



Βασικές Διεργασίες Μηχανικής Τροφίμων

Ενότητα 4:

Ψύξη - Κατάψυξη (2/3), 2ΔΩ

Τμήμα: Επιστήμης Τροφίμων και Διατροφής Του Ανθρώπου

Σταύρος Π. Γιαννιώτης, Καθηγητής Μηχανικής Τροφίμων



Ευρωπαϊκή Ένωση
Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο



ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ ΠΑΙΔΕΙΑΣ & ΘΡΗΣΚΕΥΜΑΤΩΝ, ΠΟΛΙΤΙΣΜΟΥ & ΑΘΛΗΤΙΣΜΟΥ
ΕΙΔΙΚΗ ΥΠΗΡΕΣΙΑ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ

Με τη συγχρηματοδότηση της Ελλάδας και της Ευρωπαϊκής Ένωσης



ΕΥΡΩΠΑΪΚΟ ΚΟΙΝΩΝΙΚΟ ΤΑΜΕΙΟ





Μαθησιακοί Στόχοι

- Συντελεστής απόδοσης και υπολογισμός του
- Χρήση του διάγραμμα Ενθαλπίας-Πίεσης
- Υπολογισμός του χρόνου κατάψυξης

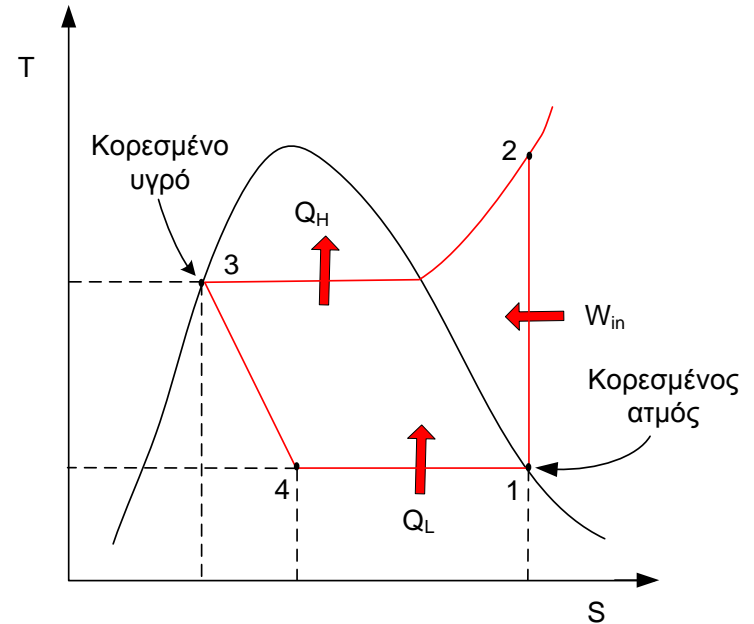
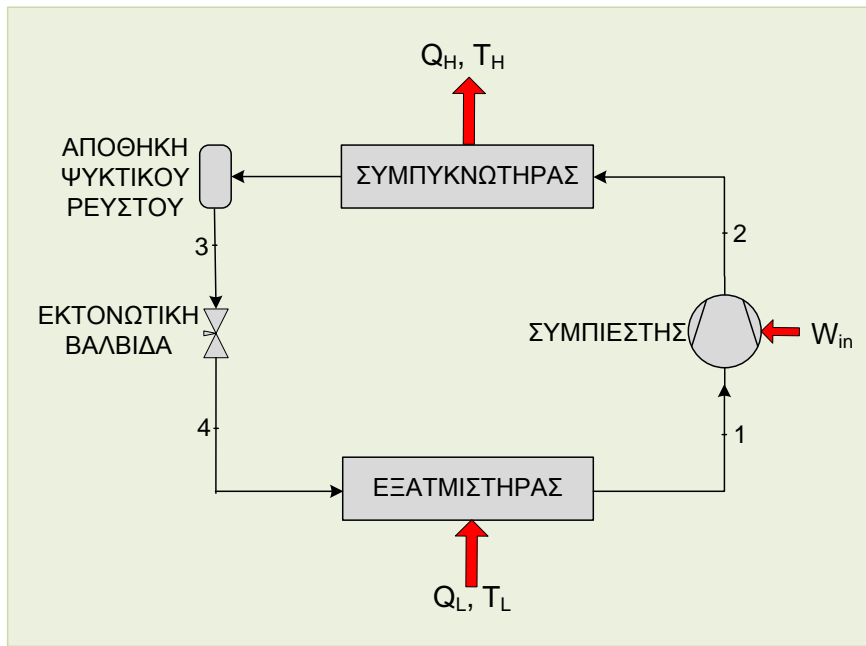


Λέξεις Κλειδιά

- Διάγραμμα Ενθαλπίας-Πίεσης
- Συντελεστής απόδοσης (COP, PF)
- Εξίσωση Plank

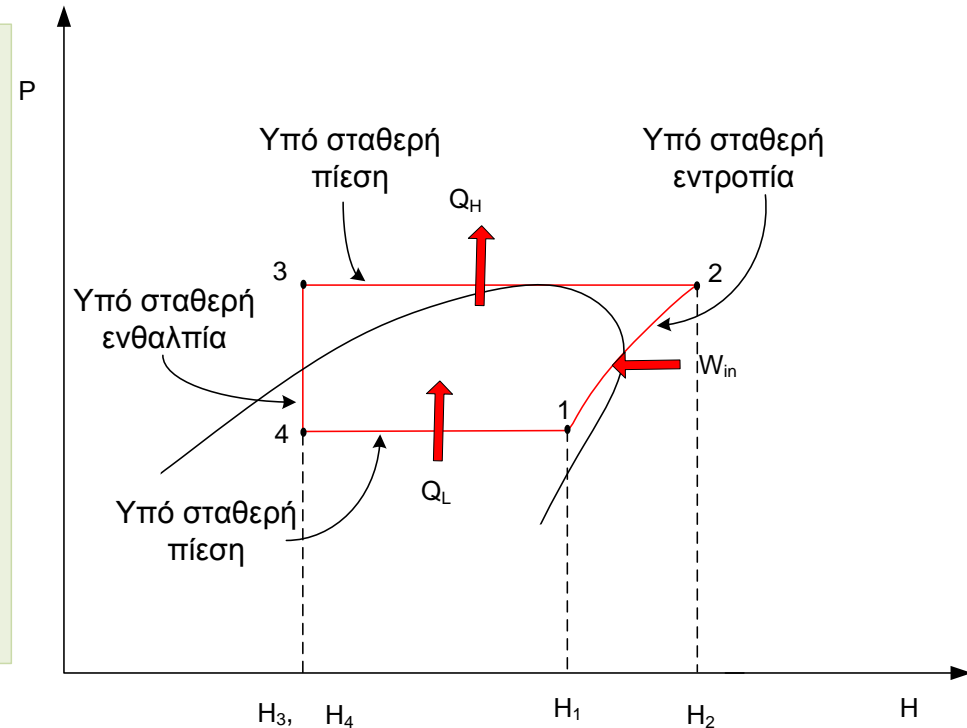
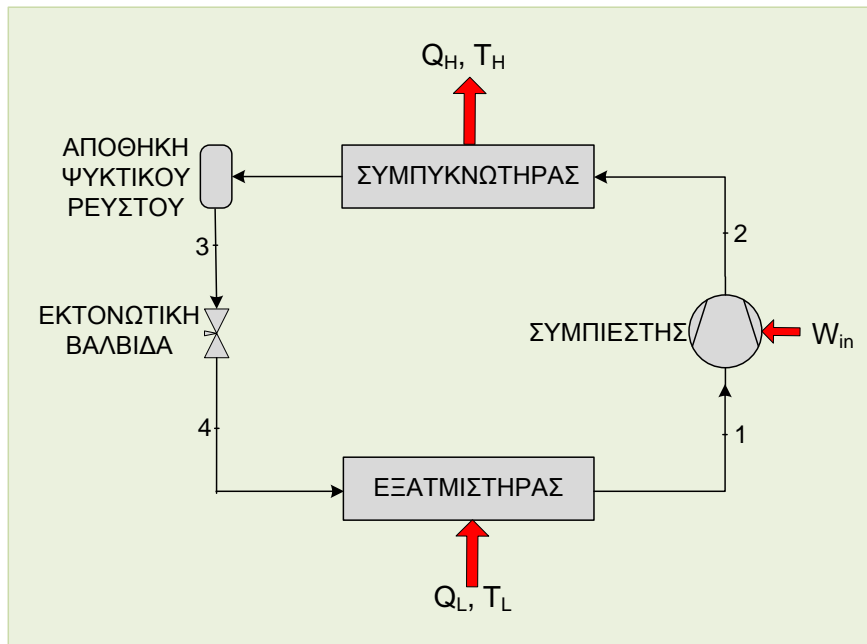


Διάγραμμα Θερμοκρασίας-Εντροπίας



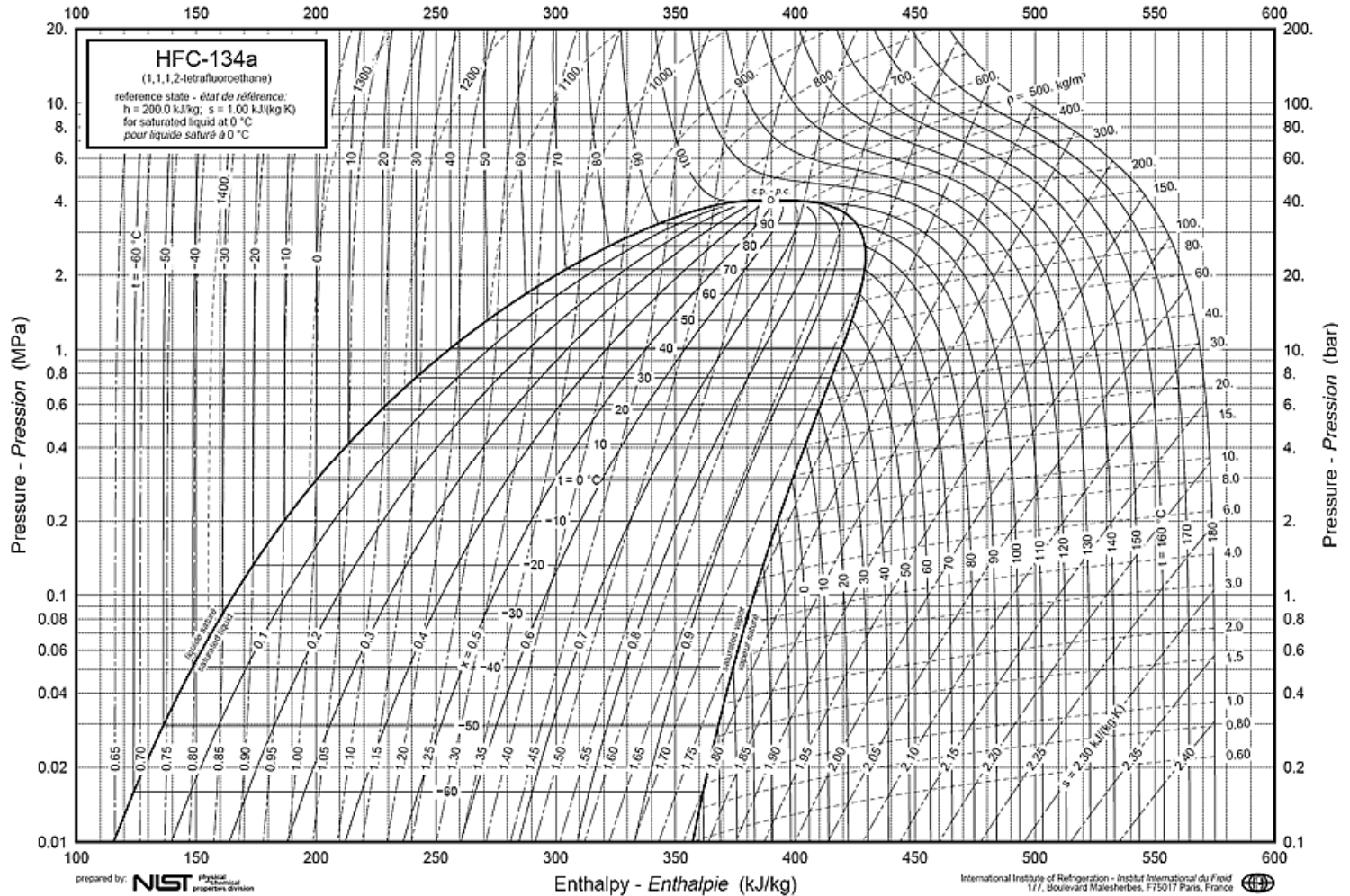


Διάγραμμα Πίεσης – Ενθαλπίας 1/2





Διάγραμμα Πίεσης-Ενθαλπίας 2/2





Συντελεστής Απόδοσης ^{1/3}

Συντελεστής απόδοσης COP (Coefficient Of Performance)

Ο συντελεστής απόδοσης μιας αντλίας θερμότητας που λειτουργεί με συμπίεση ατμών και χρησιμοποιείται για **ψύξη** ορίζεται ως το πηλίκο της θερμότητας που απορροφάται στον εξατμιστήρα προς την ενέργεια που καταναλώνεται για την κίνηση του συμπιεστή.

$$COP_{\Psi} = \frac{\text{ΨΥΚΤΙΚΟ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑ}}{\text{ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΣΤΟ ΣΥΜΠΙΕΣΤΗ}} = \frac{Q_L}{W_{in}}$$



Συντελεστής Απόδοσης ^{2/3}

Ο συντελεστής απόδοσης μιας αντλίας θερμότητας που λειτουργεί με συμπίεση ατμών και χρησιμοποιείται για **θέρμανση** ορίζεται ως το πηλίκο της θερμότητας που αποβάλλεται στον συμπυκνωτήρα προς την ενέργεια που καταναλώνεται για την κίνηση του συμπιεστή.

$$COP_{\ominus} = \frac{\text{ΘΕΡΜΙΚΟ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑ}}{\text{ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΣΤΟ ΣΥΜΠΙΕΣΤΗ}} = \frac{Q_H}{W_{in}}$$



Συντελεστής Απόδοσης ^{3/3}

Ο COP σε μια αντλία θερμότητας που λειτουργεί ως αντίστροφος ιδανικός κύκλος Carnot είναι:

1. COP ψύξης

$$COP_{\Psi} = \frac{T_L}{T_H - T_L}$$

2. COP θέρμανσης

$$COP_{\Theta} = \frac{T_H}{T_H - T_L}$$

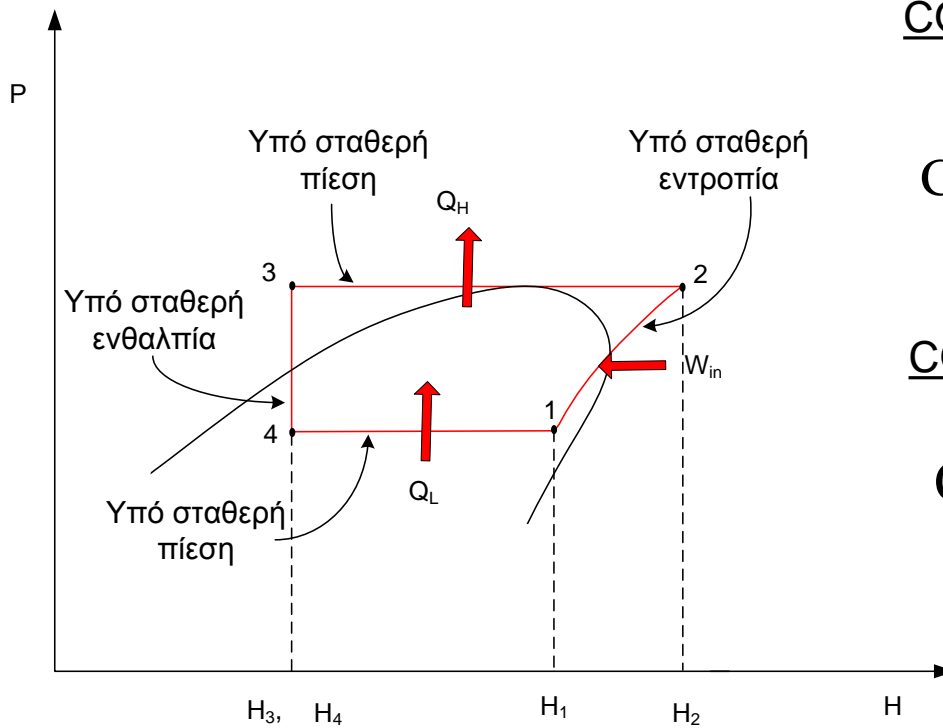
Παρατήρηση:

Όσο αυξάνεται η διαφορά $T_H - T_L$ τόσο μειώνεται η απόδοση της αντλίας θερμότητας



Υπολογισμός COP

Υπολογισμός του COP από το διάγραμμα Πίεσης-Ενθαλπίας



COP ψύξης

$$\text{COP} = \frac{Q_L}{W_{\text{in}}} = \frac{m(H_1 - H_4)}{m(H_2 - H_1)} = \frac{H_1 - H_4}{H_2 - H_1}$$

COP θέρμανσης

$$\text{COP} = \frac{Q_H}{W_{\text{in}}} = \frac{m(H_2 - H_3)}{m(H_2 - H_1)} = \frac{H_2 - H_3}{H_2 - H_1}$$



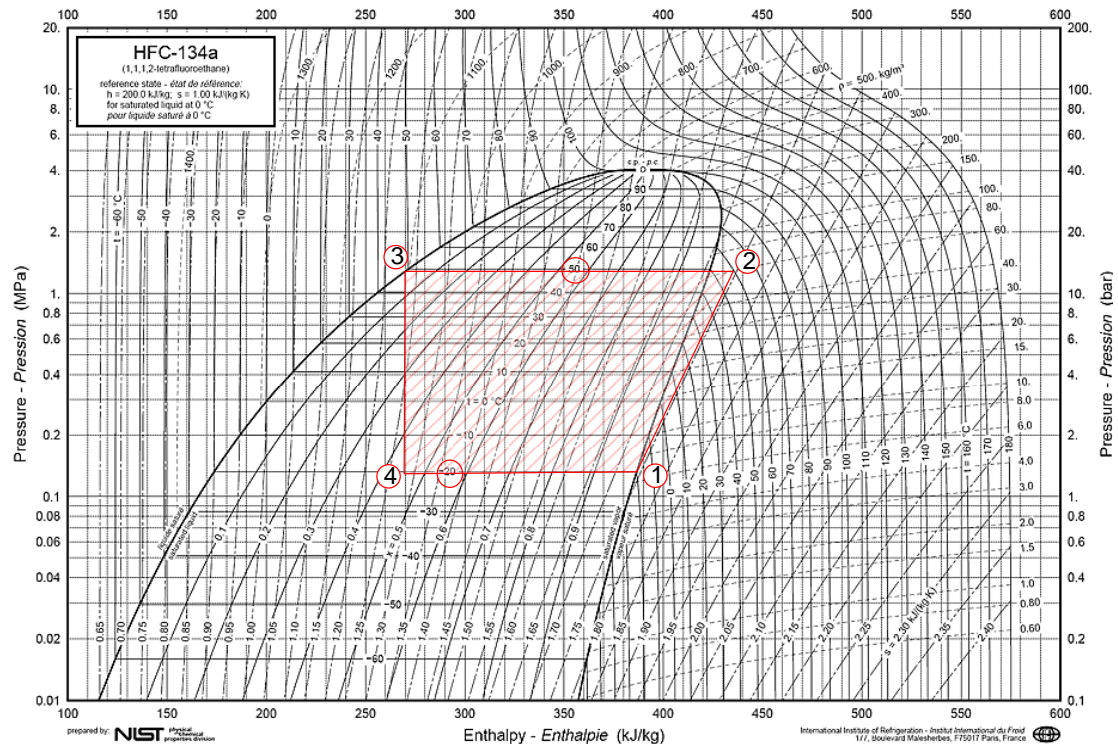
Συντελεστής Απόδοσης ^{1/3}

Παράδειγμα

Να υπολογιστεί ο COP ενός ψυκτικού συστήματος που λειτουργεί με HFC R-134A εάν ο εξατμιστήρας είναι στους -20°C και ο συμπυκνωτήρας στους 50°C .

Λύση

Από το διάγραμμα Πίεσης-Ενθαλπίας του R-134A ευρίσκουμε την ενθαλπία στα σημεία 1, 2 και 4 και αντικαθιστούμε τις τιμές στη εξίσωση του COP





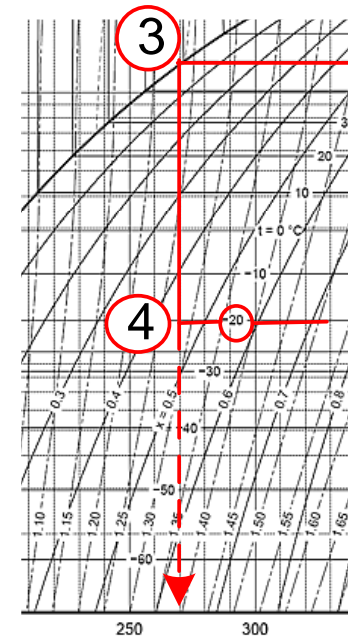
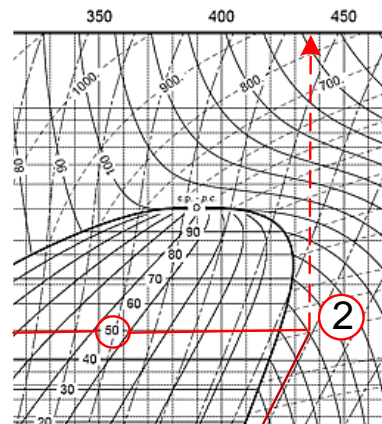
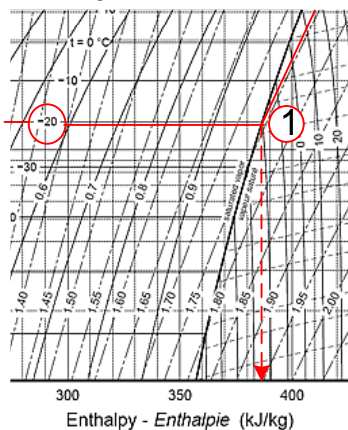
Συντελεστής Απόδοσης ^{2/3}

Ενθαλπία του ρευστού (αέριο) στο σημείο 1
μετά τον εξατμιστήρα (στους -20°C),
 $H_1=387 \text{ kJ/kg}$

Ενθαλπία του ρευστού (αέριο) στο σημείο 2
μετά το συμπιεστή (ισεντροπική
συμπύεση) (στους 50°C), $H_2=437 \text{ kJ/kg}$

Ενθαλπία του ρευστού στο σημείο 4 μετά την
εκτονωτική βαλβίδα, η οποία είναι ίση με
την ενθαλπία στο σημείο 3 (στους 50°C),
 $H_3=H_4= 270 \text{ kJ/kg}$

$$\text{COP} = \frac{Q_L}{W_{\text{in}}} = \frac{H_1 - H_4}{H_2 - H_1} = \frac{387 - 270}{437 - 387} = 2.34$$





Συντελεστής Απόδοσης ^{3/3}

Ένας άλλος τρόπος ορισμού του συντελεστής απόδοσης ενός ψυκτικού συστήματος που λειτουργεί με συμπίεση ατμών ορίζεται ως το πηλίκο της ισχύος του συμπιεστή (σε HP) προς την ψυκτική ισχύ που παρέχει (σε τόνους ψύξης). Στην περίπτωση αυτή ονομάζεται **Performance Factor (PF)**

$$PF = \frac{\text{ΙΣΧΥΣ ΣΤΟ ΣΥΜΠΙΕΣΤΗ (HP)}}{\text{ΨΥΚΤΙΚΗ ΙΣΧΥΣ (TR)}}$$

Σημείωση

1 TR (Tons of Refrigeration) = ρυθμός απομάκρυνσης θερμότητας απαραίτητος για να παγώσουν 2000 lb (1 short ton) νερού στους 0°C σε 24 ώρες=12000 Btu/h=3.5 kW



Χρόνος Κατάψυξης ^{1/5}

Ο ρυθμός κατάψυξης εξαρτάται από:

- Σύνθεση τροφίμου
- Φυσικές ιδιότητες του τροφίμου
- Διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ τροφίμου και χώρου
- Μέγεθος τροφίμου (σχέση όγκου-επιφάνειας)
- Συσκευασία
- Μέθοδος κατάψυξης (ταχύτητα αέρα κλπ)



Χρόνος Κατάψυξης ^{2/5}

Εξίσωση Plank

$$t = \frac{\rho \lambda}{T_{if} - T_m} \left(\frac{P\alpha}{h} + \frac{R\alpha^2}{k_f} \right)$$

όπου:

t απαιτούμενος χρόνος κατάψυξης, s

ρ πυκνότητα του προϊόντος πριν παγώσει, kg/m^3

λ λανθάνουσα θερμότητα πήξεως του νερού, $333,2\text{J/kg}$ \times ποσοστό υγρασίας)

T_{if} αρχικό σημείο πήξεως του προϊόντος, $^{\circ}\text{C}$ ή K

T_m θερμοκρασία ψυκτικού μέσου, $^{\circ}\text{C}$ ή K

h συντελεστής μεταφοράς θερμότητας, $\text{W/m}^2\text{K}$

k_f συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας του καταψυγμένου προϊόντος, W/mK

α χαρακτηριστική διάσταση του προϊόντος, m

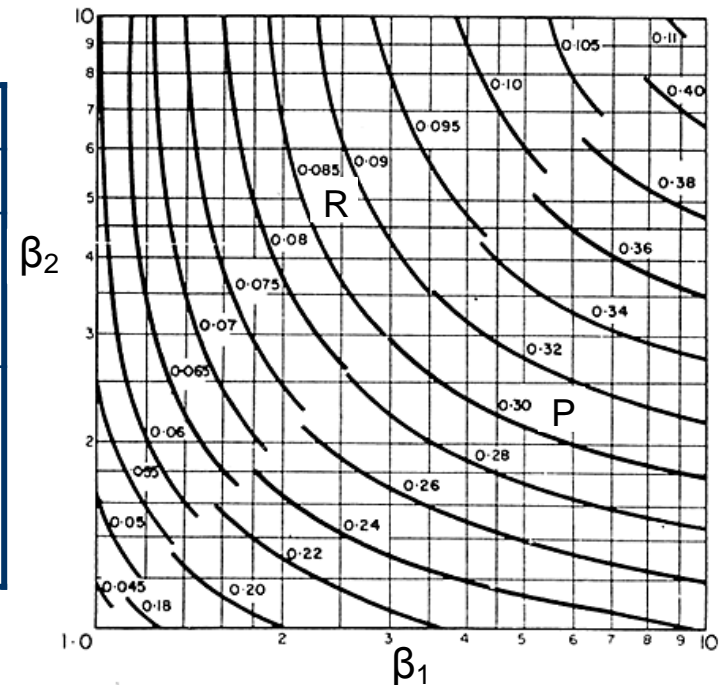
P, R σταθερές



Χρόνος Κατάψυξης ^{3/5}

Οι σταθερές P και R της εξίσωσης Plank δίνονται στον επόμενο πίνακα για πλάκα, κύλινδρο απείρου μήκους και σφαίρα. Για σώματα σε σχήμα παραλληλεπίπεδου δίνονται από το επόμενο διάγραμμα όπου β_1 και β_2 είναι ο λόγος των δύο μεγαλύτερων διαστάσεων του παραλληλεπίπεδου δια της μικρότερης διάστασης.

	P	R	α
Πλάκα	1/2	1/8	πάχος
Κύλινδρος απείρου μήκους	1/4	1/16	διάμετρος
Σφαίρα	1/6	1/24	διάμετρος





Χρόνος Κατάψυξης ^{4/5}

- Η εξίσωση Plank δίνει κατά προσέγγιση τον απαιτούμενο χρόνο κατάψυξης (τον υποεκτιμά) επειδή βασίζεται στις εξής απλουστευτικές υποθέσεις:
 1. το τρόφιμο ευρίσκεται από την αρχή στη θερμοκρασία του αρχικού σημείου πήξεως
 2. η κατάψυξη γίνεται αργά ώστε η μεταφορά θερμότητας να θεωρείται ότι γίνεται σε σταθερή κατάσταση
 3. όλο το νερό παγώνει στη θερμοκρασία του αρχικού σημείου πήξεως
 4. ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας κατά τη διάρκεια της κατάψυξης είναι σταθερός
- Έχουν γίνει βελτιώσεις στην εξίσωση Plank οι οποίες όμως κάνουν την λύση πιο πολύπλοκη.



Χρόνος Κατάψυξης ^{5/5}

Παράδειγμα

Ένα κομμάτι κιμάς διαστάσεων 5x10x15 cm τοποθετείται στον καταψύκτη σε θερμοκρασία -20°C. Να υπολογιστεί με την εξίσωση Plank ο απαιτούμενος χρόνος προκειμένου να παγώσει ο κιμάς, εάν η περιεχόμενη υγρασία του είναι 75%, η πυκνότητα του κιμά πριν παγώσει είναι 1050 kg/m³ και ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας του καταψυγμένου κιμά είναι 1.04 W/mK, το αρχικό σημείο πήξεως -1.5°C και ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας 20 W/m²K.

Λύση

Από το διάγραμμα των P και R για $\beta_1 = \frac{10}{5} = 2$ και $\beta_2 = \frac{15}{5} = 3$

ευρίσκουμε: P=0.27 και R=0.077

Αντικαθιστώντας στην εξίσωση του Plank έχουμε:

$$t = \frac{\rho \lambda}{T_{if} - T_m} \left(\frac{P\alpha}{h} + \frac{R\alpha^2}{k_f} \right) = \frac{1050 * (0.75 * 333570)}{271.5 - 253} \left(\frac{0.27 * 0.05}{20} + \frac{0.077 * 0.05^2}{1.04} \right) = 12213 \text{ s}$$



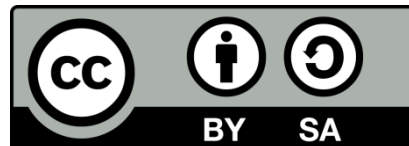
Βιβλιογραφία

- Σ. Γιαννιώτη, Παραδόσεις Μηχανικής Τροφίμων
- S. Yanniotis, Solving Problems in Food Engineering, Springer
- P.R.Singh & D.R. Heldman, Introduction to Food Engineering, Academic Press



Άδειες Χρήσης

- Το παρόν εκπαιδευτικό υλικό υπόκειται σε άδειες χρήσης Creative Commons.
- Για εκπαιδευτικό υλικό, όπως εικόνες, που υπόκειται σε άλλου τύπου άδεια χρήσης, η άδεια χρήσης αναφέρεται ρητώς.





Χρηματοδότηση

- Το παρόν εκπαιδευτικό υλικό έχει αναπτυχθεί στο πλαίσιο του εκπαιδευτικού έργου του διδάσκοντα.
- Το έργο «**Ανοικτά Ακαδημαϊκά Μαθήματα Γεωπονικού Πανεπιστημίου Αθηνών**» έχει χρηματοδοτήσει μόνο την αναδιαμόρφωση του εκπαιδευτικού υλικού.
- Το έργο υλοποιείται στο πλαίσιο του Επιχειρησιακού Προγράμματος «Εκπαίδευση και Δια Βίου Μάθηση» και συγχρηματοδοτείται από την Ευρωπαϊκή Ένωση (Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο) και από εθνικούς πόρους.





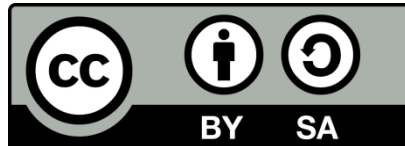
Σημείωμα Αναφοράς

Copyright Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθηνών, Τμήμα Επιστήμης Τροφίμων και Διατροφής του Ανθρώπου, Στάυρος Π. Γιαννιώτης. «Βασικές Διεργασίες Μηχανικής Τροφίμων». Έκδοση: 1.0. Αθήνα 2015. Διαθέσιμο από τη δικτυακή διεύθυνση:
<https://mediasrv.aua.gr/eclass/courses/OCDFSHN108/>



Σημείωμα Αδειοδότησης

Το παρόν υλικό διατίθεται με τους όρους της άδειας χρήσης Creative Commons Αναφορά, Παρόμοια Διανομή 4.0 [1] ή μεταγενέστερη, Διεθνής Έκδοση. Εξαιρούνται τα αυτοτελή έργα τρίτων, π.χ. φωτογραφίες, διαγράμματα κ.λ.π., τα οποία εμπεριέχονται σε αυτό και τα οποία αναφέρονται μαζί με τους όρους χρήσης τους στο «Σημείωμα Χρήσης Έργων Τρίτων».



Η άδεια αυτή ανήκει στις άδειες που ακολουθούν τις προδιαγραφές του Ορισμού Ανοικτής Γνώσης [2], είναι ανοικτό πολιτιστικό έργο [3] και για το λόγο αυτό αποτελεί ανοικτό περιεχόμενο [4].

[1] <http://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>

[2] <http://opendefinition.org/okd/ellinika/>

[3] <http://freedomdefined.org/Definition/EI>

[4] <http://opendefinition.org/buttons/>



Διατήρηση Σημειωμάτων

Οποιαδήποτε αναπαραγωγή ή διασκευή του υλικού θα πρέπει να συμπεριλαμβάνει:

- το Σημείωμα Αναφοράς
 - το Σημείωμα Αδειοδότησης
 - τη δήλωση Διατήρησης Σημειωμάτων
 - το Σημείωμα Χρήσης Έργων Τρίτων (εφόσον υπάρχει)
- μαζί με τους συνοδευόμενους υπερσυνδέσμους.