετατροπή νερού σε παγοκρυστάλλους, μείωση θερμότητας στην τελική της τιμή
- Φάση συντήρησης υπό κατάψυξη
  - Διατήρηση της θερμοκρασίας σε χαμηλές τιμές (< -18°C)
- Φάση απόψυξης
  - Πρόσληψη θερμότητας από το προϊόν, τήξη παγοκρυστάλλων και επαναφορά στην αρχική του κατάσταση.

## Υπερ – Κατά

- Η σωστή εφαρμογή όλων των φάσεων της κατάψυξης με τον ενδεδειγμένο τρόπο διατηρεί την ποιότητα των τροφίμων σε επίπεδα ανάλογα με τα νωπά τρόφιμα.
- Σε αντιδιαστολή, ο σχηματισμός παγοκρυστάλλων, η δράση των ενζύμων και οι ενεργειακές απαιτήσεις αποτελούν τα βασικά μειονεκτήματα της μεθόδου.

Στάδιο	Αφυδάτωση	Λυοφιλίωση	Κονσερβοποίηση	Κατάψυξη
Επεξεργασία	8	42	6	5
Συσκευασία	1	2	14	7
Συντήρηση	0,1	0,1	0,1	32
Διατήρηση	0	0	0	24
Μεταφορά	2	2	8	8
<b>Σύνολο</b>	11	46	28	<b>76</b>

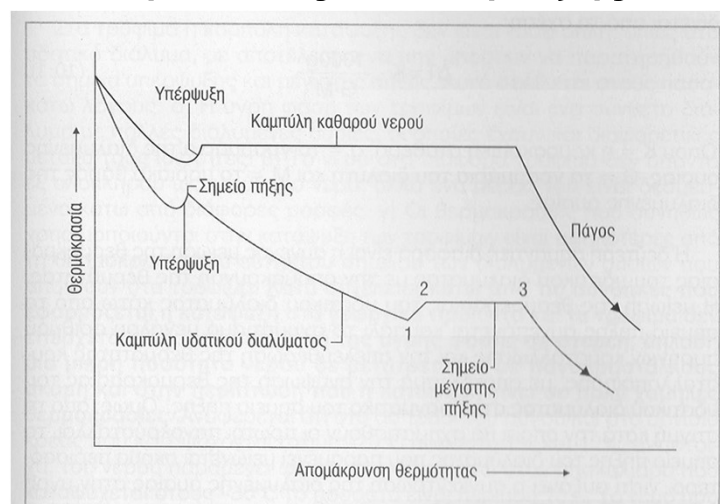
## Επίδραση κατάψυξης σε μικροοργανισμούς και ένζυμα

- Καταστροφή μικροοργανισμών κυρίως στην κρίσιμη περιοχή θερμοκρασιών (0 έως -5°C)
- Αδρανοποίηση σε χαμηλότερες θερμοκρασίες όσων επιζούν καθώς και των σπορίων τους
- Μικροοργανισμοί όπως η *L. monocytogenes* δεν καταστρέφονται.
- Σε θερμοκρασίες κάτω των -18° C αδρανοποιείται το σύνολο των μικροοργανισμών
- Τα ένζυμα δεν καταστρέφονται αλλά επιβραδύνεται ο ρυθμός της δραστηριότητάς τους.

## Κρυσταλλοποίηση υγρής φάσης

- Σχηματισμός συστηματικά οργανωμένης στερεάς φάσης μέσα σε ένα διάλυμα. Η διαδικασία περιλαμβάνει δύο στάδια:
  - Το στάδιο του σχηματισμού των πυρήνων κρυστάλλωσης (θεωρία Gibbs-Thomson), και
  - Το στάδιο της ανάπτυξης των κρυστάλλων σε μέγεθος, σαν αποτέλεσμα της τελικής θερμοκρασίας, του ρυθμού απομάκρυνσης της θερμότητας αλλά και του είδους και του αριθμού των πυρήνων κρυστάλλωσης.

## Καμπύλες κατάψυξης



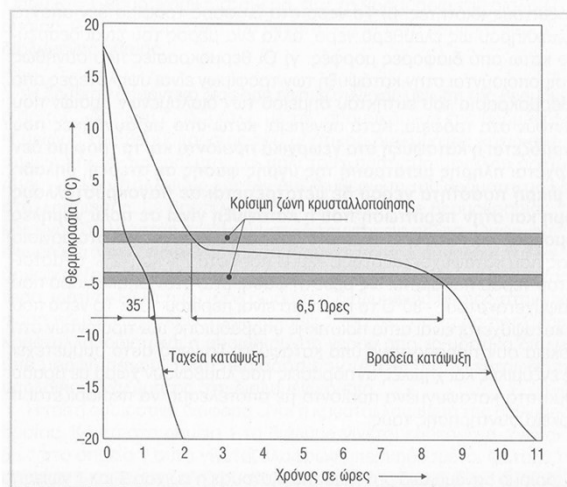
Σχήμα 10.2. Καμπύλες κατάψυξης καθαρού νερού και υδατικού διαλύματος (Leniger and Beverloo, 1975)

## Ψύξη τροφίμων και προϊόντων

- Η καμπύλη κατάψυξης των τροφίμων και των γεωργικών προϊόντων διαφέρει από την κλασική καμπύλη κατάψυξης του νερού ή των υδατικών διαλυμάτων. Κατά συνέπεια μέρος του νερού των τροφίμων στις συνθήκες κατάψυξης που εφαρμόζονται παραμένει σε υγρή μορφή. Το τμήμα αυτό του νερού είναι υπεύθυνο για την ποιοτική υποβάθμιση του τροφίμου. Αιτίες είναι:
  - Η φύση των τροφίμων (σύνθετη υγρή φάση)
  - Οι μορφές του νερού στα τρόφιμα
  - Οι θερμοκρασίες κατάψυξης που χρησιμοποιούνται

## Ταχύτητα κατάψυξης

- Ο ρυθμός απομάκρυνσης της θερμότητας από το προϊόν.
- Διακρίνεται σε ταχεία και βραδεία κατάψυξη ανάλογα τον χρόνο που χρειάζεται για να διέλθει η θερμοκρασία από την κρίσιμη ζώνη κρυσταλλοποίησης (min)
- Χρησιμοποιείται και ο ρυθμός απομάκρυνσης της θερμότητας στην περιοχή 0,  $-20^{\circ}\text{C}$  ( $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ )
- Άλλη προσέγγιση αποτελεί η μέση γραμμική ταχύτητα του μετώπου κατάψυξης ( $\text{cm}/\text{h}$ )



Σχήμα 10.3. Κρίσιμη ζώνη κρυσταλλοποίησης (Leniger and Beverloo, 1975)

Πίνακας 10.2

Ταχύτητα κατάψυξης που ενδείκνυται για διάφορα τρόφιμα (Brennan και συν., 1990)

Προϊόν	Ταχύτητα κατάψυξης (°C/min)
1. Προϊόντα με υψηλή περιεκτικότητα σε ξερή ουσία, όπως τα μπιζέλια, το κρέας με μεγάλη περιεκτικότητα σε λίπος, τα έτοιμα για κατανάλωση φαγητά κ.ά.	Καμία επίδραση στην ποιότητα
2. Άπαχο κρέας, ψάρια και αμυλούχα τρόφιμα έτοιμα για κατανάλωση	>0.5 έως 1
3. Φράουλες, καρότα, φασόλια και άλλα φρούτα και λαχανικά	>3 έως 6
4. Προϊόντα με πολύ χαμηλή περιεκτικότητα σε ξερή ουσία, όπως οι τομάτες, τα αγγούρια κ.ά.	Μεγαλύτερες ταχύτητες

Πίνακας 10.3

Μέση γραμμική ταχύτητα κατάψυξης τροφίμων

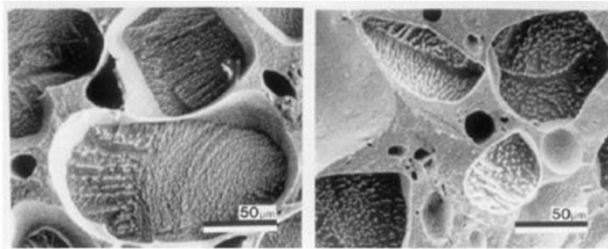
Είδος κατάψυξης	Μέση γραμμική ταχύτητα (cm/h)
Βραδεία κατάψυξη	<1
Ταχεία κατάψυξη	1-5
Υπερταχεία κατάψυξη	>5

## Παράγοντες ταχύτητας κατάψυξης

- Η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ του προϊόντος και του μέσου κατάψυξης
  - Ο τρόπος μετάδοσης της θερμότητας στο προϊόν και μέσα στην μάζα του
  - Η φύση, το μέγεθος και το σχήμα του μέσου συσκευασίας του προϊόντος
  - Το μέγεθος, το σχήμα και οι θερμικές ιδιότητες του προϊόντος
- ⇒ Οι παράγοντες αυτοί είναι κρίσιμοι διότι επηρεάζουν το μέγεθος των παγοκρυστάλλων που θα σχηματισθούν.

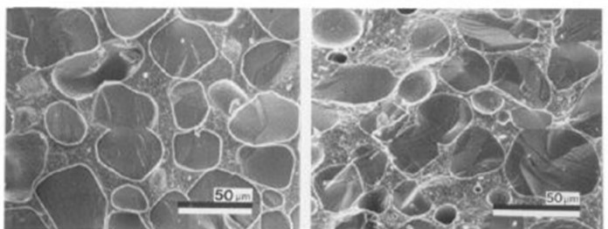
## Γενικές μεταβολές κατά την κατάψυξη

- Αύξηση του όγκου του τροφίμου, από την αύξηση του όγκου του νερού >9%.
- Αύξηση της συγκέντρωσης των αλάτων και των άλλων ουσιών που υπάρχουν διαλυμένες στο νερό.
- Μετουσίωση πρωτεϊνών (ανάλογα και με την ταχύτητα κατάψυξης)
- Αφυδάτωση προϊόντος (ανάλογα και με την ταχύτητα κατάψυξης)
- Διάρρηξη κυττάρων (ανάλογα και με την ταχύτητα κατάψυξης)
- Δευτερογενείς μεταβολές εξαιτίας των παραπάνω:
  - Μεταβολή του pH
  - Μεταβολές στην ολική οξύτητα
  - Μεταβολή του ιξώδους
  - Μεταβολή στο χρώμα



### Βραδεία Κατάψυξη

Μεγάλοι παγοκρύσταλλοι  
Διάρρηξη κυττάρων  
Συρρίκνωση υγρασίας



### Ταχεία Κατάψυξη

Μικροί και σε μεγάλο  
αριθμό παγοκρύσταλλοι  
Ομοιόμορφη κατανομή  
υγρασίας  
Διατήρηση κυτταρικής  
συνοχής

## Προκαταρκτικές εργασίες κατάψυξης

- Συγκομιδή στο κατάλληλο στάδιο ωρίμανσης
- Ζεμάτισμα
- Βύθιση σε διαλύματα (ασκορβικό, διαλύματα σακχάρων και ασβεστίου)
- Σχηματισμός επίπαγου όπου απαιτείται (πχ αλιεύματα)
- Προσθήκη πυρήνων κρυστάλλωσης
- Προσθήκη αντιψυκτικών πρωτεϊνών ή
- Εφαρμογή κρυστοπροστατευτικών ουσιών (δεξτρόζη, σακχαρόζη/σορβιτόλη, φωσφορικών αλάτων)

## Μέθοδοι κατάψυξης

- Σε ρεύμα ψυχρού αέρα
  - Καταψύκτες διακεκομμένης και
  - Συνεχούς λειτουργίας
    - Σήραγγες κατάψυξης (με ιμάντες, σπειροειδής)
    - Καταψύκτες ρευστοποιημένου στρώματος
- Δια επαφής με ψυχρή επιφάνεια
  - Οριζόντιες επιφάνειες
  - Κατακόρυφες επιφάνειες
- Με εμπάπτιση σε ψυχρά υγρά
  - Προπυλενογλυκόλη, γλυκερόλη, NaCl, CaCl<sub>2</sub>
- Κατάψυξη με κρυογενή μέσα



## Υπολογισμός χρόνου κατάψυξης

- Νοείται ο χρόνος που απαιτείται για την κρυσταλλοποίηση της υγρής φάσης του τροφίμου.
- Στην βιομηχανία σημασία έχει ο χρόνος που το τρόφιμο θα παραμείνει στον καταψύκτη ώστε η θερμοκρασία του να πέσει κάτω από τους  $-18^{\circ}\text{C}$ .
- Εκτιμάται από γενική εξίσωση του Plank

$$t_f = \frac{\rho \cdot \lambda}{T_f - T_M} \cdot \left[ \frac{PL}{h} + \frac{RL^2}{k} \right]$$

- Και εξαρτάται από:
  - Το μέγεθος και το σχήμα του προϊόντος
  - Διαφορά θερμοκρασίας τροφίμου-μέσου ψύξης
  - Τον συντελεστή επιφανειακής μεταφοράς θερμότητας (h)
  - Την θερμική αγωγιμότητα (K)

## Επιλογή και εκτίμηση παραμέτρων κατάψυξης

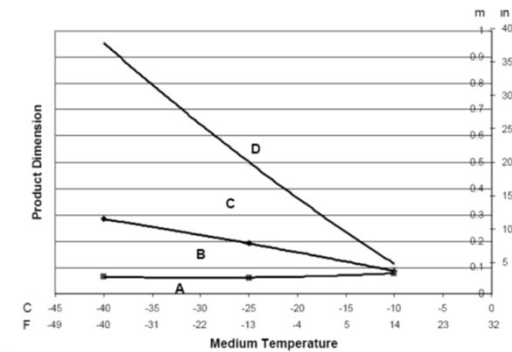
- Στις περισσότερες περιπτώσεις στην βιομηχανία τροφίμων η βέλτιστη ψύξη επιτυγχάνεται με την εφαρμογή ψυχρού ρεύματος αέρα. Οι βασικές παράμετροι που πρέπει να εκτιμηθούν είναι:
  1. Το μέγεθος του προϊόντος
  2. Η θερμοκρασία του μέσου ψύξης
  3. Ο συντελεστής επιφανειακής μεταφοράς (απαγωγής) θερμότητας, ο οποίος είναι ανάλογος με την ταχύτητα του αέρα πάνω από το προϊόν.
  - Η αρχική θερμοκρασία του προϊόντος έχει σχετικά μικρή επίδραση στο τελικό μέγεθος των παγοκρυστάλλων που θα σχηματισθούν.

## Μέγεθος προϊόντος

- Ξαν μέγεθος του προϊόντος ορίζεται η μικρότερη απόσταση από την επιφάνεια έως το γεωμετρικό του κέντρο (το μισό της πρωτογενούς διάστασης).
- Με την βοήθεια του παραπάνω μεγέθους μπορούμε να εκτιμήσουμε από ειδικά διαγράμματα (Heldman, 2003) την «περιοχή» κατάψυξης η οποία με την σειρά της μας οδηγεί στην εκτίμηση του συντελεστή επιφανειακής μεταφοράς θερμότητας (h ή SHT).

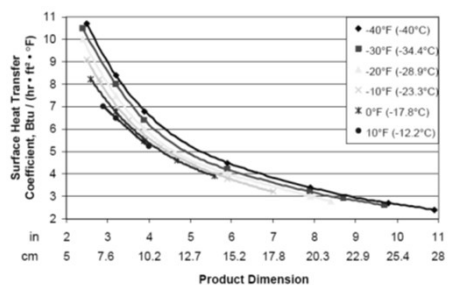
Περιοχές όπου οι βέλτιστες συνθήκες ψύξης μπορούν να εκτιμηθούν:

- Περιοχή A (μικρό μέγεθος προϊόντος με μικρή τελική διάσταση των παγοκρυστάλλων)
- Περιοχή B (κρίσιμη περιοχή, εκτίμηση συντελεστή (h) από άλλο διάγραμμα)
- Περιοχή C (κρίσιμη περιοχή, όπως και παραπάνω)
- Περιοχή D (μεγάλο μέγεθος προϊόντος όπου η εκτίμηση είναι αδύνατη)

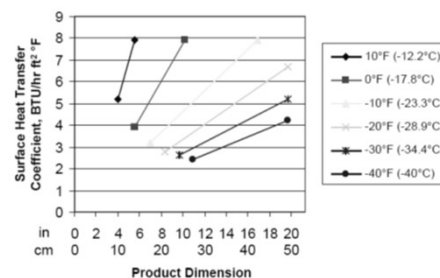


## Εκτίμηση συντελεστή επιφανειακής μεταφοράς θερμότητας (h, SHT)

- Η εκτίμηση του συντελεστή SHT, γίνεται με την βοήθεια κατάλληλων διαγραμμάτων λαμβάνοντας υπ' όψη τη θερμοκρασία του ψυκτικού μέσου (π.χ. αέρα).



Εκτίμηση συντελεστή SHT για περιοχή κατάψυξης B.



Εκτίμηση συντελεστή SHT για περιοχή κατάψυξης C.

## Μετατροπή σε ταχύτητα αέρα

- Η μετατροπή του SHT σε ταχύτητα ψυκτικού μέσου (ταχύτητα αέρα) γίνεται με την εφαρμογή μιας από τις δύο παρακάτω σχέσεις:

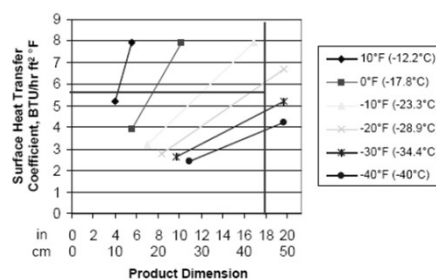
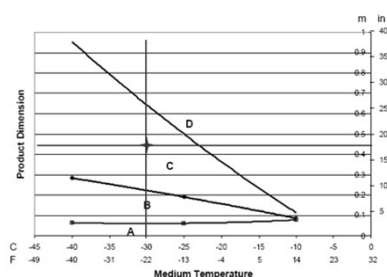
- $SHT > 4.5 \text{ BTU/h} \cdot \text{ft}^2 \cdot ^\circ\text{F}$  Τότε:  $u = 2 \cdot SHT^{1.25}$

- $SHT < 4.5 \text{ BTU/h} \cdot \text{ft}^2 \cdot ^\circ\text{F}$  Τότε:  $u = 4.76 \cdot (SHT - 1)$

Σημ:  $4.5 \text{ BTU/h} \cdot \text{ft}^2 \cdot ^\circ\text{F} = 25.6 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{K}$

## Παράδειγμα

- Εκτιμήστε την κατάλληλη ταχύτητα του ψυχρού αέρα ( $-30^\circ\text{C}$ ) για την βέλτιστη ψύξη προϊόντος σε παλέτα διαστάσεων 92 cm.



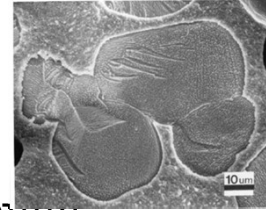
Βήμα 1° : Περιοχή κατάψυξης = C

Βήμα 2° :  $SHT \approx 5.9 \text{ BTU/h} \cdot \text{ft}^2 \cdot ^\circ\text{F}$

Βήμα 3° :  $u = 2 \cdot (5.9)^{1.25} = 18.4 \text{ ft/s} = 5.6 \text{ m/s}$

## Μεταβολές στα κατεψυγμένα τρόφιμα

- Επανακρυστάλλωση
  - Αλλαγές στο σχήμα, συνένωση, αύξηση μεγέθους
- Μετουσίωση πρωτεϊνών
- Οξειδωση λιπαρών ουσιών
- Αφυδάτωση λόγω εξάχνωσης
- Διάσπαση χρωστικών ουσιών
- Απώλεια βιταμινών
- Συνεχιζόμενη ενζυμική δραστηριότητα
- Σχηματισμός ανεπιθύμητων ενώσεων
  - Ακεταλδεΐδες και φορμαλδεΐδες



## Απόψυξη

- Γενικά, εξαιτίας των διαφορών στην θερμική αγωγιμότητα αλλά και την ταχύτητα διάχυσης της θερμότητας ανάμεσα στον πάγο και το νερό, η διεργασία της απόψυξης είναι βραδύτερη από αυτήν της κατάψυξης.
- Ο ρυθμός των μεταβολών της ποιοτικής υποβάθμισης είναι μεγαλύτερος κατά την απόψυξη.
- Μέριμνα πρέπει να λαμβάνεται κατά την απόψυξη των προϊόντων, η οποία μπορεί να γίνει (για βιομηχανική χρήση):
  - Με ρεύμα υγρού αέρα θερμοκρασίας 20° C
  - Με βύθιση σε νερό
  - Με εφαρμογή διηλεκτρικής θέρμανσης ή μικροκυμάτων
- Ο ασφαλέστερος τρόπος απόψυξης των τροφίμων σε οικιακό επίπεδο είναι εντός του ψυγείου (στην συντήρηση) ή με την χρήση μικροκυμάτων.