

□ OU con TRASPORTO DI CALORE

OPERAZIONI UNITARIE CON APPLICAZIONI

Prof. Maria Martuscelli



II anno - CdS di Viticoltura ed Enologia
Facoltà di Bioscienze

la legge che regola qualunque fenomeno di trasporto è:

$$dw / dt = \Delta P / R$$

dw / dt = quantità trasportata (dw) nel tempo (dt)
 ΔP = differenza di potenziale

R = resistenza

vedi dopo!!!

premessesa

- Calore e temperatura: concetti e grandezze fisiche distinte, entrambe legati al moto di mobilità termica degli atomi nella materia/sistema in qualunque stato essi siano.
- **Temperatura** (di un corpo): misura il grado di agitazione delle particelle che lo compongono
- **Calore**: forma di energia che ha la sua tendenza a trasferirsi da un corpo a maggiore temperatura ad uno a minore temperatura

Calore e temperatura

Il **calore** è la forma di energia che si può trasferire da un sistema ad un altro a causa di una differenza di temperatura.

La **termodinamica** è la scienza che si occupa di determinare:

- la *quantità di calore* trasferita fino al raggiungimento di una condizione di equilibrio
- la *velocità di trasferimento del calore* attraverso equazioni di trasferimento di calore.

calore e termodinamica

-Unità di misura dell'**energia**: **Joule (J)**, unità troppo piccola; comunemente si usa il suo multiplo, il **KJ (Kilojoule)**.

-Secondo il Sistema Internazionale il **calore** si misura in **KJ**.

➤ Importante è anche il **Kilowattora (KWh)**, unità usata nella misura dell'energia elettrica.

➤ Il **calore**, che è una forma particolare di energia, è sempre stato misurato mediante l'unità pratica **Caloria (Cal o KCal)**.

-La **Caloria** per definizione è *la quantità di calore necessaria ad innalzare di un grado (da 14,5 a 15,5 ° C) la temperatura di un g di acqua.*

-Altra unità utilizzata è il **British Thermal Unit (Btu)** del sistema anglosassone.

I fattori di conversione in Joule (J) sono i seguenti:

1 KWh = 3.600 J

1 Cal = 4,186 J

1 Btu = 1,055 J

Energia termica = Calore

$$Q_{1,2} = m C_p (T_2 - T_1)$$

- quantità di calore trasferita?
- flusso di calore (velocità di trasferimento di calore)?

Modalità di trasmissione del calore:
conduzione, convezione, irraggiamento

- per alimenti e altre componenti (materiali, gas) dei processi alimentari bisogna conoscere o determinare i seguenti coefficienti:
- C_p (calore specifico)
- K (conducibilità termica)
- α (diffusività termica)

PROPRIETA' TERMICHE

Il calore specifico invece si definisce come *la quantità di calore necessaria ad innalzare di 1 ° C la temperatura di una quantità unitaria della sostanza considerata.*

$$C_p = Q / m \Delta T$$

unità di misura di C_p : cal/g ° C o Kcal /Kg ° C

nella maggior parte dei processi alimentari, il calore specifico è riferito a **PRESSIONE COSTANTE** (eccetto che per i trattamenti che prevedono l'impiego di Alte Pressioni)

Per i vari materiali e per gli alimenti si possono usare i valori tabulati di C_p → **vedi ad esempio la tabella A.2.1**

RICORDA:

- Il calore specifico varia in base alla composizione di un alimento (frazioni molari delle diverse componenti)
- Il calore specifico varia non solo da materiale/componente a materiale/componente, ma anche, per lo stesso materiale/componente, con la temperatura, secondo relazioni empiriche ottenute per i diversi materiali.

Si può anche affermare che il **Calore specifico** esprime la *variazione di entalpia* che subisce il sistema riscaldato:

OSSERVAZIONI:

siccome l'acqua ha un calore specifico più alto rispetto alle altre componenti, si può affermare che:



passando da un prodotto molto acquoso ad uno con un contenuto inferiore di acqua il calore specifico diminuisce

vedi sito:

<https://www.larapedia.com/calore-specifico/calore-specifico-acqua.html>

Calore specifico = **Capacità termica** per *unità di quantità di materia*.

Il calore specifico, a seconda che la quantità di materia si misuri in grammi o moli, si esprime in

- gradi/grammi o
- gradi/ mole (Cs molare)

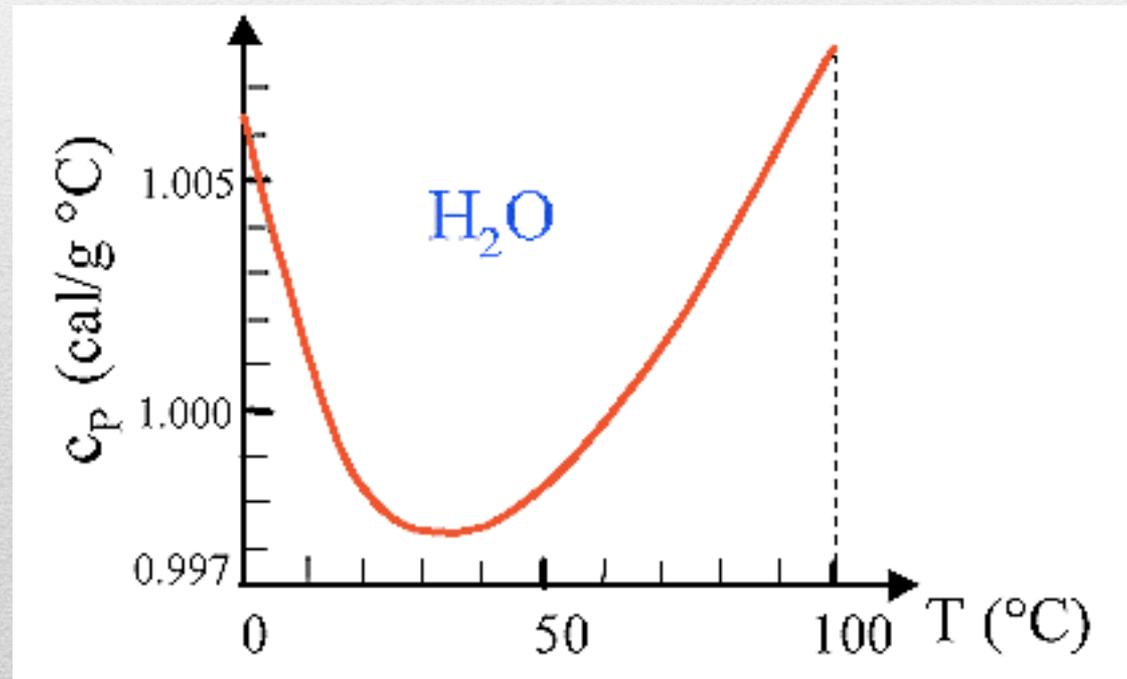


Tabella A.2.8 Composizione media di alcuni alimenti

| Alimento | Acqua (%) | Proteine (%) | Grassi (%) | Carboidrati (%) | Ceneri (%) |
|--------------------------|-----------|--------------|------------|-----------------|------------|
| Mele, fresche | 84.4 | 0.2 | 0.6 | 14.5 | 0.3 |
| Composta di mele | 88.5 | 0.2 | 0.2 | 10.8 | 0.6 |
| Asparagi | 91.7 | 2.5 | 0.2 | 5.0 | 0.6 |
| Fagioli di Lima | 67.5 | 8.4 | 0.5 | 22.1 | 1.5 |
| Manzo, hamburger, crudo | 68.3 | 20.7 | 10.0 | 0.0 | 1.0 |
| Pane, bianco | 35.8 | 08.7 | 3.2 | 50.4 | 1.9 |
| Burro | 15.5 | 0.6 | 81.0 | 0.4 | 2.5 |
| Merluzzo | 81.2 | 17.6 | 0.3 | 0.0 | 1.2 |
| Mais dolce, crudo | 72.7 | 3.5 | 1.0 | 22.1 | 0.7 |
| Crema di latte | 79.7 | 03.2 | 11.7 | 04.6 | 0.6 |
| Uova | 73.7 | 12.9 | 11.5 | 0.9 | 1.0 |
| Aglione | 61.3 | 6.2 | 0.2 | 30.8 | 1.5 |
| Lattuga, iceberg | 95.5 | 0.9 | 0.1 | 2.9 | 0.6 |
| Latte, intero | 87.4 | 3.5 | 3.5 | 4.9 | 0.7 |
| Succo d'arancia | 88.3 | 0.7 | 0.2 | 10.4 | 0.4 |
| Pesche | 89.1 | 0.6 | 0.1 | 9.7 | 0.5 |
| Arachidi, non tostate | 5.6 | 26.0 | 47.5 | 18.6 | 2.3 |
| Piselli, crudi | 78.0 | 6.3 | 0.4 | 14.4 | 0.9 |
| Ananas, fresco | 85.3 | 0.4 | 0.2 | 13.7 | 0.4 |
| Patate, crude | 79.8 | 2.1 | 0.1 | 17.1 | 0.9 |
| Riso, brillato | 12.0 | 6.7 | 0.4 | 80.4 | 0.5 |
| Spinaci | 90.7 | 3.2 | 0.3 | 4.3 | 1.5 |
| Pomodori | 93.5 | 1.1 | 0.2 | 4.7 | 0.5 |
| Tacchino | 64.2 | 20.1 | 14.7 | 0.0 | 1.0 |
| Rape | 91.5 | 1.0 | 0.2 | 6.6 | 0.7 |
| Yogurt (da latte intero) | 88.0 | 3.0 | 3.4 | 4.9 | 0.7 |

- **Per gli alimenti** si possono usare i **modelli predittivi** che sono stati ricavati fittando i dati sperimentali con modelli matematici; di seguito *alcuni esempi*:

1. in funzione della frazione molare dell'acqua (non tiene conto di altre componenti)



Eq. di Siebel (1892)

$$C_p = 0.837 + 3.349 x_w \quad (x_w, \text{ frazione molare dell'acqua})$$

2. Equazione predittiva di C_p di un alimento, in funzione delle frazioni molari dei componenti (c , carboidrati; p , proteine; g , grassi; f , ceneri e fibre; w , acqua), senza tener conto della temperatura



Eq. di Heldman e Singh (1981):

$$C_p = 1.424 x_c + 1.549 x_p + 1.675 x_g + 0.837 x_f + 4.187 x_w$$

3. in funzione della composizione e Temperatura dell'alimento



Eq. di Choi e Okos (1986)

$$C_p = \sum_{i=1}^n c_{pi} X_i$$

(per equazioni specifiche in funzione della T vedi dopo tabella A.2.9)

Tabella A.2.1 Calore specifico di alcuni alimenti

| Prodotto | Composizione (%) | | | | | Calore specifico | |
|--------------------------------|------------------|----------|-------------|--------|--------|------------------------|--|
| | Acqua | Proteine | Carboidrati | Grassi | Ceneri | Eq. (4.4) (kJ/kg K) | Sperimentale ^a (kJ/[kg K]) |
| Carne di manzo (hamburger) | 68.3 | 20.7 | 0.0 | 10.0 | 1.0 | 3.35 | 3.52 |
| Pesce in scatola | 70.0 | 27.1 | 0.0 | 0.3 | 2.6 | 3.35 | |
| Amido | 12.0 | 0.5 | 87.0 | 0.2 | 0.3 | 1.754 | |
| Succo d'arancia | 87.5 | 0.8 | 11.1 | 0.2 | 0.4 | 3.882 | |
| Fegato di manzo, crudo | 74.9 | 15.0 | 0.9 | 9.1 | 1.1 | 3.525 | |
| Latte in polvere, scremato | 03.5 | 35.6 | 52.0 | 1.0 | 7.9 | 1.520 | |
| Burro | 15.5 | 0.6 | 0.4 | 81.0 | 2.5 | 2.043 | 2.051-2.135 |
| Latte intero pastorizzato | 87.0 | 3.5 | 4.9 | 3.9 | 0.7 | 3.831 | 3.852 |
| Mirtillo, sciroppo | 73.0 | 0.40 | 23.6 | 0.4 | 2.6 | 3.445 | |
| Merluzzo, crudo | 82.6 | 15.0 | 0.0 | 0.4 | 2.0 | 3.697 | |
| Latte scremato | 90.5 | 3.5 | 5.1 | 0.1 | 0.8 | 3.935 | 3.977-4.019 |
| Zuppa di pomodoro, concentrata | 81.4 | 1.8 | 14.6 | 1.8 | 0.4 | 3.676 | |
| Carne di manzo, magra | 77.0 | 22.0 | - | - | 1.0 | 3.579 | |
| Pesce, fresco | 76.0 | 19.0 | - | - | 1.4 | 3.500 | 3.600 |
| Carne di manzo, magra | 71.7 | 21.6 | 0.0 | 05.7 | 1.0 | 3.437 | 3.433 |
| Patata | 79.8 | 2.1 | 17.1 | 0.1 | 0.9 | 3.634 | 3.517 |
| Mela | 84.4 | 0.2 | 14.5 | 0.6 | 0.3 | 3.759 | 3.726-4.019 |
| Bacon | 49.9 | 27.6 | 0.3 | 17.5 | 4.7 | 2.851 | 2.01 |
| Cetriolo | 96.1 | 0.5 | 1.9 | 0.1 | 1.4 | 4.010 | 4.103 |
| Mora, sciroppo | 76.0 | 0.7 | 22.9 | 0.2 | 0.2 | 3.521 | |
| Patata | 75.0 | 0.0 | 23.0 | 0.0 | 2.0 | 3.483 | 3.517 |
| Carne di vitello | 68.0 | 21.0 | 0.0 | 10.0 | 1.0 | 3.349 | 3.223 |
| Pesce | 80.0 | 15.0 | 4.0 | 0.3 | 0.7 | 3.651 | 3.60 |
| Formaggio, cottage | 65.0 | 25.0 | 1.0 | 2.0 | 7.0 | 3.215 | 3.265 |
| Gambero | 66.2 | 26.8 | 0.0 | 1.4 | 0.0 | 3.404 | 3.014 |
| Sardina | 57.4 | 25.7 | 1.2 | 11.0 | 0.0 | 3.002 | 3.014 |
| Carne di manzo, arrosto | 60.0 | 25.0 | 0.0 | 13.0 | 0.0 | 3.115 | 3.056 |
| Carota fresca | 88.2 | 1.2 | 9.3 | 0.3 | 1.1 | 3.864 | 3.81-3.935 |

Fonte: adattato da Heldman e Singh (1981).

^aValori sperimentali di calore specifico da Reidy (1968).

acqua e altre macrocomponenti degli alimenti

Masi (2018) riporta le equazioni ricavate da prove sperimentali

Tabella 6.3. Equazioni predittive del calore specifico dei macro componenti degli alimenti^(a).

| | c_p , (J/kg°C) |
|--------------|----------------------|
| acqua | $4186,2 - 0,0909 T$ |
| ghiaccio | $2062,3 + 6,0769 T$ |
| proteine | $2008 + 1,2089 T$ |
| grassi | $1984,2 + 1,4373 T$ |
| carboidrati | $1548,8 + 1,9625 T$ |
| Fibre/ceneri | $1469,25 + 1,8602 T$ |

^aT in °C, campo di validità 0 - 90°C.

Esercitazione in aula (15/ 12/2020), applicando l'equazione di Heldman e Singh (vedi prima)

Tabella A.2.9 Coefficienti per la stima delle proprietà degli alimenti (Choi e Okos, 1986)

| Proprietà | Componente | Funzione della temperatura | Errore standard | Errore standard (%) |
|--|---|--|-------------------------|---------------------|
| k (W/m °C) | Proteine | $k = 1.7881 \times 10^{-1} + 1.1958 \times 10^{-3}T - 2.7178 \times 10^{-6}T^2$ | 0.012 | 5.91 |
| | Grassi | $k = 1.8071 \times 10^{-1} - 2.7604 \times 10^{-4}T - 1.7749 \times 10^{-7}T^2$ | 0.0032 | 1.95 |
| | Carboidrati | $k = 2.0141 \times 10^{-1} + 1.3874 \times 10^{-3}T - 4.3312 \times 10^{-6}T^2$ | 0.0134 | 5.42 |
| | Fibre | $k = 1.8331 \times 10^{-1} + 1.2497 \times 10^{-3}T - 3.1683 \times 10^{-6}T^2$ | 0.0127 | 5.55 |
| | Ceneri | $k = 3.2962 \times 10^{-1} + 1.4011 \times 10^{-3}T - 2.9069 \times 10^{-6}T^2$ | 0.0083 | 2.15 |
| | Acqua | $k = 5.7109 \times 10^{-1} + 1.7625 \times 10^{-3}T - 6.7036 \times 10^{-6}T^2$ | 0.0028 | 0.45 |
| | Ghiaccio | $k = 2.2196 - 6.2489 \times 10^{-3}T + 1.0154 \times 10^{-4}T^2$ | 0.0079 | 0.79 |
| α (mm ² /s) | Proteine | $\alpha = 6.87143 \times 10^{-2} + 4.75783 \times 10^{-4}T - 1.4646 \times 10^{-6}T^2$ | 0.0038 | 4.50 |
| | Grassi | $\alpha = 9.8777 \times 10^{-2} - 1.2569 \times 10^{-4}T - 3.8286 \times 10^{-8}T^2$ | 0.0020 | 2.15 |
| | Carboidrati | $\alpha = 8.08423 \times 10^{-2} + 5.30523 \times 10^{-4}T - 2.3218 \times 10^{-6}T^2$ | 0.0058 | 5.84 |
| | Fibre | $\alpha = 7.39763 \times 10^{-2} + 5.19023 \times 10^{-4}T - 2.2202 \times 10^{-6}T^2$ | 0.0026 | 3.14 |
| | Ceneri | $\alpha = 1.2461 \times 10^{-1} + 3.7321 \times 10^{-4}T - 1.2244 \times 10^{-6}T^2$ | 0.0022 | 1.61 |
| | Acqua | $\alpha = 1.3168 \times 10^{-1} + 6.2477 \times 10^{-4}T - 2.4022 \times 10^{-6}T^2$ | 0.0022×10^{-6} | 1.44 |
| | Ghiaccio | $\alpha = 1.17562 - 6.0833 \times 10^{-3}T + 9.5037 \times 10^{-5}T^2$ | 0.0044×10^{-6} | 0.33 |
| ρ (kg/m ³) | Proteine | $\rho = 1.32993 \times 10^3 - 5.1840 \times 10^{-1}T$ | 39.9501 | 3.07 |
| | Grassi | $\rho = 9.2559 \times 10^2 - 4.1757 \times 10^{-1}T$ | 4.2554 | 0.47 |
| | Carboidrati | $\rho = 1.5991 \times 10^3 - 3.1046 \times 10^{-1}T$ | 93.1249 | 5.98 |
| | Fibre | $\rho = 1.3115 \times 10^3 - 3.6589 \times 10^{-1}T$ | 8.2687 | 0.64 |
| | Ceneri | $\rho = 2.4238 \times 10^3 - 2.8063 \times 10^{-1}T$ | 2.2315 | 0.09 |
| | Acqua | $\rho = 9.97183 \times 10^2 + 3.1439 \times 10^{-3}T - 3.7574 \times 10^{-3}T^2$ | 2.1044 | 0.22 |
| | Ghiaccio | $\rho = 9.1689 \times 10^2 - 1.3071 \times 10^{-1}T$ | 0.5382 | 0.06 |
| c_p (kJ/kg °C) | Proteine | $c_p = 2.0082 + 1.2089 \times 10^{-3}T - 1.3129 \times 10^{-6}T^2$ | 0.1147 | 5.57 |
| | Grassi | $c_p = 1.9842 + 1.4733 \times 10^{-3}T - 4.8008 \times 10^{-6}T^2$ | 0.0236 | 1.16 |
| | Carboidrati | $c_p = 1.5488 + 1.9625 \times 10^{-3}T - 5.9399 \times 10^{-6}T^2$ | 0.0986 | 5.96 |
| | Fibre | $c_p = 1.8459 + 1.8306 \times 10^{-3}T - 4.6509 \times 10^{-6}T^2$ | 0.0293 | 1.66 |
| | Ceneri | $c_p = 1.0926 + 1.8896 \times 10^{-3}T - 3.6817 \times 10^{-6}T^2$ | 0.0296 | 2.47 |
| | Acqua ^a | $c_p = 4.0817 - 5.3062 \times 10^{-3}T + 9.9516 \times 10^{-4}T^2$ | 0.0988 | 2.15 |
| | Acqua ^b | $c_p = 4.1762 - 9.0864 \times 10^{-5}T + 5.4731 \times 10^{-6}T^2$ | 0.0159 | 0.38 |
| Ghiaccio | $c_p = 2.0623 + 6.0769 \times 10^{-3}T$ | 0.0014 | 0.07 | |
| ^a Per l'intervallo di temperatura da -40 a 0°C. | | | | |
| ^b Per l'intervallo di temperatura da 0 a 150°C. | | | | |

creazione del foglio di calcolo:

| | A | B | C | D | E | F | G | H | I |
|----|------------------|--------------|---|--|---|---|---|---|---|
| 1 | Temperatura (°C) | 20 | | | | | | | |
| 2 | Acqua | 0.25 | | | | | | | |
| 3 | Proteine | 0.2 | | | | | | | |
| 4 | Grassi | 0.1 | | | | | | | |
| 5 | Carboidrati | 0.4 | | | | | | | |
| 6 | Fibra | 0 | | | | | | | |
| 7 | Ceneri | 0.05 | | | | | | | |
| 8 | | | | | | | | | |
| 9 | | Coefficienti | | | | | | | |
| 10 | Acqua | 4.1766 | ← | =4.1762-0.000090864*\$B\$1+0.0000054731*\$B\$1^2 | | | | | |
| 11 | Proteine | 2.0319 | ← | =2.0082+0.0012089*\$B\$1-0.0000013129*\$B\$1^2 | | | | | |
| 12 | Grassi | 2.0117 | ← | =1.9842+0.0014733*\$B\$1-0.0000048008*\$B\$1^2 | | | | | |
| 13 | Carboidrati | 1.5857 | ← | =1.5488+0.0019625*\$B\$1-0.0000059399*\$B\$1^2 | | | | | |
| 14 | Fibra | 1.8807 | ← | =1.8459+0.0018306*\$B\$1-0.0000046509*\$B\$1^2 | | | | | |
| 15 | Ceneri | 1.1289 | ← | =1.0926+0.0018896*\$B\$1-0.0000036817*\$B\$1^2 | | | | | |
| 16 | | | | | | | | | |
| 17 | | Eq(4.5) | | | | | | | |
| 18 | Acqua | 1.044 | ← | =B2*B10 | | | | | |
| 19 | Proteine | 0.406 | ← | =B3*B11 | | | | | |
| 20 | Grassi | 0.201 | ← | =B4*B12 | | | | | |
| 21 | Carboidrati | 0.634 | ← | =B5*B13 | | | | | |
| 22 | Fibra | 0.000 | ← | =B6*B14 | | | | | |
| 23 | Ceneri | 0.056 | ← | =B7*B15 | | | | | |
| 24 | Risultato | 2.342 | ← | =SUM(B18:B23) | | | | | |

La **conducibilità termica** (normalmente indicata con la lettera greca λ o k):

- è una proprietà termo-fisica specifica di ogni materiale (inclusi gli alimenti!)
- è il flusso di calore Q (misurato in J/s ovvero W) che attraversa una superficie unitaria A di spessore unitario x sottoposta ad un gradiente termico ΔT di un grado Kelvin (o Celsius)
- Nel SI, l'unità di misura della conducibilità termica (K) è:

$$\text{J sec}^{-1} \text{ m}^{-1} \text{ }^\circ \text{ C}^{-1} \quad \text{oppure} \quad \text{W m}^{-1} \text{ }^\circ \text{ C}^{-1}$$

conducibilità termica

- Metalli: $50-400 \text{ W m}^{-1} \text{ } ^\circ \text{ C}^{-1}$
- Leghe metalliche: $10 -120 \text{ W m}^{-1} \text{ } ^\circ \text{ C}^{-1}$
- **Acqua** (a 20° C): $0,597 \text{ W m}^{-1} \text{ } ^\circ \text{ C}^{-1}$
- **Alimenti** (a 20° C) : $0,6 - 0,7 \text{ W m}^{-1} \text{ } ^\circ \text{ C}^{-1}$
- Materiali isolanti: $0,035 - 0,173 \text{ W m}^{-1} \text{ } ^\circ \text{ C}^{-1}$
- **Aria** (a 20° C): $0,0251 \text{ W m}^{-1} \text{ } ^\circ \text{ C}^{-1}$



conducibilità termica

In generale K (conducibilità termica) varia in funzione della temperatura ma negli alimenti la variazione è limitata al variare della T e si può considerare i dati disponibili come valori medi, **K_m (vedi tabelle)**

Comunque, anche per la conducibilità negli alimenti o si possono usare i **modelli predittivi**:

$$k = \sum_{i=1}^n k_i Y_i$$

di Choi e Okos (1986)

per gli alimenti, vedi equazioni tabella A.2.9

Tabella A.2.2 Conducibilità termica di alcuni prodotti alimentari

| Prodotto | Umidità (%) | Temperatura (°C) | Conducibilità termica (W/[m °C]) |
|------------------------------|-------------|------------------|----------------------------------|
| Mela | 85.6 | 2-36 | 0.393 |
| Purea di mela | 78.8 | 2-36 | 0.516 |
| Carne di manzo, liofilizzata | | | |
| pressione 1000 mm Hg | – | 0 | 0.065 |
| pressione 0.001 mm Hg | – | 0 | 0.037 |
| Carne di manzo, magra | 74.9 | 15.0 | 0.9 |
| perpendicolare alle fibre | 78.9 | 7 | 0.476 |
| perpendicolare alle fibre | 78.9 | 62 | 0.485 |
| parallelo alle fibre | 78.7 | 8 | 0.431 |
| parallelo alle fibre | 78.7 | 61 | 0.447 |
| Grassi di manzo | – | 24-38 | 0.19 |
| Burro | 15 | 46 | 0.197 |
| Merluzzo | 83 | 2.8 | 0.544 |
| Farina di mais | 0.91 | 8-52 | 0.141 |
| | 30.2 | 8-52 | 0.172 |
| Uovo, intero congelato | – | –10 a –6 | 0.97 |
| Uovo, albume | – | 36 | 0.577 |
| Uovo, tuorlo | – | 33 | 0.338 |
| Pesce, muscolo | – | 0-10 | 0.557 |
| Pompelmo, intero | – | 30 | 0.45 |
| Miele | 12.6 | 2 | 0.502 |
| | 80 | 2 | 0.344 |
| | 14.8 | 69 | 0.623 |
| | 80 | 69 | 0.415 |
| Mela, succo | 87.4 | 20 | 0.559 |
| | 87.4 | 80 | 0.632 |
| | 36.0 | 20 | 0.389 |
| | 36.0 | 80 | 0.436 |
| Carne di agnello | | | |
| perpendicolare alle fibre | 71.8 | 5 | 0.45 |
| | | 61 | 0.478 |
| | 71.0 | 5 | 0.415 |
| | | 61 | 0.422 |
| Latte | – | 37 | 0.530 |
| Latte, condensato | 90 | 24 | 0.571 |
| | – | 78 | 0.641 |
| | 50 | 26 | 0.329 |
| | – | 78 | 0.364 |

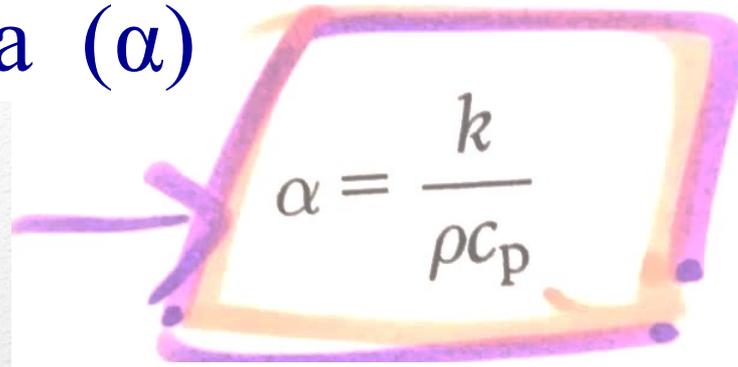
Tabella A.2.2 (continua)

| Prodotto | Umidità (%) | Temperatura (°C) | Conducibilità termica (W/[m °C]) |
|-------------------------------|--------------------|-------------------------|---|
| Latte, scremato | – | 1.5 | 0.538 |
| | | 80 | 0.635 |
| Latte in polvere, scremato | 4.2 | 39 | 0.419 |
| Olivo di oliva | – | 15 | 0.189 |
| | | 100 | 0.163 |
| Arance, miste | – | 30 | 0.431 |
| Piselli, black-eyed | – | 3-17 | 0.312 |
| Carne di suino | | | |
| perpendicolare alle fibre | 75.1 | 6 | 0.488 |
| | | 60 | 0.54 |
| parallelo alle fibre | 75.9 | 4 | 0.443 |
| | | 61 | 0.489 |
| Grasso di suino | – | 25 | 0.152 |
| Patata, polpa cruda | 81.5 | 1-32 | 0.554 |
| Patata, gel di amido | – | 1-67 | 0.04 |
| Pollame, muscolo alla griglia | 69.1-74.9 | 4-27 | 0.412 |
| Salmone | | | |
| perpendicolare alle fibre | 73 | 4 | 0.502 |
| Sale | – | 87 | 0.247 |
| Salsiccia | 65.72 | 24 | 0.407 |
| Farina di soia | 13.2 | 7-10 | 0.069 |
| Fragola | – | 14-25 | 0.675 |
| Zucchero | – | 29-62 | 0.087-0.22 |
| perpendicolare alle fibre | 74 | 3 | 0.502 |
| parallelo alle fibre | 74 | 3 | 0.523 |
| Carne di vitello | | | |
| perpendicolare alle fibre | 75 | 6 | 0.476 |
| | | 62 | 0.489 |
| parallelo alle fibre | 75 | 5 | 0.441 |
| | | 60 | 0.452 |
| Oli animali e vegetali | – | 4-187 | 0.169 |
| Farina di frumento | 8.8 | 43 | 0.45 |
| | | 65.5 | 0.689 |
| | | 1.7 | 0.542 |
| Siero di latte | | 80 | 0.641 |

Fonte: Reidy (1968).

diffusività termica (α)

vedi tabella dopo

A hand-drawn equation for thermal diffusivity, $\alpha = \frac{k}{\rho c_p}$, written on a whiteboard with a purple border. A purple arrow points to the left side of the whiteboard.
$$\alpha = \frac{k}{\rho c_p}$$

unità di misura:

$$\alpha \equiv \frac{m^2}{s}$$

di Choi e Okos (1986)

per gli alimenti, vedi equazioni
tabella A.2.9

$$\alpha = \sum_{i=1}^n \alpha_i X_i$$

Tabella A.2.3 Diffusività termica di alcuni alimenti

| Prodotto | Umidità (%) | Temperatura ^a (°C) | Diffusività termica ($\times 10^{-7}$ m ² /s) |
|------------------------------|-------------|-------------------------------|---|
| Frutta, verdure e derivati | | | |
| Mela intera, Red Delicious | 85 | 0-30 | 1.37 |
| Composta di mele | 37 | 5 | 1.05 |
| | 37 | 65 | 1.12 |
| | 80 | 5 | 1.22 |
| | 80 | 65 | 1.40 |
| | – | 26-129 | 1.67 |
| Avocado, polpa | – | 24.0 | 1.24 |
| Semi | – | 24.0 | 1.29 |
| Intero | – | 41.0 | 1.54 |
| Banana, polpa | 76 | 5 | 1.18 |
| | 76 | 65 | 1.42 |
| Fagioli, cotti | – | 4-122 | 1.68 |
| Ciliegie, torta, polpa | – | 30.0 | 1.32 |
| Pompelmo, Marsh, polpa | 88.8 | – | 1.27 |
| Pompelmo, Marsh, albedo | 72.2 | – | 1.09 |
| Limone, intero | – | 40.0 | 1.07 |
| Fagiolini di Lima, passati | – | 26-122 | 1.80 |
| Piselli, passati | – | 26-128 | 1.82 |
| Pesca intera | – | 27.4 | 1.39 |
| Patata, polpa | – | 25 | 1.70 |
| Patata, cotta, passata | 78 | 5 | 1.23 |
| | 78 | 65 | 1.45 |
| Rutabaga | – | 48.0 | 1.34 |
| Zucca, intera | – | 47.0 | 1.71 |
| Fragola, polpa | 92 | 5 | 1.27 |
| Barbabietola da zucchero | – | 14.60 | 1.26 |
| Patata dolce, intera | – | 35 | 1.06 |
| | – | 55 | 1.39 |
| | – | 70 | 1.91 |
| Pomodoro, polpa | – | 4.26 | 1.48 |
| Carne e pesce | | | |
| Merluzzo | 81 | 5 | 1.22 |
| | 81 | 65 | 1.42 |
| Carne di manzo | 65 | 5 | 1.32 |
| | 65 | 65 | 1.18 |
| Manzo, braciola ^b | 66 | 40-65 | 1.23 |
| Manzo, scamone ^b | 71 | 40-65 | 1.33 |
| Manzo, lingua ^b | 68 | 40-65 | 1.32 |
| Halibut | 76 | 40-65 | 1.47 |
| Prosciutto, affumicato | 64 | 5 | 1.18 |
| Prosciutto, affumicato | 64 | 40-65 | 1.38 |
| Acqua | – | 30 | 1.48 |
| | – | 65 | 1.60 |
| Ghiaccio | – | 0 | 11.82 |

Fonte: Singh (1982). Estratto da *Food Technology* 36(2), 87-91. Copyright © Institute of Food Technologists.

^a Nel caso di due temperature separate dalla virgola, la prima è la temperatura iniziale del campione e la seconda è la temperatura dell'ambiente.

^b I valori sono applicabili solo nel caso in cui i succhi essudati durante il riscaldamento rimangano all'interno del campione.

Tabella A.3.1 Proprietà fisiche dei metalli

| Metallo | Proprietà a 20°C | | | |
|--|--------------------------------|---------------------|-----------------|---|
| | ρ (kg/m ³) | c_p (kJ/kg °C) | k (W/m °C) | α ($\times 10^{-5}$ m ² /s) |
| Alluminio | | | | |
| Puro | 2707 | 0.896 | 204 | 8.418 |
| Al-Cu (Duralumin, 94-96% Al, 3-5% Cu, tracce Mg) | 2787 | 0.883 | 164 | 6.676 |
| Al-Si (Silumin, cuscinetti di rame: 86.5% Al, 1% Cu) | 2659 | 0.867 | 137 | 5.933 |
| Al-Si (Alusil, 78-80% Al, 20-22% Si) | 2627 | 0.854 | 161 | 7.172 |
| Al-Mg-Si, 97% Al, 1%Mg, 1% Si, 1% Mn | 2707 | 0.892 | 177 | 7.311 |
| Piombo | 11 373 | 0.130 | 35 | 2.343 |
| Ferro | | | | |
| Puro | 7897 | 0.452 | 73 | 2.034 |
| Acciaio | | | | |
| (C max = 1.5%): | | | | |
| Acciaio al carbonio | | | | |
| C = 0.5% | 7833 | 0.465 | 54 | 1.474 |
| 1.00% | 7801 | 0.473 | 43 | 1.712 |
| 1.50% | 7753 | 0.486 | 36 | 0.970 |
| Acciaio al nickel | | | | |
| Ni = 0% | 7897 | 0.452 | 73 | 2.026 |
| 20% | 7933 | 0.46 | 19 | 0.526 |
| 40% | 8169 | 0.46 | 10 | 0.279 |
| 80% | 8618 | 0.46 | 35 | 0.872 |
| Invar 36% Ni | 8137 | 0.46 | 10.7 | 0.286 |
| Acciaio al cromo | | | | |
| Cr = 0% | 7897 | 452 | 73 | 2.026 |
| 1% | 7865 | 0.46 | 61 | 1.665 |
| 5% | 7833 | 0.46 | 40 | 1.110 |
| 20% | 7689 | 0.46 | 22 | 0.635 |
| Cr-Ni (cromo-nickel) | | | | |
| 15% Cr, 10% Ni | 7865 | 0.46 | 19 | 0.526 |
| 18% Cr, 8% Ni (V2A) | 7817 | 0.46 | 16.3 | 0.444 |
| 20% Cr, 15% Ni | 7833 | 0.46 | 15.1 | 0.415 |
| 25% Cr, 20% Ni | 7865 | 0.46 | 12.8 | 0.361 |
| Acciaio al tungsteno | | | | |
| W = 0% | 7897 | 0.452 | 73 | 2.026 |
| W = 1% | 7913 | 0.448 | 66 | 1.858 |
| W = 5% | 8073 | 0.435 | 54 | 1.525 |
| W = 10% | 8314 | 0.419 | 48 | 1.391 |
| Rame | | | | |
| Puro | 8954 | 0.3831 | 386 | 11.234 |
| Bronzo all'alluminio (95% Cu, 5% Al) | 8666 | 0.410 | 83 | 2.330 |
| Bronzo (75%, 25% Sn) | 8666 | 0.343 | 26 | 0.859 |
| Ottone rosso (85% Cu, 9% Sn, 6% Zn) | 8714 | 0.385 | 61 | 1.804 |
| Ottone (70% Cu, 30% Zn) | 8522 | 0.385 | 111 | 3.412 |
| Alpaca (62% Cu, 15% Ni, 22% Zn) | 8618 | 0.394 | 24.9 | 0.733 |

Tabella A.3.1 (continua)

| Metallo | Proprietà a 20°C | | | |
|---|--------------------------------|---------------------|-----------------|---|
| | ρ (kg/m ³) | c_p (kJ/kg °C) | k (W/m °C) | α ($\times 10^{-5}$ m ² /s) |
| Constantana (60% Cu, 40% Ni) | 8922 | 0.410 | 22.7 | 0.612 |
| Magnesio | | | | |
| Puro | 1746 | 1.013 | 171 | 9.708 |
| Mg-Al (elettrolitico), 6-8% Al, 1-2% Zn | 1810 | 1.00 | 66 | 3.605 |
| Molibdeno | 10 220 | 0.251 | 123 | 4.790 |
| Nickel | | | | |
| Puro (99.9%) | 8906 | 0.4459 | 90 | 2.266 |
| Ni-Cr (90% Ni, 10% Cr) | 8666 | 0.444 | 17 | 0.444 |
| 80% Ni, 20% Cr | 8314 | 0.444 | 12.6 | 0.343 |
| Argento | | | | |
| Purissimo | 10 524 | 0.2340 | 419 | 17.004 |
| Puro (99.9%) | 10 524 | 0.2340 | 407 | 16.563 |
| Stagno, puro | 7304 | 0.2265 | 64 | 3.884 |
| Tungsteno | 19 350 | 0.1344 | 163 | 6.271 |
| Zinco, puro | 7144 | 0.3843 | 112.2 | 4.106 |

Fonte: Adattato da Holman (2002). Riprodotto con il permesso dell'editore.

Tabella A.3.2 Proprietà fisiche di non metalli

| Sostanza | Temperatura (°C) | k (W/m °C) | ρ (kg/m ³) | c (kJ/kg °C) | α ($\times 10^{-7}$ m ² /s) |
|----------------------------------|------------------|--------------|-----------------------------|----------------|--|
| Asfalto | 20-55 | 0.74-0.76 | | | |
| Mattoni | | | | | |
| Mattoni da costruzione, comuni | 20 | 0.69 | 1600 | 0.84 | 5.2 |
| Mattoni ignifughi, cotti a 133°C | 500 | 1.04 | 2000 | 0.96 | 5.4 |
| | 800 | 1.07 | | | |
| | 1100 | 1.09 | | | |
| Cemento, Portland | | 0.29 | 1500 | | |
| Malta cementata | 23 | 1.16 | | | |
| Calcestruzzo | 23 | 0.76 | | | |
| Vetro, finestra | 20 | 0.78 (avg) | 2700 | 0.84 | 3.4 |
| Intonaco, gesso | 20 | 0.48 | 1440 | 0.84 | 4.0 |
| Rete metallica | 20 | 0.47 | | | |
| Rete di legno | 20 | 0.28 | | | |

Tabella A.3.2 (continua)

| Sostanza | Temperatura (°C) | k (W/m °C) | ρ (kg/m ³) | c (kJ/kg °C) | α ($\times 10^{-7}$ m ² /s) |
|---|-----------------------|-----------------|--------------------------------|-------------------|---|
| Pietra | | | | | |
| Granito | 100-300 | 1.73-3.98 | 2640 | 0.82 | 8-18 |
| Calcare | | 1.26-1.33 | 2500 | 0.90 | 5.6-5.9 |
| Marmo | | 2.07-2.94 | 2500-2700 | 0.80 | 10-13.6 |
| Arenaria | 40 | 1.83 | 2160-2300 | 0.71 | 11.2-11.9 |
| Legno (tra le venature) | | | | | |
| Cipresso | 30 | 0.097 | 460 | | |
| Abete | 23 | 0.11 | 420 | 2.72 | 0.96 |
| Acero o rovere | 30 | 0.166 | 540 | 2.4 | 1.28 |
| Pino giallo | 23 | 0.147 | 640 | 2.8 | 0.82 |
| Pino bianco | 30 | 0.112 | 430 | | |
| Amianto | | | | | |
| Leggermente impaccato | -45 | 0.149 | | | |
| | 0 | 0.154 | 470-570 | 0.816 | 3.3-4 |
| | 100 | 0.161 | | | |
| Fogli | 51 | 0.166 | | | |
| Cartone, corrugato | - | 0.064 | | | |
| Fogli di sughero, 160 kg/m ³ | 30 | 0.043 | 160 | | |
| Sughero, ricostituito | 32 | 0.045 | 45-120 | 1.88 | 2-5.3 |
| Terreno | 32 | 0.043 | 150 | | |
| Farina fossile (Sil-o-cel) | 0 | 0.061 | 320 | | |
| Fibra, pannelli isolanti | 20 | 0.048 | 240 | | |
| Lana di vetro, 24 kg/m ³ | 23 | 0.038 | 24 | 0.7 | 22.6 |
| Magnesia, 85% | 38 | 0.067 | 270 | | |
| | 93 | 0.071 | | | |
| | 150 | 0.074 | | | |
| | 204 | 0.080 | | | |
| Lana di roccia, 24 kg/m ³ | 32 | 0.040 | 160 | | |
| | Leggermente impaccata | 150 | 0.067 | 64 | |
| | | 260 | 0.087 | | |
| Segatura | 23 | 0.059 | | | |
| Truciolo | 23 | 0.059 | | | |

Fonte: adattato da Holman (2002). Riprodotto con il permesso dell'editore.

gas atmosferici

Tabella 6.2. Calore specifico dei gas atmosferici.

| T (°C) | $J/(kg)(K)$ | | | | |
|-----------|-------------|-------|--------|-----------------|------|
| | O_2 | N_2 | CO_2 | H_2O_{vapore} | Aria |
| 25 | 916 | 1037 | 847 | 1863 | 1007 |
| 50 | 919 | 1039 | 858 | 1868 | 1008 |
| 100 | 926 | 1041 | 879 | 1880 | 1011 |
| 150 | 934 | 1044 | 899 | 1891 | 1014 |
| 200 | 938 | 1047 | 920 | 1903 | 1017 |
| 250 | 945 | 1049 | 941 | 1914 | 1020 |

Tabella A.4.4 Proprietà fisiche dell'aria secca a pressione atmosferica
aria secca

| Temperatura | | Densità (ρ) (kg/m ³) | Coefficiente di espansione volumetrica (β) ($\times 10^{-4} \text{ K}^{-1}$) | Calore specifico (c_p) (kJ/[kg K]) | Conducibilità termica (k) (W/[m K]) | Diffusività termica (α) ($\times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$) | Viscosità (μ) ($\times 10^{-6} \text{ N s/m}^2$) | Viscosità cinematica (ν) ($\times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$) | Numero di Prandtl (N_{Pr}) |
|-------------|------------|---|--|---|--|---|--|---|--------------------------------------|
| t (°C) | T (K) | | | | | | | | |
| -20 | 253.15 | 1.365 | 3.97 | 1.005 | 0.0226 | 16.8 | 16.279 | 12.0 | 0.71 |
| 0 | 273.15 | 1.252 | 3.65 | 1.011 | 0.0237 | 19.2 | 17.456 | 13.9 | 0.71 |
| 10 | 283.15 | 1.206 | 3.53 | 1.010 | 0.0244 | 20.7 | 17.848 | 14.66 | 0.71 |
| 20 | 293.15 | 1.164 | 3.41 | 1.012 | 0.0251 | 22.0 | 18.240 | 15.7 | 0.71 |
| 30 | 303.15 | 1.127 | 3.30 | 1.013 | 0.0258 | 23.4 | 18.682 | 16.58 | 0.71 |
| 40 | 313.15 | 1.092 | 3.20 | 1.014 | 0.0265 | 24.8 | 19.123 | 17.6 | 0.71 |
| 50 | 323.15 | 1.057 | 3.10 | 1.016 | 0.0272 | 26.2 | 19.515 | 18.58 | 0.71 |
| 60 | 333.15 | 1.025 | 3.00 | 1.017 | 0.0279 | 27.6 | 19.907 | 19.4 | 0.71 |
| 70 | 343.15 | 0.996 | 2.91 | 1.018 | 0.0286 | 29.2 | 20.398 | 20.65 | 0.71 |
| 80 | 353.15 | 0.968 | 2.83 | 1.019 | 0.0293 | 30.6 | 20.790 | 21.5 | 0.71 |
| 90 | 363.15 | 0.942 | 2.76 | 1.021 | 0.0300 | 32.2 | 21.231 | 22.82 | 0.71 |
| 100 | 373.15 | 0.916 | 2.69 | 1.022 | 0.0307 | 33.6 | 21.673 | 23.6 | 0.71 |
| 120 | 393.15 | 0.870 | 2.55 | 1.025 | 0.0320 | 37.0 | 22.555 | 25.9 | 0.71 |
| 140 | 413.15 | 0.827 | 2.43 | 1.027 | 0.0333 | 40.0 | 23.340 | 28.2 | 0.71 |
| 150 | 423.15 | 0.810 | 2.37 | 1.028 | 0.0336 | 41.2 | 23.732 | 29.4 | 0.71 |
| 160 | 433.15 | 0.789 | 2.31 | 1.030 | 0.0344 | 43.3 | 24.124 | 30.6 | 0.71 |
| 180 | 453.15 | 0.755 | 2.20 | 1.032 | 0.0357 | 47.0 | 24.909 | 33.0 | 0.71 |
| 200 | 473.15 | 0.723 | 2.11 | 1.035 | 0.0370 | 49.7 | 25.693 | 35.5 | 0.71 |
| 250 | 523.15 | 0.653 | 1.89 | 1.043 | 0.0400 | 60.0 | 27.557 | 42.2 | 0.71 |

Fonte: adattato da Raznjevic (1978).

In assenza di altre forme di energia (differenti dal calore) e **in assenza di passaggi di stato** (vaporizzazioni, fusioni, sublimazioni, ecc.), le variazioni di temperatura di una sostanza a seguito di uno scambio di calore sono regolate dalla seguente relazione, ottenuta **applicando il primo principio della termodinamica**:

$$Q_{1,2} = m C_p (T_2 - T_1) ,$$

in cui

$Q_{1,2}$ → indica la quantità di calore scambiata,

C_p → calore specifico

T_1 e T_2 → le temperature prima e dopo lo scambio di calore

m → la massa del materiale interessata.

per $m = 1 \text{ g}$ e $(T_2 - T_1) = 1 \text{ }^\circ \text{C}$ si ha che: $Q_{1,2} = C_p$

cioè che la quantità di calore scambiata corrisponde al calore specifico;

per l'acqua avremo che:

- 1 cal/g ° C scambiata corrisponde a 4,1868 J/g ° C.

PASSAGGI DI STATO

➤ Se una sostanza si trova nelle condizioni fisiche corrispondenti ad un passaggio di stato - ad esempio, per l'acqua, in condizioni di evaporazione a $T=100^{\circ}$ C e $P= 1$ atm, o $T=80,8^{\circ}$ C e $P= 0,5$ atm - uno *scambio di calore* con l'ambiente esterno non comporta *alcuna variazione di temperatura*, ma un progressivo **passaggio di stato** della massa della sostanza.

➤ In questo caso per calcolare il calore scambiato si usa la seguente relazione (ottenibile applicando il primo principio della termodinamica):

$$Q_{1,2} = m h_s ,$$

dove h_s è il calore necessario al passaggio di stato della massa m a temperatura costante (**calore latente**).

➤ In base a ciò si definisce **calore di fusione** *la quantità di calore necessaria per far passare 1 g di sostanza dallo stato solido a quello liquido, a temperatura costante*. Tale quantità corrisponde a quella che è necessario sottrarre ad 1 g di liquido per provocarne la solidificazione (per **acqua 80 cal/g**).

➤ Il **calore di vaporizzazione** invece definisce *la quantità di calore che deve essere fornita ad 1 g di sostanza allo stato liquido per indurne la vaporizzazione a temperatura costante*.

✓ A seconda della temperatura alla quale avviene la trasformazione questa quantità di calore varia; per l'acqua ad esempio

✓ La vaporizzazione dell'acqua a P ambiente e a 100° C richiede **539,61 cal/g** o Kcal/Kg, mentre a 100 atm l'acqua vaporizza a 179° C richiedendo **481,50 cal/g**.

➤ Questa quantità di calore prende il nome di **calore latente**; mentre con il termine **calore sensibile** si indica la quantità di calore che è necessaria per portare una certa quantità di sostanza da una temperatura ad un'altra, comunque inferiori alla temperatura di vaporizzazione.

➤ A P ambiente la quantità di calore necessaria per innalzare, o abbassare di 1°C , la temperatura di 1 Kg di acqua (tra 0 e 100°C) corrisponde all'incirca ad 1Kcal.

→ Infine il **calore di sublimazione** definisce la *quantità di calore necessaria per portare 1 g di sostanza dallo stato solido allo stato aeriforme a temperatura costante.*

→ Durante i passaggi di stato i calori di fusione, vaporizzazione o sublimazione sono espressi in **Kcal/Kg o in J/Kg.**

ENTALPIA

L'**entalpia (H)** - chiamata anche calore totale o contenuto termico, è definita dalla relazione:

$$\mathbf{H = E + PVs}, \quad \text{dove } E \text{ è l'energia interna}$$

P è la pressione e
Vs è il volume specifico (*)

(*) Il *volume specifico* (Vs) per una determinata sostanza rappresenta il volume occupato dall'unità di densità della sostanza. Vs è legato alla massa del corpo (m) e al suo volume (V) dalla relazione:

$$Vs = V / m, \quad \text{ed è misurato in } m^3/Kg \text{ o } cm^3/g$$

La densità $\rho = m / V$, quindi
 $= 1 / Vs$ è misurata in Kg/m^3 o g/cm^3 .

-Il termine PV_s può essere trascurato, in quanto esso rappresenta un lavoro di espansione o compressione eseguito dal o sul sistema; l'entalpia si riduce così al solo termine di *energia interna*.

- Essa è una energia per unità di massa, ed è quindi misurata in **KJ/Kg**; molto diffusa è anche l'unità pratica **KCal/Kg**.

Il valore dell'entalpia è sempre relativo ad uno stato di riferimento, arbitrariamente scelto, al quale l'entalpia è posta uguale a zero. Spesso si prende come stato di riferimento l'acqua allo stato liquido e alla temperatura di 0°C .

In questo modo il cambiamento di entalpia di un componente tra lo stato di riferimento convenzionale e lo stato corrente può essere considerato come il valore relativo di entalpia del componente considerato

LE TEMPERATURE E I PROCESSI DEGLI ALIMENTI

| | |
|----------|--|
| -40 °C | CONGELAMENTO/ SURGELAZIONE |
| -18 °C | STOCCAGGIO SURGELATI |
| 0 °C | T SOLIDIFICAZIONE ACQUA PURA |
| + 1-2 °C | IPER-REFRIGERAZIONE |
| 20 °C | TEMPERATURA AMBIENTE (convenzionale) |
| 40 °C | EVAPORAZIONE A BASSA PRESSIONE |
| 60 °C | DISTILLAZIONE |
| 80 °C | BLANCHING, PASTORIZZAZIONE |
| 100 °C | T EBOLL. H ₂ O PURA (1 ATM), COTTURA, EVAPORAZIONE, DISTILLAZIONE |
| 121 °C | STERILIZZAZIONE (autoclave) |
| 140 °C | STERILIZZAZIONE (UHT), COTTURA IN FORNO, COTTURA-ESTRUSIONE |
| 160 °C | FRITTURA |
| 180 °C | TOSTATURA NOCCIOLE |
| 200 °C | TOSTATURA CAFFE' |
| 220-240 | TOSTATURA CAFFE' ("italian style") |

TRASPORTO DEL CALORE:

1.1 "PERCHE' "

| RIMOZIONE DI CALORE | | - q + | SOMMINISTRAZIONE DI CALORE | |
|--------------------------------|-------------------------------------|-------|----------------------------------|------------------------------------|
| ESEMPI | MOTIVAZ./EFFETTI | | MOTIVAZ./EFFETTI | ESEMPI |
| REFRIGERAZIONE SURGELAZIONE | DIMINUZIONE TEMPERATURA | | AUMENTO TEMPERATURA | RISCALDAMENTO |
| CONGELAMENTO | CAMBIAMENTO DI STATO (Hf) | | CAMBIAMENTO DI STATO (Hv, Hs) | EVAPORAZIONE DISIDRATAZIONE |
| STABILIZZAZIONE | RALLENTAMENTO REAZIONI | | ATTIVAZIONE REAZIONI | N.E.B. |
| CONSERVAZIONE ALIMENTI | INIBIZIONE SVILUPPO MICROB. | | ATTIVAZIONE SVILUPPO MICROB. | PROCESSI FERMENTATIVI |
| CONSERVAZIONE CEPPI (-40°C) | BLOCCO ATTIVITA' | | DISATTIVAZIONE MICROORGANIS. | PASTORIZZAZIONE STERILIZZAZIONE |
| | RALLENTAMENTO ATTIVITA' ENZIMAT. | | DISATTIVAZIONE ENZIMI | BLANCHING |
| | | | DENATURAZIONE AMIDI, PROTEINE | COTTURA |
| SOLUTI GASSOSI | AUMENTO SOLUBILITA' | | AUMENTO SOLUBILITA' | MISCELAZIONE SOLUTI SOLIDI |
| EFFETTI GHIACCIO; EMULSIONI | CAMBIAMENTO STRUTTURA | | CAMBIAMENTO STRUTTURA | COTTURA ESTRUSIONE |

trasporto del calore:

2. I "COME "

TRASMISSIONE DEL CALORE: ESEMPIO DI **OPERAZIONE UNITARIA**

(Intervento che viene studiato in quanto tale, indipendentemente dall'alimento su cui si esercita, cercando di individuare le leggi - della fisica, della chimica, della scienza in genere - che ne governano l'evoluzione)

LEGGE GENERAL DEI PROCESSI DI TRASPORTO:

$$dQ / dt = f.m. / R$$

Q = quantità di materia o di energia

t= tempo

f.m. = forza motrice

R= insieme di resistenze

Se Q = carica elettrica

$$dQ / dt = I = \Delta V / R$$

(**LEGGE DI OHM**)

Se Q = massa G

$$dG / dt = \Delta C / R$$

(**LEGGE DI FICK**)

Se Q = calore

$$dq / dt = \Delta T / R$$

(**LEGGE DI FOURIER**)

IL CALORE SI DIFFONDE PER:

- **CONDUZIONE** (nei solidi, o fluidi fermi)
- **CONVEZIONE** (nei fluidi, TRASFERIMENTO DI ENERGIA + TRASFERIMENTO DI MATERIA $\Rightarrow N_{Re}$, N_{nu} , N_{Pr})
- **IRRAGGIAMENTO** (ovunque, per trasmissione di onde elettromagnetiche)

IL CALORE SI DIFFONDE PER:

- **CONDUZIONE** (nei solidi, o fluidi fermi)

$$q = -k A \frac{dT}{dx}$$

*Legge di Fourier della
conduzione di calore:*

K = conducibilità termica

il gradiente dT è sempre negativo (perché il calore passa dalla T_{magg} alla T_{min}) \Rightarrow il flusso di calore è positivo nel verso delle temperature decrescenti.

IL CALORE SI DIFFONDE PER:

- **CONVEZIONE** (nei fluidi)

$$q = h A (T_s - T_\infty) \quad \text{legge di raffreddamento di Newton}$$

h = coefficiente convettivo (o coefficiente di pellicola)

il moto del fluido può essere

- naturale: moto *per differenza di densità (flottazione)*, a causa di differenze di Temperatura del sistema
- forzato (con mezzi meccanici, da una pompa o da un ventilatore)
- lineare o turbolento, in entrambi i casi (naturale o forzato)

per il calcolo del coefficiente di pellicola

vedi dopo, per determinazione
del flusso convettivo,
approccio empirico (N_{Re} , N_{Nu} ,
 N_{Pr})



Tabella 3.1 Alcuni valori approssimati del coefficiente convettivo di scambio termico

| Fluido | Coefficiente convettivo di scambio termico (W/[m ² K]) |
|----------------------------|---|
| Aria | |
| Convezione libera | 5-25 |
| Convezione forzata | 10-200 |
| Acqua | |
| Convezione libera | 20-100 |
| Convezione forzata | 50-10 000 |
| Acqua in ebollizione | 3000-100 000 |
| Vapore d'acqua condensante | 5000-100 000 |



IL CALORE SI DIFFONDE PER:

- **IRRAGGIAMENTO** (ovunque, per trasmissione di onde elettromagnetiche)

Per i corpi grigi (corpi reali):

$$q = \varepsilon A \sigma T^4$$

$$0 < \varepsilon < 1$$

ε (emissività) indica la similitudine tra il comportamneto della superficie reale e quella del corpo nero (=1)

N.B.: la trasmissione di calore per irraggiamento può avvenire anche nel vuoto

Tabella A.3.3 Emissività di diverse superfici

| Materiale | Lunghezza d'onda e temperatura media | | | | |
|--|--------------------------------------|-----------------------------|-----------------------------|------------------------------|----------------------------|
| | 9.3 μm 38 °C | 5.4 μm 260 °C | 3.6 μm 540 °C | 1.8 μm 1370 °C | 0.6 μm Solar |
| Metalli | | | | | |
| Alluminio | | | | | |
| Lucido | 0.04 | 0.05 | 0.08 | 0.19 | ~0.3 |
| Ossidato | 0.11 | 0.12 | 0.18 | 0.96 | 5.4 |
| Dopo 24 h in condizioni ambientali | 0.4 | 0.32 | 0.27 | | |
| Copertura di superficie | 0.22 | 1.09 | | | |
| Anodizzato (a 1000°F) | 0.94 | 0.42 | 0.60 | 0.34 | |
| Ottone | | | | | |
| Lucido | 0.10 | 0.10 | | | |
| Ossidato | 0.61 | | | | |
| Cromo, lucido | 0.08 | 0.17 | 0.26 | 0.40 | 0.49 |
| Rame | | | | | |
| Lucido | 0.04 | 0.05 | 0.18 | 0.17 | |
| Ossidato | 0.87 | 0.83 | 0.77 | | |
| Ferro | | | | | |
| Lucido | 0.06 | 0.08 | 0.13 | 0.25 | 0.45 |
| Getto, ossidato | 0.63 | 0.66 | 0.76 | | |
| Zincato, nuovo | 0.23 | – | – | 0.42 | 0.66 |
| Zincato, usato | 0.28 | – | – | 0.90 | 0.89 |
| Lamiera di acciaio, grezzo | 0.94 | 0.97 | 0.98 | | |
| Ossido | 0.96 | – | 0.85 | – | 0.74 |
| Magnesio | 0.07 | 0.13 | 0.18 | 0.24 | 0.30 |
| Argento, lucido | 0.01 | 0.02 | 0.03 | – | 0.11 |
| Acciaio inossidabile | | | | | |
| 18-8, lucido | 0.15 | 0.18 | 0.22 | | |
| 18-8, in condizioni ambientali | 0.85 | 0.85 | 0.85 | | |
| Tubo di acciaio | | | | | |
| Ossidato | – | 0.80 | | | |
| Filamento di tungsteno | 0.03 | – | – | ~0.18 | 0.36 ^a |
| Zinco | | | | | |
| Lucido | 0.02 | 0.03 | 0.04 | 0.06 | 0.46 |
| Lamiera zincata | ~0.25 | | | | |
| Materiale da costruzione e isolamento | | | | | |
| Asfalto | 0.93 | – | 0.9 | – | 0.93 |
| Mattoni | | | | | |
| Rossi | 0.93 | – | – | – | 0.7 |
| Ignifughi | 0.9 | – | ~0.7 | ~0.75 | |
| Di silice | 0.9 | – | ~0.75 | 0.84 | |
| Magnesite refrattari | 0.9 | – | – | ~0.4 | |

Tabella A.3.3 Emissività di diverse superfici (continua)

| Materiale | Lunghezza d'onda e temperatura media | | | | |
|----------------------------------|--------------------------------------|----------------------------|----------------------------|-----------------------------|----------------------------|
| | 9.3 μm 38°C | 5.4 μm 260°C | 3.6 μm 540°C | 1.8 μm 1370°C | 0.6 μm Solar |
| Smalto, bianco | 0.9 | | | | |
| Carta, bianca | 0.95 | – | 0.82 | 0.25 | 0.28 |
| Intonaco | 0.91 | | | | |
| Coperture | 0.93 | | | | |
| Acciaio smaltato, bianco | – | – | – | 0.65 | 0.47 |
| Vernici | | | | | |
| Lacca alluminata | 0.65 | 0.65 | | | |
| Lacca nera | 0.96 | 0.98 | | | |
| Vernice nero fumo | 0.96 | 0.97 | – | 0.97 | 0.97 |
| Vernice rossa | 0.96 | – | – | – | 0.74 |
| Vernice gialla | 0.95 | – | 0.5 | – | 0.30 |
| Colori a olio (tutti i colori) | ~0.94 | ~0.9 | | | |
| Bianco (ZnO) | 0.95 | – | 0.91 | – | 0.18 |
| Misto | | | | | |
| Ghiaccio | ~0.97 ^b | | | | |
| Acqua | ~0.96 | | | | |
| Carbone, T-carbonio, 0.9% cenere | 0.82 | 0.80 | 0.79 | | |
| Legno | ~0.93 | | | | |
| Vetro | 0.90 | – | – | – | (Bassa) |

Fonte: adattato da Kreith (1973). Copyright © dell'editore 1973 Harper and Row Publishers, Inc. Ristampato con permesso.
^aA 3315°C
^bA 0°C