



# ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΤΡΟΦΙΜΩΝ

Πτώση σημείου πήξης  
Πορεία κατάψυξης  
Προσδιορισμός θερμοότητας κατάψυξης

~~~~

Άνοδος σημείου βρασμού  
Ιδιότητες ατμού  
Πίνακες ατμού



## Πτώση σημείου πήξης

- Το σημείο πήξης (ή τήξης) ενός διαλύματος είναι χαμηλότερο από εκείνο του καθαρού διαλύτη. Καθώς, δηλαδή, προσθέτουμε μια ουσία σ' ένα διάλυμα, το σημείο πήξης του χαμηλώνει διαρκώς μέχρι ενός ορίου (εύτηκτη θερμοκρασία ή εύτηκτες θερμοκρασίες για πολλές διαλυμένες ουσίες).
- Ένα γραμμάριο ουσίας διαλυμένο σε 1000g νερού υποβιβάζει το σημείο πήξης κατά 1,86°C ή 3,35 °F.
- Ανάλογα, η προσθήκη νερού σε διαλύματα αυξάνει το σημείο πήξης του διαλύματος. Η παρατήρηση έχει εφαρμογές στην νοθεία (πχ νερό στο γάλα).



Η μέση τιμή θερμοκρασίας για την πήξη του γάλακτος είναι οι  $-0,540^{\circ}\text{C}$  (ένδειξη 540 σε ειδικά όργανα μέτρησης)



| F.P. Reading | Percent Added Water | F.P. Reading | Percent Added Water | F.P. Reading | Percent Added Water |
|--------------|---------------------|--------------|---------------------|--------------|---------------------|
| 540          | 0.0                 | 518          | 4.1                 | 496          | 8.2                 |
| 539          | 0.2                 | 517          | 4.3                 | 495          | 8.3                 |
| 538          | 0.4                 | 516          | 4.4                 | 494          | 8.5                 |
| 537          | 0.6                 | 515          | 4.6                 | 493          | 8.7                 |
| 536          | 0.7                 | 514          | 4.8                 | 492          | 8.9                 |
| 535          | 0.9                 | 513          | 5.0                 | 491          | 9.1                 |
| 534          | 1.1                 | 512          | 5.2                 | 490          | 9.3                 |
| 533          | 1.3                 | 511          | 5.4                 | 489          | 9.4                 |
| 532          | 1.5                 | 510          | 5.6                 | 488          | 9.6                 |
| 531          | 1.7                 | 509          | 5.7                 | 487          | 9.8                 |
| 530          | 1.9                 | 508          | 5.9                 | 486          | 10.0                |
| 529          | 2.0                 | 507          | 6.1                 | 481          | 11.0                |
| 528          | 2.2                 | 506          | 6.3                 | 475          | 12.0                |
| 527          | 2.4                 | 505          | 6.5                 | 470          | 13.0                |
| 526          | 2.6                 | 504          | 6.7                 | 464          | 14.0                |
| 525          | 2.8                 | 503          | 6.9                 | 459          | 15.0                |
| 524          | 3.0                 | 502          | 7.0                 | 454          | 16.0                |
| 523          | 3.2                 | 501          | 7.2                 | 448          | 17.0                |
| 522          | 3.3                 | 500          | 7.4                 | 443          | 18.0                |
| 521          | 3.5                 | 499          | 7.6                 | 437          | 19.0                |
| 520          | 3.7                 | 498          | 7.8                 | 432          | 20.0                |
| 519          | 3.9                 | 497          | 8.0                 |              |                     |

Freezing Point vs Added Water for a Base of 540



## Ερώτημα

- Αφού η περιεκτικότητα σε νερό ή διαλυμένα συστατικά επηρεάζουν το σημείο πήξης ενός διαλύματος, δεν θα ήταν χρήσιμο να μπορούμε να υπολογίζουμε σημεία πήξης ή συγκεντρώσεις διαλυμένων συστατικών?



## Ταπείνωση Σημείου Πήξεως διαλύματος και περιεκτικότητα νερού

- Από την εξίσωση Clausius-Clapeyron προκύπτει η σχέση:

$$\ln X_A = \frac{\lambda}{Rg} \left( \frac{1}{T_{A0}} - \frac{1}{T_A} \right)$$

$X_A$  = γραμμομοριακό κλάσμα νερού στο διάλυμα

$\lambda$  = η λανθάνουσα θερμότητα πήξης του νερού σε J/gmol ή cal/gmol ή BTU/lbmol

$T_{A0}$  και  $T_A$  οι θερμοκρασίες πήξης του νερού και του διαλύματος σε °K ή °R ( $T_{A0} - T_A = \Delta T_f$  η πτώση της θερμοκρασίας πήξης)

$R_g$  η σταθερά των αερίων (1,98 BTU/lbmol°R)



## Παράδειγμα:

- Το σημείο πήξης σταφυλοχυμού με υγρασία 84,7% είναι 28,8°F. Να βρεθεί το φαινομενικό (ισοδύναμο) μοριακό βάρος των διαλυτών του στερεών.

Δίνονται:  $\lambda_{\text{νερού}} = 2592 \text{ BTU/lbmole}$ ,  $T_{A0} = 492^\circ\text{R}$  (32°F),  $T_A = 488,8^\circ\text{R}$  (28,8°F),  $R_g = 1,98 \text{ BTU/lbmol}^\circ\text{R}$

- Φαινομενικό ή Ισοδύναμο μοριακό βάρος είναι το μοριακό βάρος των διαλυμένων στερεών που θα προκαλέσουν πτώση του σημείου πήξης ισοδύναμη με αυτού μιας ουσίας με το ίδιο ΜΒ.

## Μεταβολή σημείου πήξης:

Η μεταβολή του σημείου πήξης για αραιά διαλύματα δίνεται από τον τύπο:

$$\Delta T_f = T_{A0} - T_A = \frac{Rg \cdot T_{A0}^2 \cdot m}{\lambda \cdot 1000} = k_f m$$

$$k_f = \frac{Rg \cdot T_{A0}^2}{\lambda}$$

$K_f$  = κρυοσκοπική σταθερά (1.86°C/gmole) και  $m$  η μοριακότητα της διαλυτής ουσίας σε gmol/1000 g νερού

## Παράδειγμα

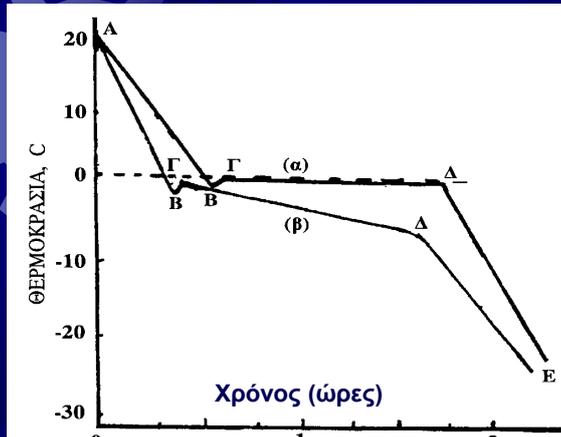
- Να προσδιοριστεί η θερμοκρασία εμφάνισης των πρώτων παγοκρυστάλλων σε μείγμα παγωτού με την ακόλουθη σύσταση: 10% λίπος, 15% ζάχαρη, 0,22% σταθεροποιητής και 12% στερεά άνευ λίπους που περιλαμβάνουν λακτόζη σε ποσοστό 54,5% κ.β.

Δίνονται:  $Rg = 8,31 \text{ J/gmol}^\circ\text{K}$ ,  $\lambda = 333,4 \text{ J/g}$

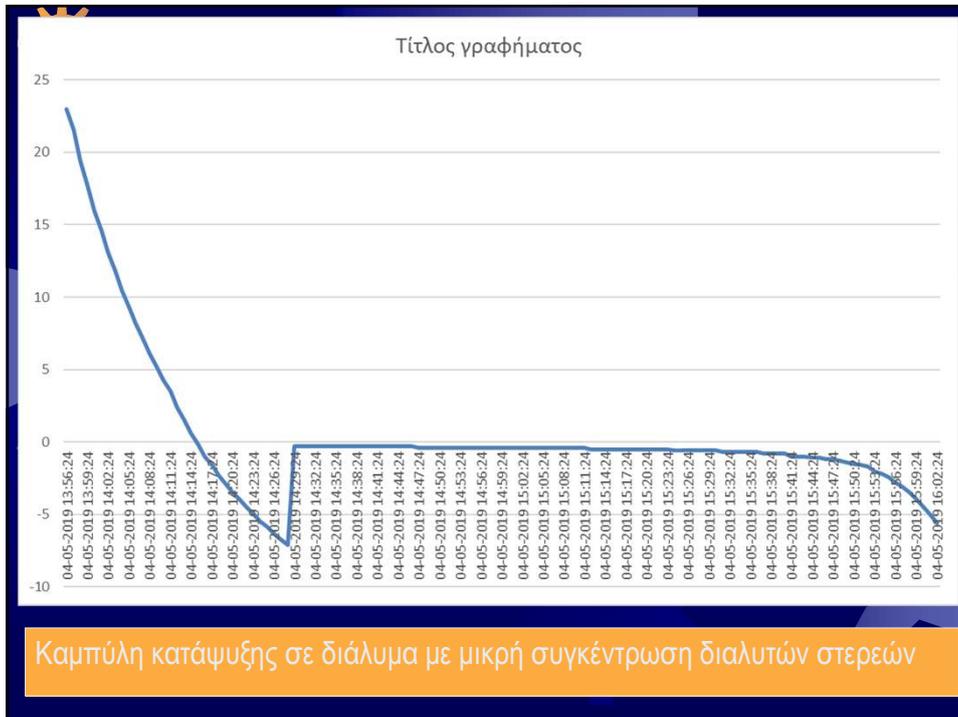
$k_f = 1,86^\circ\text{K/gmole}$

$MB_{(\text{λακτόζης, σακχαρόζης})} = 342$

## Θερμοκρασιακές μεταβολές κατά την κατάψυξη νερού (α) και υδατικού διαλύματος (β)



- AB = αφαίρεση αισθητής Τ
- B= σημείο υπέρψυξης
- ΒΓ = απελευθέρωση λανθάνουσας θερμότητας
- Γ = Φαινομενικό σημείο έναρξης κατάψυξης
- ΓΔ= αφαίρεση όλης της λανθάνουσας (Τ)
- ΔΕ = μείωση Τ του πάγου
- Δ = εύτηκτο σημείο
- Ε= τελικό σημείο κατάψυξης



## Ενδεικτικές Θερμοκρασίες έναρξης της πήξης σε τρόφιμα

- Λαχανικά (19 είδη) -0,8 έως -2,8° C
- Φρούτα (22 είδη) -0,9 έως -2,7
- Φρέσκο κρέας -1,7 έως -2,2
- Γάλα, αυγά -0,5

## Προσδιορισμός Θερμότητας κατάψυξης

- Ο προσδιορισμός της θερμότητας κατάψυξης ή της θερμότητας απόψυξης είναι εξαιρετικά δύσκολος γιατί έχουμε συνεχή αλλαγή της θερμοχωρητικότητας του προϊόντος εξαιτίας της μεταβολής της σύστασης της υγρής και στερεής φάσης (νερού/πάγου).
- Προσεγγιστικά, για την εκτίμηση της θερμότητας κατάψυξης, μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε την μέθοδο των Chang & Tso με την χρήση της ενθαλπίας.

## Ενθαλπία

- Η ποσότητα της ενέργειας (με την μορφή θερμότητας) που περιέχεται στην μονάδα βάρους του σώματος και σε συγκεκριμένη θερμοκρασία και πίεση. Δίνεται σε kJ/kg ή cal/g ή BTU/lbm και εκτιμάται πάντα σε σχέση με μία τιμή βάσης.
- Συνηθέστερα σαν βάση, λαμβάνεται η θερμοκρασία των  $-45,5^{\circ}\text{C}$  (ή  $226,7^{\circ}\text{K}$ ) όπου θεωρούμε ότι το σύνολο του νερού έχει κρυσταλλωθεί (σε άλλους πίνακες η βάση εκτίμησης είναι οι  $0^{\circ}\text{C}$ ).
- Τιμές της ενθαλπίας βρίσκουμε σε δημοσιευμένους πίνακες.

## Μέθοδος Chang & Tao

- Η θερμότητα κατάψυξης προσδιορίζεται από τη διαφορά ανάμεσα στις ενθαλπίες του προϊόντος στην αρχή και το τέλος της κατάψυξης ( $H_f - H$ ) με εμπειρικές εξισώσεις:

$$H_f = 9792,46 + 405,096 \cdot X_N$$

$$H = H_f [aT_r + (1-a)T_r^b]$$

- $a$  και  $b$  είναι σταθερές που εξαρτώνται από την υγρασία και λαμβάνουν διαφορετικές τιμές για φρούτα, λαχανικά, χυμούς κρέατα κ.λ.π

Π.χ. για φρούτα, λαχανικά και χυμούς:

$$a = 0,362 + 0,0498(X_N - 0,73) - 3,465(X_N - 0,73)^2$$

$$b = 22,95 + 54,68(a - 0,28) - 5,589(a - 0,28)^2$$

- $T_r = (T - 227,6) / (T_f - 227,6)$



## Ποσότητα νερού σε κατεψυγμένο προϊόν.

- Συχνά θέλουμε να ξέρουμε κατά πόσο στη θερμοκρασία που βρισκόμαστε έχει καταψυχθεί όλο το νερό του τροφίμου. Το κλάσμα βάρους του πάγου μπορεί να προσδιορισθεί από την σχέση (αντίστοιχη με την προηγούμενη):

$$H_f - H = w \cdot C_{ps} (T_f - T) + (1-w) \{ x[\lambda + C_{pi} (T_f - T)] + (1-x)(T_f - T) \}$$

όπου:

w και x, κλάσματα βάρους στερεών και πάγου,  $C_{ps}$  και  $C_{pi}$  οι ειδικές θερμότητες στερεών και πάγου σε  $J/kg^\circ K$  και  $\lambda$  η λανθάνουσα θερμότητα τήξης του νερού στους  $273^\circ K$  ( $333400 J/kg$ )



## Άνοδος σημείου βρασμού

- Το σημείο βρασμού αυξάνεται με την προσθήκη ουσίας σε ένα διάλυμα ή με την αφαίρεση διαλύτη από το διάλυμα. Το γεγονός αυτό έχει μεγάλη σημασία κατά την συμπύκνωση τροφίμων με εξάτμιση.
- Η άνοδος του σημείου βρασμού είναι ανάλογη της συγκέντρωσης της διαλυμένης ουσίας και αντιστρόφως ανάλογη του μοριακού της βάρους.
- Επιπλέον, εξαρτάται και από την πίεση.



## Μεταβολές σημείου βρασμού

### ☀ Με την σύσταση:

$\Delta T_B = K_b \cdot m$ , όπου  $K_b$  η μοριακή σταθερά σημείου βρασμού σε  $^{\circ}\text{C}/\text{gmol}$  ή  $^{\circ}\text{F}/\text{lbmol}$  ( $0,51^{\circ}\text{C}/\text{gmole}$  για αραιά διαλύματα) και  $m$  η μοριακότητα.

### ☀ Με την σύσταση και την πίεση:

$\Sigma \Delta T_B = K_b \cdot m + \rho h / g_c$ , όπου  $\rho, h, g$  η πυκνότητα, το ύψος στήλης υγρού και η επιτάχυνση της βαρύτητας. Η  $g_c$  είναι η σταθερά μετατροπής που στο S.I. είναι 1.



## Ιδιότητες Ατμού

Στην βιομηχανία τροφίμων το νερό και ο ατμός είναι τα περισσότερο χρησιμοποιούμενα μέσα μεταφοράς θερμότητας (εκτός των άλλων χρήσεων).

Σε θερμοκρασίες από το σημείο πήξης και πάνω, το νερό μπορεί να βρεθεί σε μια από τις παρακάτω μορφές:

- ☀ Κορεσμένο υγρό
- ☀ Μείγματα υγρού-υδρατμών
- ☀ Κορεσμένοι υδρατμοί
  - Υπέρθερμος ατμός (σε ανάλογους βαθμούς υπερθέρμανσης)



## Πίνακες ατμού

- Οι πίνακες ατμού είναι πινακοποιημένες τιμές των ιδιοτήτων του κορεσμένου και υπέρθερμου ατμού.
- Οι πίνακες κορεσμένου ατμού περιέχουν τις τιμές θερμοκρασίας, απόλυτης πίεσης, ειδικού όγκου (το αντίστροφο της πυκνότητας) και ενθαλπίας.



## Χαρακτηριστικά ατμού

- Ειδικός όγκος: Το αντίστροφο της πυκνότητας. Ο όγκος που καταλαμβάνει η μονάδα βάρους του ατμού ή του νερού σε συγκεκριμένες συνθήκες.
- Ενθαλπία: Η ποσότητα ενέργειας (θερμότητας) που περιέχεται στην μονάδα βάρους του ατμού ή του νερού σε συγκεκριμένη θερμοκρασία και πίεση. Δίνεται σε kJ/kg ή cal/g ή BTU/lb. Σαν θερμοκρασία αναφοράς εδώ, λαμβάνονται οι 0°C.



## Παράδειγμα Πίνακα ατμού

**Πίνακας 9. Πίνακας Κορεσμένου Ατμού σε Μετρικές Μονάδες**

| Θερμοκρασία<br>(°C) | Απόλυτη Πίεση<br>(kPa) | Ενθαλπία         |                      |                  |
|---------------------|------------------------|------------------|----------------------|------------------|
|                     |                        | Κορεσμένου Υγρού | Εξάτμισης<br>(MJ/kg) | Κορεσμένου Ατμού |
| 0                   | 0.6108                 | -0.00004         | 2.5016               | 2.5016           |
| 2.5                 | 0.7314                 | 0.01049          | 2.4956               | 2.5061           |
| 5                   | 0.8724                 | 0.02100          | 2.4897               | 2.5108           |
| 7.5                 | 1.0365                 | 0.03151          | 2.4839               | 2.5153           |
| 10                  | 1.2270                 | 0.04204          | 2.4779               | 2.5200           |
| 12.5                | 1.4489                 | 0.05253          | 2.4720               | 2.5245           |

Θερμοκρασία βρασμού κάτω από την αντίστοιχη πίεση ή την τάση των ατμών του υγρού στην συγκεκριμένη θερμοκρασία

Η ενέργεια σε ένα kg φάσης του νερού ή η θερμότητα που πρέπει να προστεθεί ή να αφαιρεθεί για να υπάρξει μεταβολή της φάσης

Σε άλλους πίνακες ατμού μπορούμε να δούμε και τα υπόλοιπα στοιχεία όπως τον ειδικό όγκο κλπ.



## Παράδειγμα

- Πόση θερμότητα θα ληφθεί κατά την ψύξη ατμού από 122,5°C και απόλυτη πίεση 214,83 kPa στους 120°C στην ίδια πίεση;

Δίνεται ο σχετικός πίνακας ατμών.

**Πίνακας 9. Πίνακας Κορεσμένου Ατμού σε Μετρικές Μονάδες**

| Θερμοκρασία<br>(°C) | Απόλυτη Πίεση<br>(kPa) | Ενθαλπία         |                      |                  |
|---------------------|------------------------|------------------|----------------------|------------------|
|                     |                        | Κορεσμένου Υγρού | Εξάτμισης<br>(MJ/kg) | Κορεσμένου Ατμού |
| 112.5               | 135.8031               | 0.47190          | 2.22515              | 2.69705          |
| 115                 | 169.1284               | 0.48249          | 2.21615              | 2.69874          |
| 117.5               | 183.3574               | 0.49309          | 2.20929              | 2.70241          |
| 120                 | 198.5414               | 0.50372          | 2.20225              | 2.70607          |
| 122.5               | 214.8337               | 0.51434          | 2.19519              | 2.70949          |
| 125                 | 232.1809               | 0.52499          | 2.18807              | 2.71311          |
| 127.5               | 250.6391               | 0.53565          | 2.18083              | 2.71651          |
| 130                 | 270.2538               | 0.54631          | 2.17365              | 2.71991          |

**Πίνακας 9. Πίνακας Κορεσμένου Ατμού σε Μετρικές Μονάδες**

| Θερμοκρασία<br>(°C) | Απόλυτη Πίεση<br>(kPa) | Ενθαλπία         |                      |                  |
|---------------------|------------------------|------------------|----------------------|------------------|
|                     |                        | Κορεσμένου Υγρού | Εξάτμισης<br>(MJ/kg) | Κορεσμένου Ατμού |
| 112.5               | 155.8051               | 0.47190          | 2.20225              | 2.67415          |
| 115                 | 169.1284               | 0.48249          | 2.21615              | 2.69874          |
| 117.5               | 183.3574               | 0.49309          | 2.20929              | 2.70241          |
| 120                 | 198.5414               | 0.50372          | 2.20225              | 2.70607          |
| 122.5               | 214.8337               | 0.51434          | 2.19519              | 2.70949          |
| 125                 | 232.1809               | 0.52499          | 2.18807              | 2.71311          |
| 127.5               | 250.6391               | 0.53565          | 2.18083              | 2.71651          |
| 130                 | 270.2538               | 0.54631          | 2.17365              | 2.71991          |

Από τον πίνακα (αν χρειάζεται, με παρεμβολή) προκύπτει ότι σε πίεση 214,83 kPa η θερμοκρασία βρασμού είναι 122,5°C. Άρα το νερό βρίσκεται σε μορφή κορεσμένων υδρατμών. Στους 120°C το νερό θα είναι στην μορφή κορεσμένου υγρού για την πίεση αυτή. Έστω ΔH1 η θερμότητα των υδρατμών στους 122,5°C και ΔH2 η θερμότητα κορεσμένων υδρατμών στους 120°C τότε η θερμότητα που μπορεί να ληφθεί από την ψύξη του ατμού από τους 122,5 στους 120°C υπό σταθερή πίεση είναι:

$$q = \Delta H1 - \Delta H2 = 2,70949 - 0,50372 = 2,20577 \text{ MJ/kg ατμού}$$

Ανάλογα:

Πως μπορεί να προσδιοριστεί η ενθαλπία ατμού 127,5°C ποιότητας 80%;

## Παράδειγμα:

- Πόση θερμότητα απαιτείται για να μετατρέψουμε 1 lbm νερού (70°F) σε ατμό πίεσης 14,696 psi και 250°F; (Ενθαλπία νερού στους 70° F = 38,05 BTU/lb<sub>m</sub>)

| Temp.<br>°F | 14.696 psi<br>$T_s = 212.00^\circ\text{F}$ |        |
|-------------|--------------------------------------------|--------|
|             | $v$                                        | $h$    |
| 250         | 28.42                                      | 1168.8 |
| 300         | 30.52                                      | 1192.6 |
| 350         | 32.60                                      | 1216.3 |
| 400         | 34.67                                      | 1239.9 |
| 450         | 36.72                                      | 1263.6 |
| 500         | 38.77                                      | 1287.4 |
| 600         | 42.86                                      | 1335.2 |

$v$  = ειδικός όγκος  
(ft<sup>3</sup>/lb<sub>m</sub>)

$h$  = ενθαλπία  
(BTU/lb<sub>m</sub>)

Πίνακας υπέρθερμου ατμού



## Άσκηση

- Τι συνεπάγεται για το σημείο βρασμού και τη λανθάνουσα θερμότητα εξάτμισης η αύξηση της ατμοσφαιρικής πίεσης πάνω από νερό που βράζει?
- Πόση θερμότητα απαιτείται για να μετατρέψουμε 1 lb νερού από τους 250°F σε ατμό πίεσης 14,696 psia και 300°F?