

Μηχανική Τροφίμων

Θερμικές Ιδιότητες Τροφίμων

Η έννοια του «τροφίμου»

- ✱ Στην μηχανική τροφίμων πολλές φορές χρησιμοποιούμε τον όρο τρόφιμο. Σε αντίθεση όμως με άλλα επιστημονικά πεδία της επιστήμης των τροφίμων, εδώ απλουστεύουμε τα τρόφιμα και τα θεωρούμε ως ένα άθροισμα μαζών από συστατικά που έχουν διαφορετικές φ/χ ιδιότητες.
- ✱ Η απλούστευση αυτή μας βολεύει στην μαθηματική μοντελοποίηση (βλ. ποσοτικοποίηση διεργασιών), αλλά απέχει άλλες φορές λίγο και άλλες φορές αρκετά από την πραγματική σύσταση.

Τι είναι οι Θερμικές ιδιότητες

- * Οι Θερμικές ιδιότητες είναι μαθηματικές ή εμπειρικές προσεγγίσεις που εκτιμούν την συμπεριφορά διαφόρων τροφίμων στην Θερμότητα, λαμβάνοντας υπόψη την σύσταση ή άλλα χαρακτηριστικά τους.
- * Απαντούν σε ερωτήσεις του τύπου:
 - * Πόσο εύκολα θερμαίνεται ή ψύχεται ένα τρόφιμο
 - * Πόσο γρήγορα μεταδίδει την Θερμότητα
 - * Τι ποσό ενέργειας απαιτείται για να αλλάξει φάση
 - * Πόσες Θερμίδες έχει μια ποσότητα τροφίμου
- * Τα ερωτήματα αυτά είναι σημαντικά?

Θερμικές ιδιότητες τροφίμων

Βασικά μεγέθη:

- * Ειδική Θερμότητα (C_p)
- * Θερμική αγωγιμότητα (k)
- * Θερμική διαχυτικότητα (α)
- * Αισθητή (Q_A) και Λανθάνουσα (Q_L) Θερμότητα

Ειδική Θερμότητα, C_p

- * Η ειδική Θερμότητα (specific heat) ενός προϊόντος είναι μέτρο της ποσότητας θερμαντικών μονάδων που απαιτούνται για την αλλαγή της θερμοκρασίας της μονάδας βάρους του κατά μία μονάδα, χωρίς αλλαγή της φάσης. Αν η αλλαγή συνοδεύεται και από αλλαγή της φάσης τότε μιλάμε για φαινομενική ειδική θερμότητα.
- * Μονάδα θερμότητας είναι το Joule στο SI, η θερμίδα (cal) στο CGS και το BTU στο FPS, όπου:
 $1 \text{ BTU} = 252 \text{ cal} = 0,252 \text{ kcal} = 1055 \text{ J} = 1,055 \text{ kJ}$
- * Μονάδα της ειδικής Θερμότητας είναι τα $\text{kJ/Kg}^\circ\text{K}$ ή $\text{cal/g}^\circ\text{C}$ ή $\text{BTU/lb}_m^\circ\text{F}$
- * Το νερό έχει $C_p = 1 \text{ cal/g}^\circ\text{C}$ (15°C) ή $0,42 \text{ kJ/Kg}^\circ\text{K}$
- * Στα τρόφιμα η C_p λαμβάνει τιμές κάτω από 1 ($\text{cal/g}^\circ\text{C}$).

Ιδιότητες της C_p

- * Είναι μεταβαλλόμενη και όχι σταθερή ιδιότητα και εξαρτάται από την πίεση, την θερμοκρασία και την σύσταση του προϊόντος.
Η C_p εξετάζεται πάντα κάτω από σταθερή πίεση (από εκεί και το p στο C_p) ή σταθερό όγκο στην περίπτωση των αερίων (C_v).
- * Όσο μεγαλύτερη είναι η ειδική θερμότητα ενός τροφίμου τόσο περισσότερη θερμότητα απαιτεί για θέρμανση (ή αποβάλλει για ψύξη) σε συγκεκριμένο επίπεδο θερμοκρασίας.
- * Αύξηση της θερμοκρασίας ενός στερεού ή υγρού προκαλεί αύξηση της C_p . Το αντίθετο συμβαίνει για τα αέρια και τους ατμούς.

Όσον αφορά την σύσταση:

- * Η C_p αυξάνεται και προσεγγίζει την C_p του νερού ($=1$) καθώς αυξάνεται η υγρασία του προϊόντος.
- * Για την εκτίμηση της C_p σε προϊόντα χωρίς λίπος που περιέχουν υγρασία $> 50\%$ και την ακριβή σύσταση δεν γνωρίζουμε, χρησιμοποιούμε την εμπειρική εξίσωση του Siebel (όπου τα στερεά έχουν ενιαία $C_p = 0,2 \text{ kcal/kg}^\circ\text{C}$):

$$C_p = 1,0_{\chi_N} + 0,2(1 - \chi_N) = 0,2 + 0,8\chi_N \text{ kcal/Kg}^\circ\text{C}$$

και για πάγο ($1/2 C_p$ νερού):

$$C_p = 0,5_{\chi_{\Pi}} + 0,2(1 - \chi_N) = 0,2 + 0,3\chi_{\Pi} \text{ kcal/Kg}^\circ\text{C}$$

όπου χ_N το κλάσμα βάρους του νερού (% υγρασία/100)

Παράδειγμα

- * Να προσδιοριστεί η ειδική θερμότητα του μήλου (Υγρασία $\approx 75\%$).

✱ Υπάρχει ένα σύνολο εμπειρικών εξισώσεων που χρησιμοποιούνται κατά περίπτωση:

- ✱ $C_p = 0,2 + 0,3_{\chi_{\text{NΠ}}} \text{ kcal/kg}^\circ\text{C}$, για κατεψυγμένα
- ✱ $C_p = 0,2 + 0,8_{\chi_{\text{N}}} + 0,3_{\chi_{\text{NΠ}}} \text{ kcal/kg}^\circ\text{C}$, για μερικώς κατεψυγμένα
- ✱ $C_p = 0,4_{\chi_{\text{ΛΣ}}} + 0,3_{\chi_{\text{Σ}}} + 1,0_{\chi_{\text{N}}} \text{ kcal/kg}^\circ\text{C}$, όταν λαμβάνεται υπόψη το λίπος ($\chi_{\text{ΛΣ}}$)

✱ Μια γενικής μορφής εξίσωση όπου λαμβάνονται υπόψη όλα τα κύρια συστατικά είναι η παρακάτω:

✱ $C_p = 0,34_{\chi_{\text{Υ}}} + 0,37_{\chi_{\text{Π}}} + 0,4_{\chi_{\text{ΛΣ}}} + 0,2_{\chi_{\text{Μ}}} + 1_{\chi_{\text{N}}}$

$\chi_{\text{Υ}}$ = κλάσμα βάρους υδατανθράκων

$\chi_{\text{Π}}$ = κλάσμα πρωτεϊνών

$\chi_{\text{ΛΣ}}$ = κλάσμα στερεού λίπους

$\chi_{\text{Μ}}$ = κλάσμα μεταλλικών στερεών (τέφρας)

Παράδειγμα:

- ✱ Να προσδιορισθεί η ειδική θερμότητα μιας παιδικής φρουτόκρεμας (μπανάνας) όταν φέρει την εξής σύσταση: 77,5% υγρασία, 0,4% πρωτεΐνες, 0,2% στερεό λίπος, 21,6% υδατάνθρακες.
- ✱ Εάν το λίπος βρίσκεται 60% σαν στερεό και 40% σε υγρή μορφή?
 C_p (ρευστού λίπους) = 0,5 Kcal/Kg $^\circ$ C

Όσον αφορά την Θερμοκρασία:

- * Για ακόμη μεγαλύτερη ακρίβεια (ποσοτικοποίηση διεργασιών!!), υπάρχουν στην βιβλιογραφία εξισώσεις οι οποίες δίνουν την ειδική θερμότητα ενός συστατικού (πρωτεϊνών, λίπους κλπ) σε συνάρτηση με την θερμοκρασία του προϊόντος.
- * Οι εξισώσεις αυτές μπορούν να αντικαταστήσουν τις σταθερές στην προηγούμενη εξίσωση. Μια από αυτές (π.χ. για τις πρωτεΐνες) είναι:

$$C_{py} = 1548,8 + 1,2625 \cdot T + 5,9399 \cdot T^2$$

Εναλλακτικά..

- * Η ειδική θερμότητα ενός «αγνώστου» τροφίμου μπορεί να εκτιμηθεί με βάση την μεταβολή της αισθητής θερμότητας από τον τύπο: $C_p = Q/m \cdot \Delta T$ όπου:
 - * Q, αισθητή θερμότητα (J)
 - * m, μάζα (g)
 - * ΔT , μεταβολή της θερμοκρασίας ($T_2 - T_1$)

Άσκηση..

- ✱ Να εκτιμηθεί η ειδική θερμότητα ενός σώματος (τροφίμου ?) άγνωστης σύστασης (100g) όταν απαιτούνται 1000 cal για την αύξηση της θερμοκρασίας του από τους 22 στους 52°C.

Πίνακας 6. Μέσες ειδικές θερμότητες αντιπροσωπευτικών τροφίμων

Τρόφιμο	Υγρασία %	Ειδική θερμότητα, BTU/lb°F
Σούπες	85 - 90	0,71 - 0,98
Ψάρια τηγανητά	60	0,72
Ψάρια φρέσκα	80	0,86
Ψάρια ξηραμένα, αλατισμένα	16 - 20	0,41 - 0,44
Λίπη		
Βούτυρο	14 - 15,5	0,49 - 0,51
Μαργαρίνη	9 - 15	0,42 - 0,50
Φυτικά λάδια	-	0,35 - 0,45
Γαλακτοκομικά		
Κρέμα 45-60% λίπος	57 - 73	0,73 - 0,78
Ολόπασχο γάλα αγελάδας	87,5	0,92
Αποβουτυρωμένο γάλα αγελάδας	91	0,96
Λαχανικά		
Αγγινάρες	90	0,93
Καρότα φρέσκα	86 - 90	0,91 - 0,95
Καρότα βρασμένα	92	0,90
Αγγούρια	97	0,98
Φασόες	12	0,44
Μανιτάρια φρέσκα	90	0,94
Μανιτάρια ξηρά	30	0,56
Κρεμμύδια	80 - 90	0,86 - 0,93
Μπιζέλια ξηρά	14	0,44
Πατάτες	75	0,81
Πατάτες βρασμένες	80	0,87
Σπανάκι	85 - 90	0,90 - 0,94
Λάχανο άσπρο, φρέσκο	90 - 92	0,98
Λάχανο άσπρο, βρασμένο	97	0,98
Φρούτα		
Μήλα	75 - 85	0,89 - 0,96
Φρούτα φρέσκα	75 - 92	0,80 - 0,90
Φρούτα ξηρά	30	0,50
Κρέατα		
Μπέικον	50	0,48
Βοδινό, πάχος	51	0,69
Βοδινό, ψαχνό	72	0,82
Βοδινό, κιμάς	-	0,81
Βοδινό, βρασμένο	57	0,73
Κόκκαλα	-	0,40 - 0,60
Νεφρά	-	0,86
Λιχνί	90	0,93
Χοιρινό, πάχος	39	0,62
Χοιρινό, ψαχνό	57	0,73
Μοσχάρι	63	0,77
Μοσχάρι, μπριζόλα	72	0,82
Αλλαντικά	72	0,81
Διάφορα		
Ψωμί, άσπρο	44 - 45	0,65 - 0,68
Ζάχαρη		0,30
Ρύζι	10,5 - 13,5	0,42 - 0,44
Αλάτι	15 - 20	0,27 - 0,32
Αιγύ, κρόκος	48	0,67
Αιγύ, λευκό	87	0,92

Μέσες ειδικές
θερμότητες
διαφόρων
τροφίμων

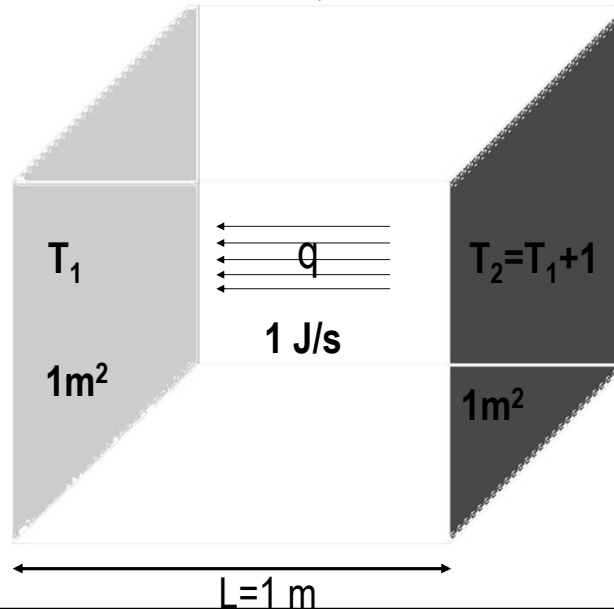
‘Θερμοχωρητικότητα’

- * Συχνά στην βιβλιογραφία αντί του όρου ειδική θερμότητα χρησιμοποιείται ο όρος Θερμοχωρητικότητα (specific heat capacity) που προσδιορίζει τη θερμότητα που «χωρά» μια συγκεκριμένη ποσότητα υλικού.
- * Όταν η παραπάνω ποσότητα είναι η μονάδα μάζας, τότε οι δύο έννοιες της ειδικής θερμότητας και θερμοχωρητικότητας, συμπίπτουν.

Θερμοαγωγιμότητα, k

- * Είναι δείκτης της ταχύτητας κίνησης της θερμότητας μέσα σε ένα σώμα ή μέσο
- * Δηλ. η ποσότητα της θερμότητας που περνά στην μονάδα χρόνου από την μονάδα πάχους του υλικού με επιφάνεια ίση προς τη μονάδα επιφάνειας, όταν οι δύο επιφάνειες διαφέρουν κατά μια θερμοκρασιακή μονάδα.
- * π.χ. όταν από δύο υλικά επιφάνειας 1m^2 , τα οποία απέχουν μεταξύ τους 1m και διαφέρουν κατά 1°C , περνά θερμότητα ίση με 1 J μέσα σε 1 sec τότε λέμε ότι η θερμοαγωγιμότητα του μέσου ανάμεσα στα δύο υλικά είναι ίση με 1.
- * Εκφράζεται σε: $\text{J}/\text{m}\cdot\text{s}\cdot^\circ\text{C}$ ($\text{W}/\text{m}\cdot^\circ\text{K}$) ή ανάλογα σε $\text{BTU}/\text{ft}\cdot\text{h}\cdot^\circ\text{F}$
- * Για το νερό $0,6\text{-}0,7\text{ J}/\text{m}\cdot\text{s}\cdot^\circ\text{C}$ για θερμοκρασίες $> 0^\circ\text{C}$

$$k = 1 \text{ J/m}\cdot\text{s}\cdot^{\circ}\text{C} \text{ ή } 1 \text{ W/m}\cdot^{\circ}\text{K}$$



Ιδιότητες της k

- * Η σύσταση του προϊόντος όπως και η φυσική ή χημική δομή παίζει ιδιαίτερο ρόλο στην τιμή της k .
- * Στα υγρά μειώνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας (με εξαίρεση το νερό όπου $k_{\text{πάγου}} = 4k_{\text{νερού}}$).
- * Στα αέρια ελαττώνεται με το μοριακό βάρος και αυξάνει με τη θερμοκρασία (γενικά $k_{\text{αερίων}} = 1/10 k_{\text{υγρών}}$).
- * Στα στερεά και τα υγρά για μικρές περιοχές θερμοκρασιών μεταβάλλεται γραμμικά με τη θερμοκρασία σύμφωνα με την εξίσωση:
 $k=a+b\cdot T$ (a και b σταθερές)
- * Στα τρόφιμα λόγω της φύσης τους, η k θα πρέπει να εκτιμηθεί ξεχωριστά για το καθένα

Εκτίμηση της (k)

- * Εξίσωση του Sweat για φρούτα και λαχανικά με υγρασία πάνω από 60%.

$$k = 0,148 + 0,00493 \cdot X_N \text{ (W/m}^\circ\text{K)}$$

- * Εξίσωση Choi & Okos για τρόφιμα με γνωστή σύνθεση:

$$k = \sum k_i \cdot x_{vi}, \text{ όπου } x_{vi} \text{ το κλάσμα όγκου του συστατικού ίσο με: } x_i/\rho_i / \sum (x_i/\rho_i) \text{ όπου } x_i \text{ το κλάσμα βάρους του συστατικού } i \text{ και } \rho_i \text{ η πυκνότητα του συστατικού } i. \text{ Η } k_i \text{ του κάθε συστατικού υπάρχει στην βιβλιογραφία.}$$

Άλλος τρόπος εύρεσης της θερμοαγωγιμότητας είναι η εξίσωση του Maxwell που εφαρμόζεται σε πολλά είδη τροφίμων και στηρίζεται στην κατανομή των φάσεων.

$$k = k_L \left[\frac{1 - \left(\frac{1 - ak_s}{k_L} \right) b}{1 + (a - 1)b} \right]$$

$$a = \frac{3k_L}{2k_L + k_s}, b = \frac{x_s}{x_L + x_s}$$

k_L και k_s οι θερμοαγωγιμότητες της ρευστής και στερεής φάσης αντίστοιχα και X_L και X_s τα κλάσματα όγκου (ειδικός όγκος ή 1/πυκνότητα) της ρευστής και στερεής φάσης αντίστοιχα.

Παράδειγμα

- Προσδιορίστε την θερμοαγωγιμότητα μοσχαρίσιου κρέατος με 74% υγρασία στους 45°F όταν είναι γνωστά:
- Πυκνότητα κρέατος: 80 lbm/ft³
- Πυκνότητα νερού: 62,5 lbm/ft³
- Ειδικός όγκος νερού: 0,016 ft³/lbm
- Ειδικός όγκος κρέατος: 0,0125 ft³/lbm
- k στερεών κρέατος: 0,15 BTU/hft°F
- k νερού στους 45°F: 0,334 BTU/hft°F

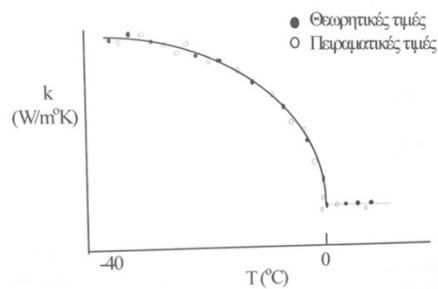
Παράδειγμα

- Προσδιορίστε την θερμοαγωγιμότητα μοσχαρίσιου κρέατος με 74% υγρασία στους 45°F όταν είναι γνωστά:
- Πυκνότητα κρέατος: 80 lbm/ft³
- Πυκνότητα νερού: 62,5 lbm/ft³
- Ειδικός όγκος νερού: 0,016 ft³/lb
- Ειδικός όγκος κρέατος: 0,0125 ft³/lb
- k στερεών κρέατος: 0,15 BTU/hft°F
- k νερού στους 45°F: 0,334 BTU/hft°F

Απάντηση: 0,2834 BTU/h·ft·°F

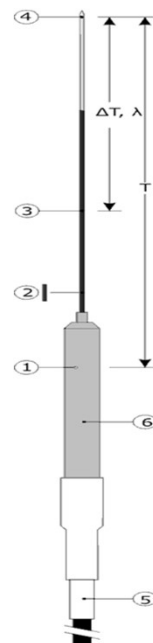
Εφαρμογές

- Την χρήση της εξίσωσης του Maxwell χρησιμοποίησε ο Long (1955) για την εκτίμηση της k σε κατεψυγμένα ψάρια.
- Ανάλογα, έχει αποδειχθεί ότι η μετάδοση της θερμότητας στο κρέας με ίνες είναι 15-20% μεγαλύτερη κατά την μετάδοση παράλληλα προς τις ίνες από ότι κάθετα σε αυτές.



Μέτρηση της k

- Η μέτρηση της θερμικής αγωγιμότητας γίνεται με την βοήθεια ειδικά σχεδιασμένου ηλεκτροδίου το οποίο συνδυαστικά θερμαίνει και μετρά με ακρίβεια την μεταβολή της θερμοκρασίας.
- Για τα υγρά χρησιμοποιούμε διατάξεις θέρμανσης μιας λεπτής στιβάδας (0,38 mm) όπου μετράμε την μεταδιδόμενη θερμότητα.



https://www.youtube.com/watch?v=I_M4UGo3Kfw

Θερμοαγωγιμότητες
διαφόρων τροφίμων
και υλικών.

(Στα τρόφιμα οι
τιμές είναι < 1)



Σκεύος για παρασκευή χαλβά

274

Πίνακας 7. Θερμοαγωγιμότητα αντιπροσωπευτικών τροφίμων

Τρόφιμο	Υγρασία %	Θερμ/σία °F	Θερμοαγ/τα, BTU/h ft²
Μήλα	85,6	36 - 96	0,227
Βοδινό, ψαχνό	-	-	-
κάθετα προς τις ίνες	78,9	44,5	0,275
κάθετα προς τις ίνες	78,9	143,7	0,280
παράλληλα προς τις ίνες	78,7	46,2	0,249
παράλληλα προς τις ίνες	78,7	141,6	0,258
Βούτυρο	-	38 - 47	0,114
Λιγνό, λευκό	-	96	0,322
Λιγνό, κρόκος	-	92,2	0,195
Ψάρια	-	32 - 50	0,322
Μέλι	12,6	35,6	0,290
Μέλι	8	35,6	0,199
Μηλοχυμός	87,4	68	0,323
Μηλοχυμός	87,4	176	0,365
Αρνί κάθετα προς τις ίνες	71,8	41,8	0,260
Αρνί κάθετα προς τις ίνες	71,8	142	0,276
Αρνί παράλληλα προς τις ίνες	71	42	0,240
Αρνί παράλληλα προς τις ίνες	71	142,6	0,244
Γάλα	-	98	0,306
Γάλα αποβουτυρωμένο	-	34,7	0,311
Γάλα συμπυκνωμένο	90	75,6	0,330
Γάλα συμπυκνωμένο	90	172,8	0,370
Γάλα συμπυκνωμένο	50	78,8	0,190
Γάλα συμπυκνωμένο	50	173,1	0,210
Γάλα σκόνη άνω λίπους	4,2	102,4	0,242
Ελαιόλαδο	-	60	0,109
Ελαιόλαδο	-	212	0,094
Πορτοκάλια	-	86,5	0,2487
Μπαζίλια	-	37 - 62	0,180
Χοιρινό κάθετα προς τις ίνες	75,1	42,8	0,282
Χοιρινό παράλληλα προς τις ίνες	75,9	38,8	0,256
Μοσχάρι κάθετα προς τις ίνες	75	42,6	0,275
Μοσχάρι παράλληλα προς τις ίνες	75	40,4	0,255
Μοσχάρι κάθετα προς τις ίνες	75	144,4	0,283
Μοσχάρι παράλληλα προς τις ίνες	75	138,9	0,261
Κοτόπουλο, ψαχνό	69,1 - 74,9	40 - 80	0,238
Αλλαντικά	64,7	75,3	0,235
Αλεύρι	8,8	110	0,260
Ορός γάλακτος	-	35	0,313
Ορός γάλακτος	-	176	0,370
Πατάτες	81,5	35 - 90	0,320
Φράουλα	-	5,6 - 76,2	0,390
Νερό	-	32	0,314
Νερό	-	199,5	0,391
Πάγος	-	32	1,280
Κρέμα (γενικά, μέσος όρος)	-	32	0,290
Φρούτα (γενικά)	-	32 - 81	0,22 - 0,29
Λαχανικά (γενικά)	-	32 - 81	0,22 - 0,29
Μέταλλο - Ψαλί	-	-	-
Ανοξείδωτο ατσάλι	-	-	9,4
Χαλός	-	-	230
Γυαλί πυρεξ	-	-	0,05

Πηγή: Heldman, D. R. Food Process Engineering (1975)
Karel et al. Physical Principles of Food Preservation (1975)

Θερμική διαχυτικότητα, α

- * Ο ρυθμός διείσδυσης της θερμότητας σε ένα σώμα είναι συνάρτηση της (C_p), της (k) αλλά και της πυκνότητας του υλικού (ρ). Οι παράμετροι αυτοί προσδιορίζουν ένα σύνθετο μέγεθος την Θερμική διαχυτικότητα (α) ως παρακάτω:

$$\alpha = k/\rho \cdot C_p = \text{m}^2/\text{s}$$

- * Η παραπάνω έκφραση βρίσκει πολύ συχνά εφαρμογή σε προβλήματα εκτίμησης μεταφοράς θερμότητας (π.χ. κατάψυξη τροφίμων).

Αισθητή θερμότητα

- * Είναι η θερμότητα που προστίθεται (ή αφαιρείται) σε ένα σώμα για να προκαλέσει αλλαγή της θερμοκρασίας του.
- * Εκτιμάται από τον τύπο:
 $Q_A = m \cdot C_p \cdot (T_1 - T_2)$ όπου m η μάζα του σώματος και $T_1 - T_2$ η αρχική και τελική θερμοκρασία του.
- * Δίνεται σε : KJ/Kg , cal/g ή BTU/lb_m

Λανθάνουσα Θερμότητα

- * Η θερμότητα που προστίθεται σε ένα σώμα ή αποδίδεται στο περιβάλλον από ένα σώμα για αλλαγή της φάσης του.
- * Δίνεται από τον τύπο: $Q_L = m_L \cdot \lambda$, όπου m_L ή μάζα του συστατικού που αλλάζει φάση και (λ) η λανθάνουσα θερμότητα του συστατικού ανά kg.
- * Εκφράζεται σε kJ/kg, kcal/Kg ή BTU/lb_m.
Για το νερό η λανθάνουσα θερμότητα τήξης (0°C) είναι 80 kJ/kg και η λανθάνουσα θερμότητα εξατμίσης 334 kJ/kg.

Εργασία:

- * Πώς θα επιθυμούσατε να είναι οι θερμικές ιδιότητες ενός προϊόντος (C_p , K , α) για να πετύχετε:
 - * Χαμηλό κόστος επεξεργασίας
 - * Σύντομη επεξεργασία
 - * Γρήγορη ψύξη
- * Φρουτοχυμός με 8,5% στερεά βρίσκεται σε κατάσταση μερικής κατάψυξης με 30% της υγρασίας του σε ρευστή μορφή. Ποια η αναμενόμενη ειδική θερμότητα?