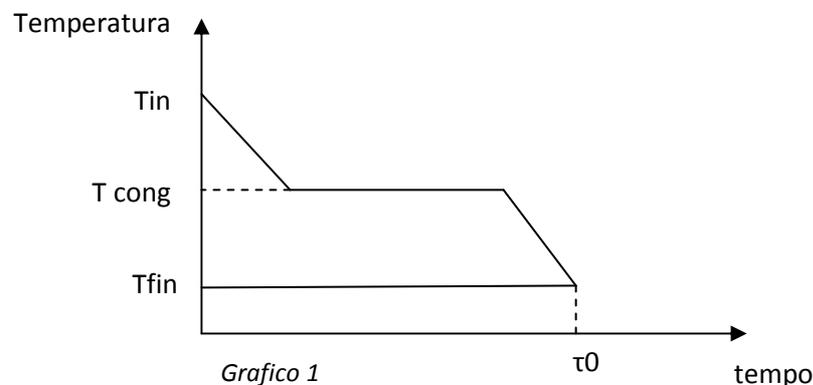


A livello industriale è importante conoscere il tempo necessario per il congelamento degli alimenti. Per questa operazione infatti il consumo energetico che tale operazione comporta diventa un fattore secondario rispetto alla prestazione, ovvero la velocità con cui l'alimento viene congelato.

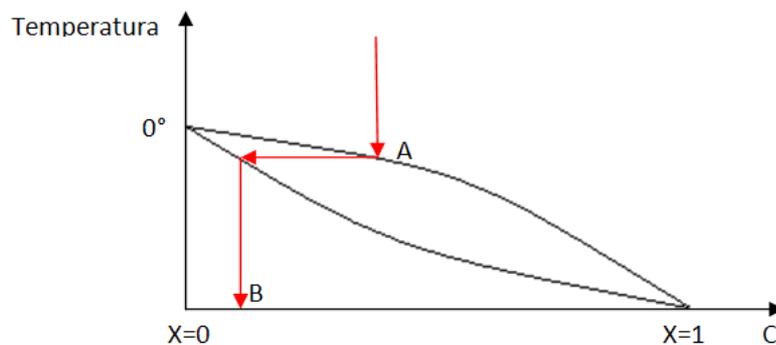
Andiamo però ugualmente ad operare un'analisi energetica. Ho un corpo che si trova a T_{in} (maggiore della temperatura di congelamento) e devo portarlo fino a T_{fin} (minore della temperatura di congelamento) alla fine del processo.

L'andamento della temperatura potrebbe essere come quella illustrata nel grafico seguente (Grafico 1)



Però come vedremo, tale grafico è errato a causa della natura "acquosa" dei corpi: sono infatti tutti soluzioni avente come solvente l'acqua e come soluti delle proteine, dei grassi, ecc...

Le soluzioni acquose, durante il cambiamento di fase, si comportano come soluzioni ideali, il cui andamento è evidenziato nel grafico 2: vengono rappresentate le temperature in funzione della concentrazione C del soluto nel solvente, espresso in frazione molare X



Se ad esempio avessimo acqua pura, cioè un'assenza di soluti ($X=0$), allora l'acqua solidificherebbe a 0°C . Se ipotizziamo ora di avere una soluzione acquosa con concentrazione pari ad $X(A)$, nel punto A (con $T(A) < 0^{\circ}\text{C}$) la soluzione comincia a ghiacciare. Il ghiaccio che si viene a formare ha concentrazione salina pari a $X(B)$, inferiore dunque alla concentrazione salina della fase liquida.

Poiché l'acqua è in soluzione con dei sali, non ghiaccia a 0°C ma ad una temperatura inferiore: tale fenomeno è denominato abbassamento crioscopico.

Il primo ghiaccio che si forma avrà una concentrazione di Sali notevolmente inferiore di quella presente nella soluzione acquosa iniziale. Man mano che si forma ghiaccio, questo avrà una concentrazione salina sempre crescente: l'ultima "goccia" d'acqua che solidifica avrà una concentrazione di sali notevolmente maggiore rispetto alla soluzione acquosa di partenza.

Quindi la temperatura di inizio congelamento non è più 0°C , come sarebbe stato nel caso avessimo solo acqua, ma corrisponde ad un valore inferiore. Inoltre la fase liquida ha concentrazione differente da quella solida.

La temperatura dovrà quindi scendere al di sotto di un certo valore (ad es. -25°C) per congelare l'intera parte liquida presente nell'alimento oggetto del processo. Se interrompessi il congelamento a temperature superiori a tale valore, allora resterebbero parti liquide all'interno dell'alimento.

L'equazione dell'energia per il congelamento di una sostanza ideale (che si comporta come nel grafico 1) è la seguente:

$$\Delta H = M * C_{pl} * (T_{in} - T_c) + M * L + M * C_{pg} * (T_c - T_{fin}) \quad (1)$$

Con: L: calore latente di fusione (per l'acqua 333KJ/Kg);

C_{pg} : calore specifico ghiaccio [$\text{J/Kg}^{\circ}\text{K}$]

C_{pl} : calore specifico liquido

T_{in} : temperatura all'inizio del processo

T_c : temperatura alla quale ha inizio il congelamento della sostanza

T_{fin} : temperatura alla quale ha fine il processo

Nel caso delle soluzioni ideali invece avrò:

$$\Delta H_{gr} = M_{gr} * C_{pgr} * (T_{in} - T_{fin})$$

La parte di grasso della soluzione deve essere trattata a parte, mentre per il resto della soluzione possiamo scrivere:

$$\begin{aligned} \Delta H_{sol} = & M_{sol} * C_{psol} * (T_{in} - T_{ic}) \\ & + \int_{T_{ic}}^{T_{fc}} M_{liq} * C_{psol, liq} * dT \\ & + \int_{M_i=0}^{M_{sol}} L(T) * dM \\ & + \int_{T_{ic}}^{T_{fc}} M_g * C_{psol, g} * dT + M_{sol} * C_{psol, g} * (T_{fc} - T_{fin}) \end{aligned}$$

Con $C_{p_{sol}}$: calore specifico della soluzione

T_{ic} : temperatura di inizio congelamento

T_{fc} : temperatura a cui termina il congelamento

$M_i=0$: massa iniziale di ghiaccio (pari a 0)

M_{sol} : massa finale di ghiaccio (ovvero la massa dell'intera soluzione)

Dove i tre integrali descrivono la parte "problematica" del problema (corrispondente nel grafico 2 al tratto che va dalla temperatura di inizio congelamento a quella di fine), ovvero quella che è più difficoltosa modellare con un'equazione matematica teorica.

Tale equazione risulta molto complessa, perciò faremo ricorso ad equazioni sperimentali.

Esempio

Ho salsa di mele a 20°C e la voglio congelare fino a -18°C. Calcolo il salto entalpico necessario:

$$\Delta = h_{in} - h_{fin} = [C_p * (T_{in} - T_c) + h(0^\circ C)] - h(-18^\circ C) \\ = (343 + 3,73 * 20) - 58 = 359,6 \text{ KJ/Kg}$$

Da grafico ricavo i valori di h_{fin} , C_p e $h(0^\circ)$. Trovo l'entalpia che la macchina frigorifera dovrà sottrarre alla salsa di mele per ghiacciarla

Vado ora valutare la differenza rispetto alla soluzione che avrei ottenuto se avessi operato secondo la (1)

$$\Delta h = 4,187 * 20 + 333 + 2,1 * 18 = 454,54 \text{ KJ/Kg}$$

Moltiplico ora tale valore per la percentuale d'acqua presente nella salsa di mele

$$454,54 * 0,828 = 376,3 \text{ KJ/Kg}$$

Quindi se non avessi le tabelle coi dati sperimentali potrei usare anche il modello più impreciso, descritto dall'equazione (1), sapendo che tale soluzione presenterà però un certo errore di approssimazione.

Esercizio

Voglio calcolare l'entalpia che devo sottrarre a delle fragole per portarle da T_{in} a T_{fin}

$$M=250 \text{ Kg}$$

$$T_{in}=15^\circ \text{C}$$

$$T_{fin}=-10^\circ \text{C}$$

$$C_p=3,94 \text{ KJ/(Kg*K)}$$

$$h(0^\circ)=367 \text{ KJ/Kg}$$

$$h(-10^\circ)=76 \text{ KJ/Kg}$$

$$\Delta H = M * (h_{in} - h_{fn}) = M * \{ [C_p * (T_{in} - T_c) + 367] - 76 \} = 87525KJ$$

Esistono poi delle altre tabelle denominate "Thermal and Related Properties of Food and Food Materials"

31.2

Table 1 Thermal and Related Properties of Food and Food Materials

Food or Food Material	Water Content, % (mass) ^a	Highest Freezing Point, °C ^b	Specific Heat ^c Above Freezing, kJ/kg·°C	Specific Heat ^c Below Freezing, kJ/kg·°C	Latent Heat of Fusion, ^d kJ/kg
<i>Vegetables</i>					
Artichokes, Globe	84	-1.2	3.78	1.90	281
Artichokes, Jerusalem	80	-2.5	3.68	1.85	268
Asparagus	93	-0.6	4.00	2.01	312
Beans, Snap	89	-0.7	3.90	1.96	298
Beans, Lima	67	-0.6	3.35	1.68	224
Beans, Dried	11	—	1.95	0.98	37
Beets, Roots	88	-1.1	3.88	1.95	295
Broccoli	90	-0.6	3.93	1.97	302
Brussels Sprouts	85	-0.8	3.80	1.91	285
Cabbage, Late	92	-0.9	3.98	2.00	308
Carrots, Roots	88	-1.4	3.88	1.95	295
Cauliflower	92	-0.8	3.98	2.00	308
Celery	88	-0.9	3.88	1.95	295
Celery	94	-0.5	4.03	2.02	315
Collards	87	-0.8	3.85	1.94	291
Corn, Sweet	74	-0.6	3.53	1.77	248
Cucumbers	96	-0.5	4.08	2.05	322
Eggplant	93	-0.8	4.00	2.01	312
Endive (Escarole)	93	-0.1	4.00	2.01	312
Garlic	61	-0.8	3.20	1.61	204
Ginger, Rhizomes	87	—	3.85	1.94	291
Horseradish	75	-1.8	3.55	1.79	251
Kale	87	-0.5	3.85	1.94	291
Kohlrabi	90	-1.0	3.93	1.97	302
Leeks	85	-0.7	3.80	1.91	285
Lettuce	95	-0.2	4.06	2.04	318
Mushrooms	91	-0.9	3.95	1.99	305
Okra	90	-1.8	3.93	1.97	302
Onions, Green	89	-0.9	3.90	1.96	298
Onions, Dry	88	-0.8	3.88	1.95	295
Parsley	85	-1.1	3.80	1.91	285
Parsnips	79	-0.9	3.65	1.84	265
Peas, Green	74	-0.6	3.53	1.77	248
Peas, Dried	12	—	1.97	0.99	40
Peppers, Dried	12	—	1.97	0.99	40
Peppers, Sweet	92	-0.7	3.98	2.00	308
Potatoes, Early	81	-0.6	3.70	1.86	271
Potatoes, Main Crop	78	-0.6	3.63	1.82	261
Potatoes, Sweet	69	-1.3	3.40	1.71	251
Yams	74	—	3.53	1.77	248
Pumpkins	91	-0.8	3.95	1.99	305
Radishes	95	-0.7	4.06	2.04	318
Rhubarb	95	-0.9	4.06	2.04	318
Rutabagas	89	-1.1	3.90	1.96	298
Salsify	79	-1.1	3.65	1.84	265
Spinach	93	-0.3	4.00	2.01	312
Squash, Summer	94	-0.5	4.03	2.02	315
Squash, Winter	85	-0.8	3.80	1.91	285
Tomatoes, Mature Green	93	-0.6	4.00	2.01	312
Tomatoes, Ripe	94	-0.5	4.03	2.02	315
Turnip Greens	90	-0.2	3.93	1.97	302
Turnip	92	-1.1	3.98	2.00	308
Watercress	93	-0.3	4.00	2.01	312
<i>Fruits</i>					
Apples, Fresh	84	-1.1	3.78	1.90	281
Apples, Dried	24	—	2.27	1.14	80
Apricots	85	-1.1	3.80	1.91	285
Avocados	65	-0.3	3.30	1.66	218
Bananas	75	-0.8	3.55	1.79	251
Blackberries	85	-0.8	3.80	1.91	285
Blackberries	82	-1.6	3.73	1.87	275
Cantaloupes	92	-1.2	3.98	2.00	308
Cherries, Sour	84	-1.7	3.78	1.90	281
Cherries, Sweet	80	-1.8	3.68	1.85	268
Cranberries	87	-0.9	3.85	1.94	291
Currants	85	-1.0	3.80	1.91	285
Dates, Cured	20	-15.7	2.17	1.09	67
Figs, Fresh	78	-2.4	3.63	1.82	261
Figs, Dried	23	—	2.25	1.13	77
Gooseberries	89	-1.1	3.90	1.96	298

Table 1 (continued)

Food or Food Material	Water Content, % (mass) ^a	Highest Freezing Point, °C ^b	Specific Heat ^c Above Freezing, kJ/kg·°C	Specific Heat ^c Below Freezing, kJ/kg·°C	Latent Heat of Fusion, ^d kJ/kg
Grapefruit	89	-1.1	3.90	1.96	298
Grapes, American	82	-1.6	3.73	1.87	275
Grapes, Vinifera	82	-2.1	3.73	1.87	275
Lemons	89	-1.4	3.90	1.96	298
Limes	86	-1.6	3.83	1.92	288
Mangoes	81	-0.9	3.70	1.86	271
Melons, Casaba	93	-1.1	4.00	2.01	312
Melons, Crenshaw	93	-1.1	4.00	2.01	312
Melons, Honeydew	93	-0.9	4.00	2.01	312
Melons, Persian	93	-0.8	4.00	2.01	312
Melons, Watermelon	93	-0.4	4.00	2.01	312
Nectarines	82	-0.9	3.73	1.87	275
Olives	75	-1.4	3.55	1.79	251
Oranges	87	-0.8	3.85	1.94	292
Oranges, Fresh	89	-0.9	3.90	1.96	298
Peaches, Fresh	25	—	2.30	1.16	84
Peaches, Dried	63	-1.6	3.75	1.89	278
Pears	78	-2.2	3.63	1.82	261
Persimmons	85	-1.0	3.80	1.91	285
Pineapples	86	-0.8	3.83	1.92	288
Plums	82	-3.0	3.73	1.87	275
Pomegranates	28	—	2.37	1.19	94
Prunes	82	-2.0	3.80	1.91	285
Quinces	85	—	2.12	1.07	60
Raisins	18	—	3.70	1.86	271
Raspberries	81	-0.6	3.93	1.97	302
Strawberries FRAGOLE	90	-0.8	3.95	1.94	291
Tangerines	87	-1.1	3.85	1.94	291
<i>Whole Fish</i>					
Haddock - Cod	78	-2.2	3.63	1.82	261
Halibut	75	-2.2	3.55	1.79	251
Herring, Kippered	70	-2.2	3.43	1.72	235
Herring, Smoked	64	-2.2	3.28	1.65	214
Menhaden	62	-2.2	3.23	1.62	208
Salmon	64	-2.2	3.28	1.65	214
Tuna	70	-2.2	3.43	1.72	235
<i>Filets or Steaks</i>					
Haddock-Cod-Perch	80	-2.2	3.68	1.85	268
Hake - Whiting	82	-2.2	3.73	1.87	275
Pollock	79	-2.2	3.65	1.84	265
Mackerel	57	-2.2	3.10	1.56	191
<i>Shell Fish</i>					
Scallop, Meat	80	-2.2	3.68	1.85	268
Shrimp	83	-2.2	3.75	1.89	278
Lobster, American	79	-2.2	3.65	1.84	265
Oysters - Clams, Meat and Liquor	87	-2.2	3.85	1.94	291
Oyster in Shell	80	-2.8	3.68	1.85	268
<i>Beef</i>					
Carcass (60% Lean)	49	-1.7	2.90	1.46	164
Carcass (54% Lean)	45	-2.2	2.80	1.41	151
Round, Retail Cut	56	—	3.08	1.55	188
Round, Retail Cut	67	—	3.35	1.68	224
Dried, Chipped	48	—	2.88	1.44	161
Liver	70	-1.7	3.43	1.72	235
Veal, Carcass (81% Lean)	66	—	3.33	1.67	221
<i>Pork</i>					
Bacon	19	—	2.15	1.08	64
Ham, Light Cure	57	—	3.10	1.56	191
Ham, Country Cure	42	—	2.72	1.37	141
Carcass (47% Lean)	37	—	2.60	1.31	124
Bellies (53% Lean)	30	—	2.42	1.22	101
Backfat (100% Fat)	8	—	1.87	0.94	27
Shoulder (67% Lean)	49	-2.2	2.90	1.46	164
Ham (74% Lean)	56	-1.7	3.08	1.55	188
Sausage, Links or Bulk	38	—	2.62	1.32	127
Sausage, Country Style, Smoked	50	-3.9	2.93	1.47	168
Sausage, Frankfurters	56	-1.7	3.08	1.55	188
Sausage, Polish Style	54	—	3.03	1.52	181

Tali tabelle riportano i valori del calore latente di fusione per diverse tipologie di alimenti.

Quindi rispetto all'esercizio appena svolto posso riscrivere anche:

$$\begin{aligned} \Delta H &= M * C_{paf} * (T_{in} - T_c) + M * L + M * C_{pbf} * (T_c - T_{fin}) \\ &= 250 * [3,93 * (15 + 0,8) + 302 + 1,97 * (-0,8 + 10)] \\ &= 95554KJ \end{aligned}$$

Dove C_{paf} : calore specifico al di sopra della temperatura di congelamento (above freezing) da tabella

C_{pbf} : calore specifico al di sotto della temperatura di congelamento (below freezing) da tabella

T_c : temperatura di inizio congelamento (da tabella)

L : calore latente di fusione (da tabella)

Si osserva ancora come il risultato differisca parzialmente dal risultato ottenuto in precedenza a causa della maggior imprecisione di modellazione.

In alternativa alle tabelle precedenti, esistono poi anche dei grafici dai quali è possibile ricavare l'entalpia di un alimento in funzione della percentuale di acqua congelata, della temperatura e della percentuale di acqua non congelata. Da tali grafici è possibile ricavare anche l'entalpia per temperature superiori a quelle di congelamento.

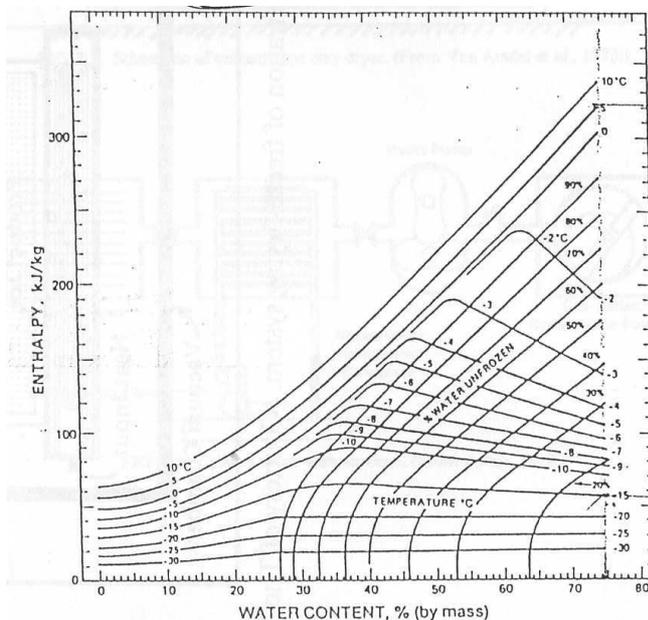
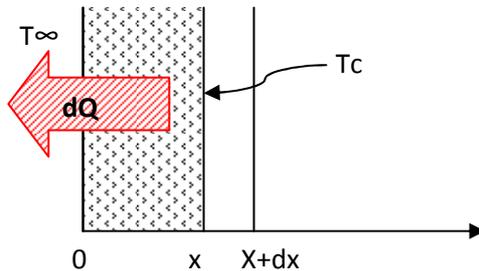


Fig. 2 Enthalpy of Beef (Adapted from Ref. 3)

Andiamo ora a calcolare il tempo necessario per il congelamento di un alimento. Partiamo dall'equazione di Plank

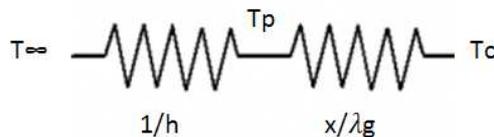


Suppongo che al tempo τ il fronte del ghiaccio si trovi ad un certo punto x a temperatura T_c . Al tempo $\tau+dt$ il fronte ghiacciato sar  avanzato di una quantit  dx . Potremo allora scrivere:

$$dQ = \rho * dV * L = \rho * A * dx * L$$

In cui dQ   la quantit  infinitesima di calore da sottrarre per avanzare il fronte del ghiaccio di una lunghezza dx

Vediamo ora l'andamento del calore uscente dalla lastra con l'analogo elettrico



In questo caso scriveremo:

$$q = \frac{T_c - T^\infty}{\frac{1}{h} + \frac{x}{\lambda_g}} = dq/dt$$

Lo eguaglio all'equazione precedente, riscritta per unit  di superficie:

$$\rho * dx * L = (T_c - T^\infty) / \left(\frac{1}{h} + \frac{x}{\lambda_g} \right)$$

Separo le variabili

$$\rho * L * \left(\frac{1}{h} + \frac{x}{\lambda_g} \right) * dx = (T_c - T^\infty) * dt$$

Integro

$$\rho * L * \int_{x=0}^{x=L} \left(\frac{1}{h} + \frac{x}{\lambda_g} \right) * dx = (T_c - T^\infty) * \int_0^\tau dt$$

$$\rho * L * \left(\frac{1}{h} * \frac{x}{2} + \frac{1}{\lambda_g} * \frac{x^2}{2} \right) = (T_c - T^\infty) * \tau$$

Trovo l'equazione di Plank

$$t_c = \frac{\rho \cdot L}{T_c - T_{\infty}} * \left(\frac{1}{2} * \frac{a}{h} + \frac{1}{8} * \frac{a^2}{\lambda_c} \right)$$

t_c è il tempo necessario affinché il corpo sia interamente congelato ma non corrisponde al tempo per cui tutto il corpo si porta alla T_{fin} . L'intervallo di tempo necessario per portare l'intero corpo ghiacciato alla temperatura T_{fin} è però trascurabile rispetto t_c .

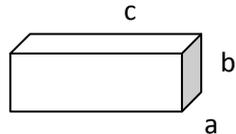
Al posto del calore latente di fusione (L) dell'acqua potrei utilizzare il valore riferito all'alimento che sto utilizzando (desumibile dal secondo gruppo di tabelle). Tale accorgimento permetterebbe di tenere conto del fatto che l'alimento è costituito da una certa percentuale solida, ma resterebbe comunque un'imprecisione. Sperimentalmente si è osservato che è invece preferibile sostituire al termine $\rho \cdot L$ il termine $\rho \cdot \Delta h$ rendendo i calcoli più accurati.

Inoltre i valori di P ed R sono tabellati in base alla geometria dei corpi che consideriamo:

	Lastra Piana	Cilindro	Sfera
P	1/2	1/4	1/6
R	1/8	1/16	1/24

Importante è il caso per cui la cui geometria del corpo è assimilabile a quella di un parallelepipedo

Definiti: $a < b < c$, $\beta_1 = b/a (>1)$, $\beta_2 = c/a (>1)$



Trovo dal grafico "Freezing and Defrozing time for Food for Brick Shape" i valori di P e R .

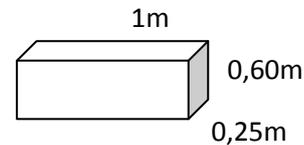
Esercizio

Ho un blocco di carne assimilabile ad un parallelepipedo, avente le misure indicate in figura

$$T_{in}=5^{\circ}\text{C}$$

$$T_{fin}=-30^{\circ}\text{C}$$

$$h=30 \text{ W}/(\text{m}^2 * \text{K})$$



$$\text{Calcolo: } \beta_1 = 1/0,15=4, \quad \beta_2 = 0,6/0,25= 2,4$$

→ dal grafico Freezing Time trovo $P=0,3$

$$R=0,085$$

Dalle tabelle degli alimenti trovo:

$$\rho=1050 \text{ Kg}/\text{m}^3$$

$$L= 333\text{KJ}/\text{Kg} \text{ (per l'acqua)}$$

$$\lambda=1,1 \text{ W}/(\text{m}*\text{K})$$

$$T_c= -1,75^{\circ}\text{C}$$

$$\tau_c = \frac{1050 * 333}{-1,75 + 30} * \left(0,3 * \frac{0,25}{30} + 0,085 * \frac{0,25^2}{1,1} \right) = 18,8 \text{ h}$$

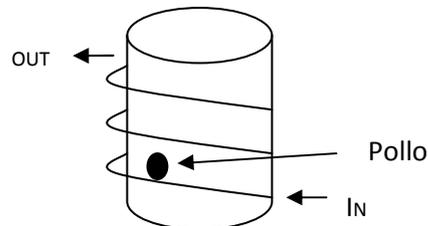
Sapendo già che non è un risultato molto accurato, perché ho utilizzato $\rho*L$ invece che $\rho*\Delta h$, e ho quindi considerato che il corpo fosse interamente costituito da acqua. Ricavo allora il valore di Δh dalla tabella 1 (beef) e trovo:

$$\begin{aligned} \Delta h &= [h(0^{\circ}) + C_p * (T_{in} - T_c)] - h(-30^{\circ}) = (304 + 3,52 * 5) - 19 \\ &= 302,6 \text{ KJ}/\text{Kg} \end{aligned}$$

Che sostituito nell'equazione precedente mi rende un valore $\tau_c=17,1\text{h}$.

Esercizio

C'è un nastro trasportatore che si avvolge lungo un cilindro, su cui scorrono dei polli. Il nastro si muove con velocità $v=3\text{m/min}$. L'ambiente è a $T^\infty=-30^\circ\text{C}$ e successivamente i polli vengono stoccati a $T_{fc}=-18^\circ\text{C}$. Utilizziamo una $T^\infty < T_{fc}$ per diminuire il tempo necessario per il congelamento (vedi equazione di Plank).



La temperatura di inizio congelamento, da tabella, è $T_{ic}=-2^\circ\text{C}$. Devo dimensionare il cilindro, la lunghezza del nastro e l'energia da fornire per sottrarre calore.

Calcolo:

$$\tau_c = \frac{\rho * \Delta h}{T_c - T^\infty} * \left(P * \frac{a}{h} + R * \frac{a^2}{\lambda g} \right)$$

Dove equiparo il pollo ad una sfera di diametro $D=0,15\text{m}=a$

$$M = \rho * V = \rho * \frac{1}{6} * \pi * D^3 = 1025 * \frac{1}{6} * 3,14 * 0,15^3 = 1,8\text{Kg}$$

Inoltre poiché lo assimilo ad una sfera, avrò $P=1/6$ e $R=1/24$

Dalla tabella 1 trovo:

$$\Delta h = h(5^\circ) - h(-18^\circ) = 315,8 - 37,2 = 278,6 \text{ KJ/Kg}$$

Infine:

$$\tau_c = \frac{1025 * 278600}{-1,8 + 30} * \left(\frac{1}{6} * \frac{0,15}{22} + \frac{1}{24} * \frac{0,15^2}{1,3} \right) = 189445\text{s} = 315,7\text{min} = 5,26\text{h}$$

Allora il nastro sarà lungo $L = 315,7 * 3 = 947\text{m}$

Quindi se non avvolgessi il nastro in altezza lungo un cilindro, avrei bisogno di un capannone lungo quasi 1Km!

Fisso l'altezza del cilindro pari a $H=5\text{m}$, prendendo tale altezza come quella tipica per capannoni prefabbricati. Vado a determinare il diametro del tamburo.

Fisso il passo tra una spira e l'altra dell'avvolgimento del nastro in $s=0,333\text{m}$, ricavando poi $D=H/0,333=15$ numero di "spire attive".

$$L = 15 * \pi * D$$

$$D = \frac{947}{15 * 3,14} = 20\text{m}$$

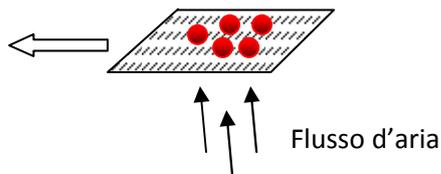
Stabilisco che sul nastro i polli siano distanziati di $0,3\text{m}$, quindi il numero di polli che salgono sul nastro in un minuto saranno

$$\frac{3 * \frac{\text{m}}{\text{min}}}{0,3 * \frac{\text{m}}{\text{pollo}}} = 10 \text{ polli/min}$$

$$\text{Allora } M=1,8*10=18 \text{ Kg/min} , \text{ e } Q = \frac{278,6*18}{60} = 83,58 \text{ KW}$$

Esercizio

Abbiamo un nastro trasportatore traforato lungo 6m e largo $1,5\text{m}$ che trasporta fragole. Queste vengono raffreddate tramite un getto d'aria che mi rende un coefficiente di convezione pari a $h=85 \text{ W}/(\text{m}^2 * \text{K})$ (che è possibile ricavare con le formule per convezione forzata).



$T_{\infty}=-34^{\circ}\text{C}$, assimilo le fragole a delle sfere aventi: $D=13\text{mm}$, $\rho=960 \text{ Kg}/\text{m}^3$, $\lambda=2,1 \text{ W}/(\text{m}*\text{K})$

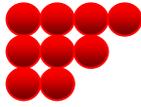
$$h(5^{\circ})= 367+3,94*5=386 \text{ KJ/Kg} \quad h(-20^{\circ})=44\text{KJ/Kg} \quad \rightarrow \Delta h=342\text{KJ/Kg}$$

$$\tau_c = \frac{960 * 342}{-0,8 + 34} * \left(\frac{1}{6} * \frac{0,013}{85} + \frac{1}{24} * \frac{0,013^2}{2,1} \right) = 286\text{s} = 4,8\text{min}$$

Dovrò allora fare in modo che il nastro si muova con velocità pari a

$$v = \frac{6\text{m}}{4,8\text{min}} = 1,25\text{m/min}$$

Quante fragole congelo al minuto? Dipende da quante posso disporre sul nastro trasportatore. Se ad esempio suppongo che si dispongano ordinatamente una affiancata all'altra (vedi figura sotto), allora ogni fragola andrebbe ad occupare una superficie quadrata pari a $D^2=0,013^2 \text{ m}^2$



per ogni metro quadrato avremo un numero di fragole pari a

$$\frac{n^{\circ} \text{fragole}}{\text{m}^2} = \frac{1}{0,013^2} = 5917 \frac{\text{fragole}}{\text{m}^2}$$

Quindi avendo il nastro larghezza pari a 1,5m, in 1 minuto avrò

$$\frac{n^{\circ} \text{fragole}}{\text{min}} = 5917 * 1,25 * 1,5 = 11095 \frac{\text{fragole}}{\text{min}}$$

Vado ad esprimerlo in massa: per una fragola avrò:

$$m = \rho * V = \rho * \frac{1}{6} * \pi * D^3 = 960 * \frac{1}{6} * 3,14 * 0,0013^3 = 1,103 * 10^{-3} \text{ Kg}$$

massa complessiva: $M = m * 11095 = 12,246 \frac{\text{Kg}}{\text{min}}$

Per raffreddare tale portata di fragole, sarà necessaria una macchina frigorifera avente potenza pari a:

$$Q_{\text{frtg}} = M * \Delta h = \frac{12,246}{60} * 342 = 69,8 \text{ KW}$$

In conclusione facciamo qualche considerazione sui tempi di congelamento e scongelamento. È preferibile avere processi veloci poiché ciò dovrebbe permettere di alterare il meno possibile le caratteristiche fisico/chimiche degli alimenti. Tale alterazione è però inevitabile perché si verifica a causa del cambiamento di fase dell'acqua, che lacera la struttura del prodotto.

L'unico modo per mantenere intatte le caratteristiche del prodotto è disidratarlo preventivamente e congelarlo solo in un secondo tempo. In questo modo non viene comunque meno l'obiettivo principale del processo di congelamento, che è quello di disattivare i batteri preservando gli alimenti.