

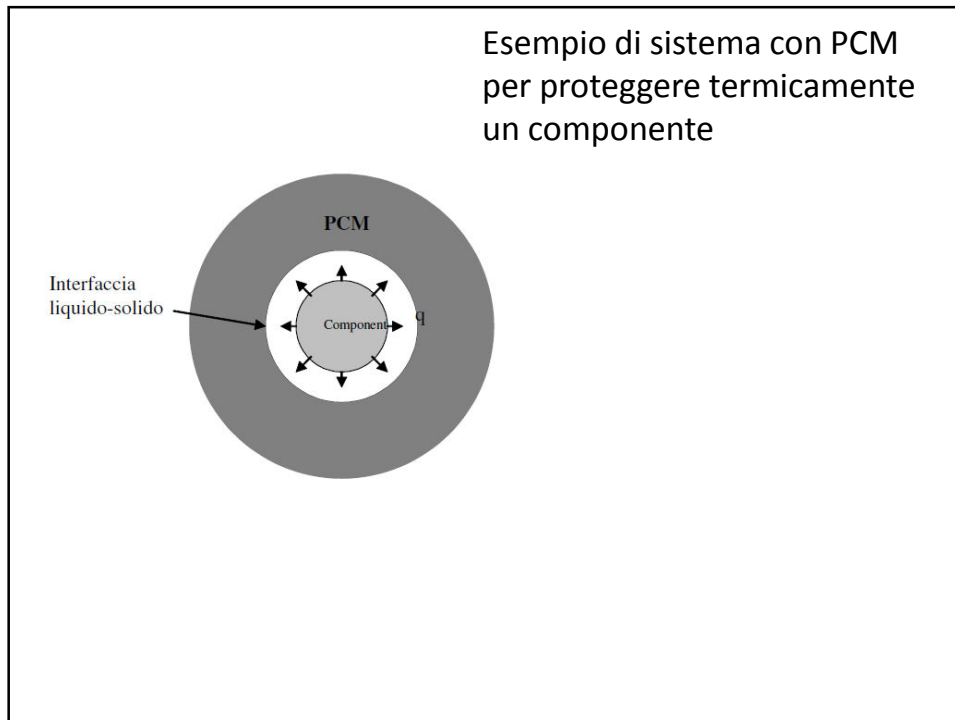
Phase Change Materials (PCM)

PCM

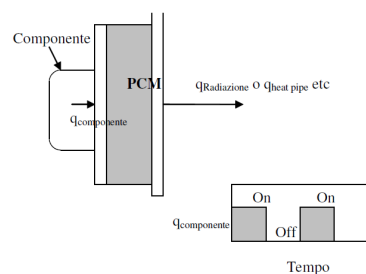
Nel velivolo spaziale si deve prevenire il surriscaldamento dei componenti elettrici anche in mancanza di convezione naturale con aria o conduzione verso una piastra fredda.

Inoltre componenti attivati occasionalmente non devono raffreddarsi fino a temperature minori delle minime permesse.

Durante il lancio o il rientro i componenti elettronici devono essere protetti. Il PCM può proteggere termicamente questi componenti. Il calore generato viene assorbito come calore di fusione dal PCM, senza un aumento di temperatura apprezzabile del componente (sistema passivo di controllo).



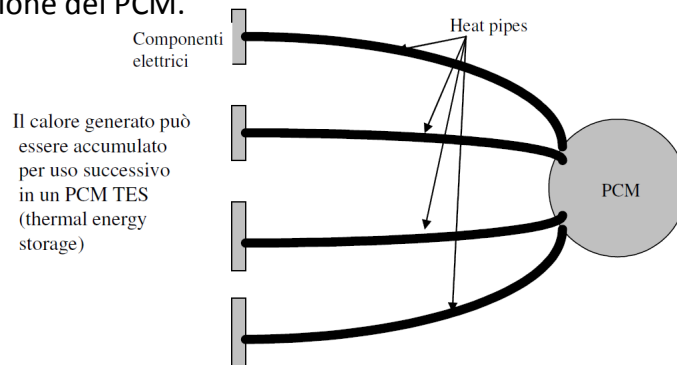
Applicazione per il PCM relativa ai componenti elettronici che operano ciclicamente. Quando il componente funziona (ON), genera calore, che viene immagazzinato tramite il cambiamento di fase del PCM. Quando è spento (OFF), l'energia sotto forma di calore di fusione viene rimossa al radiatore, o dai tubi di calore o con altri mezzi, il PCM ritorna solido ed è pronto per il ciclo successivo. La fusione e la solidificazione alterne del PCM permettono al componente di operare quasi isotermicamente alla temperatura di fusione del PCM.



ON: viene generato calore che viene accumulato nel PCM con il cambiamento di fase.

OFF : il calore di fusione viene rimosso al radiatore solidificando il PCM

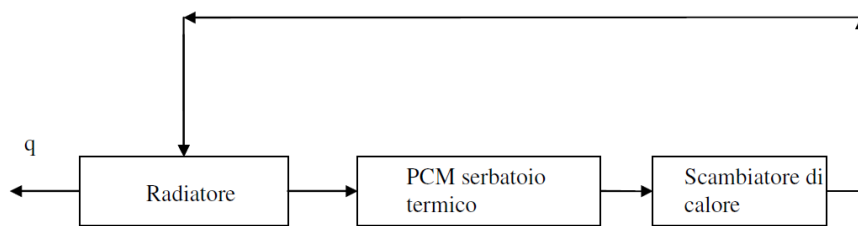
Un'altra applicazione per il PCM è relativa ai componenti elettronici che operano ciclicamente (figura seguente). Quando il componente funziona (ON), genera calore, che viene immagazzinato tramite il cambiamento di fase del PCM. Quando è spento (OFF), l'energia sotto forma di calore di fusione viene rimossa al radiatore, o dai tubi di calore o con altri mezzi, il PCM ritorna solido ed è pronto per il ciclo successivo. La fusione e la solidificazione alterne del PCM permettono al componente di operare quasi isotermicamente alla temperatura di fusione del PCM.



Il PCM può essere applicato inoltre a missioni spaziali di satelliti che entrano ed escono dall'ombra della Terra. Il PCM può accumulare e rilasciare energia solare per smorzare le grandi variazioni di temperatura a cui è soggetto il velivolo durante l'orbita.

Ancora un'altra applicazione si trova con i velivoli spaziali che atterrano su pianeti e lune senza atmosfera, per i quali l'ambiente termico cambia radicalmente tra il giorno e la notte. L'energia solare captata durante il giorno può essere conservata per essere utilizzata durante la notte ed assicurare un ambiente a temperatura costante.

Quando il PCM è integrato con il radiatore, questo viene dimensionato per rimuovere un flusso termico medio, non di picco, con risparmio di area e massa. Il flusso termico di picco viene immagazzinato tramite cambiamento di fase.



Il PCM può essere utilizzato in un loop con liquido (Skylab).

Il PCM fondendo e solidificando smorza le variazioni di temperatura del fluido operativo

Il PCM mantiene la temperatura del fluido che entra nello scambiatore all'interno entro i limiti permessi

Trasformazioni di fase: solido – liquido (fusione) -, liquido-gas (vaporizzazione), solido-gas (sublimazione).

Acqua, usata in Space Shuttle

- calore di fusione a 0°C pari a 333 kJ/kg,
- calore richiesto per portare 1 kg di acqua da 0°C liquido a 100°C liquido è pari 418 kJ/kg
- Calore per vaporizzare 1 kg di acqua a 100°C = 2253 kJ/kg
- Il calore totale per vaporizzare 1 kg di ghiaccio = 333+418+2253 = 3004 kJ/kg
- Altro fluido usato: ammoniaca

PCM $-25^{\circ}\text{C} < T < 62^{\circ}\text{C}$ (elettronica e cabine)

Table 11.1. Typical PCMs in the Range of -25 to $+62^{\circ}\text{C}$

Material	Melting Point ($^{\circ}\text{C}$)	Heat of Fusion (kJ/kg)
<i>n</i> -Eicosane ($\text{C}_{20}\text{H}_{42}$)	37	246
Polyethylene glycol 600 [$\text{HO}(\text{CH}_2\text{CH}_2\text{O})_n\text{H}$]	20–25	146
Nitrogen pentoxide (N_2O_5)	30	320
Phosphonium chloride (PH_4Cl)	28	752
Dibasic sodium phosphate ($\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$)	37	279
Sodium sulfate ($\text{Na}_2\text{O}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$)	31	215
Glycerol [$\text{C}_3\text{H}_7(\text{OH})_2$]	18	199
Calcium chloride ($\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$)	29	170
<i>p</i> -Xylene [$\text{C}_8\text{H}_{10}(\text{CH}_3)_2$]	16	164
Sodium chromate ($\text{Na}_2\text{CrO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$)	23	164
<i>n</i> -Undecane ($\text{C}_{11}\text{H}_{24}$)	-25	141
<i>n</i> -Dodecane ($\text{C}_{12}\text{H}_{26}$)	-12	211
<i>n</i> -Tridecane ($\text{C}_{13}\text{H}_{28}$)	-6	155
<i>n</i> -Tetradecane ($\text{C}_{14}\text{H}_{30}$)	6	228
<i>n</i> -Hexadecane ($\text{C}_{16}\text{H}_{34}$)	17	237
<i>n</i> -Heptadecane ($\text{C}_{17}\text{H}_{36}$)	22	213
<i>n</i> -Octadecane ($\text{C}_{18}\text{H}_{38}$)	28	244
<i>n</i> -Nonadecane ($\text{C}_{19}\text{H}_{40}$)	32	187
<i>n</i> -Octacosane ($\text{C}_{28}\text{H}_{58}$)	62	253
1-Tetradecanol [$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{12}(\text{CH}_2)\text{OH}$]	38	230
Acetic acid (CH_3COOH)	17	187
Water	0	333

PCM per temperature minori

Table 11.2. Typical PCMs for Lower Temperatures

Material	Melting Point ($^{\circ}\text{C}$)	Heat of Fusion (kJ/kg)
Methyl propyl ketone ($\text{C}_5\text{H}_{10}\text{O}$)	-78	104
Amyl alcohol ($\text{C}_5\text{H}_{12}\text{O}$)	-79	112
1-Methyl-1,2 ethylbenzene (C_9H_{12})	-81	88
Ethyl acetate ($\text{C}_4\text{H}_8\text{O}_2$)	-82	118
Methyl ethyl ketone ($\text{C}_4\text{H}_8\text{O}$)	-86	111
<i>n</i> -Butylbenzene ($\text{C}_{10}\text{H}_{14}$)	-89	82
Isopropyl alcohol ($\text{C}_3\text{H}_8\text{O}$)	-89	88
Butyl alcohol ($\text{C}_4\text{H}_{10}\text{O}$)	-89	125
<i>n</i> -Heptane (C_7H_{16})	-91	140
Toluene (C_7H_8)	-94	72
Ethyl benzene (C_8H_{10})	-95	86
<i>n</i> -Hexane (C_6H_{14})	-95	151
Isopropylbenzene (C_9H_{12})	-96	81
<i>n</i> -propylcyclopentane (C_8H_{16})	-117	88
1-Neptane (C_7H_{14})	-119	126
2,4-Dimethyl pentane (C_7H_{16})	-119	67
Chloropropane ($\text{C}_3\text{H}_7\text{Cl}$)	-123	84
Butane (C_4H_{10})	-135	76
Ethane (C_2H_6)	-172	93
Methane (CH_4)	-183	59

Quando usare il PCM

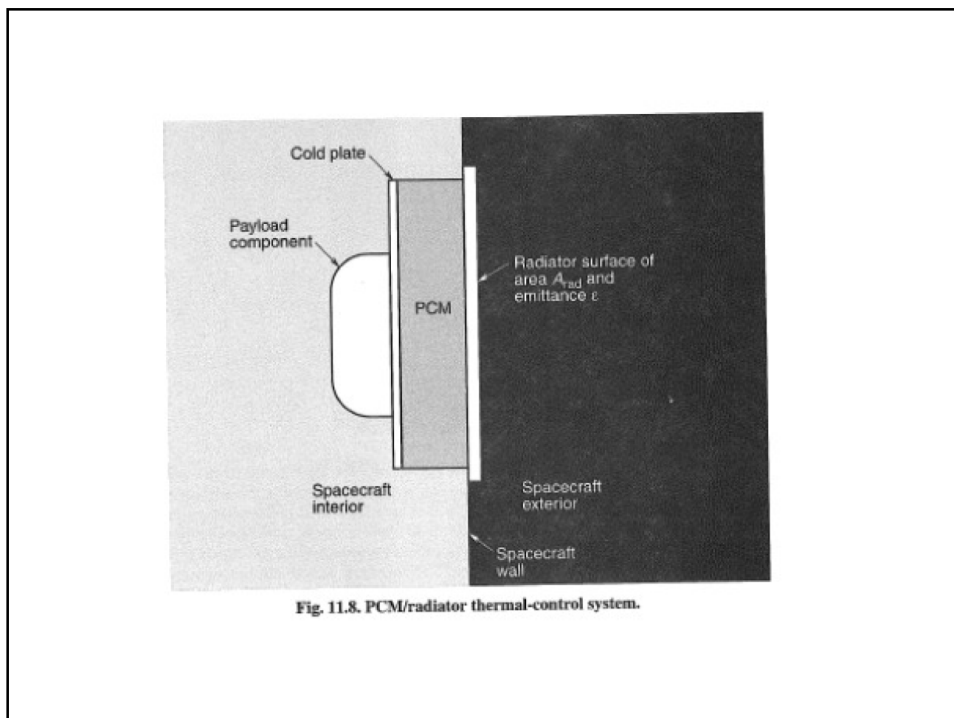
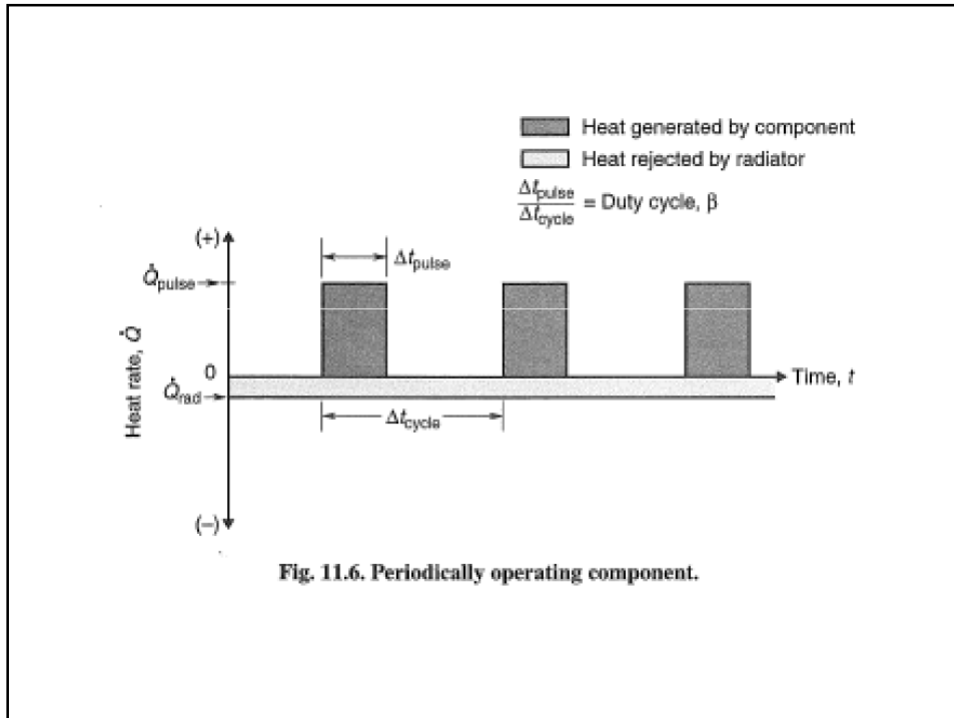
Fattori che influenzano la scelta progettuale: massa, richiesta di potenza, costo, complessità

Invece del PCM posso usare un materiale solido come il berillio con alto calore specifico: $c_p=1888 \text{ J/(kg K)}$, $(\rho c_p) = 3.5 \text{ J/cm}^3$

Mettendo il PCM aggiungo massa (del PCM) ma riduco la massa e le dimensioni del radiatore

Proprietà dei PCM

- Alto calore di fusione per unità di massa (>150 kJ/kg a temperatura ambiente, 40 kJ/kg per applicazioni criogeniche)
- Appropriata temperatura di fusione
- Non corrosivo, non tossico, stabile
- Transizione liquido-solido reversibile
- Basso coefficiente di espansione, piccola variazione di volume quando cambia fase
- Alta conducibilità termica di entrambe le fasi, alto c_p e densità
- Bassa tensione di vapore a temperatura ambiente
- Basso costo



$$\varepsilon A_{\text{radiatore}} \sigma T_{\text{rad}}^4 \Delta\tau_{\text{cycle}} = q_{\text{pulsazione}} \Delta\tau_{\text{pulsazione}}$$

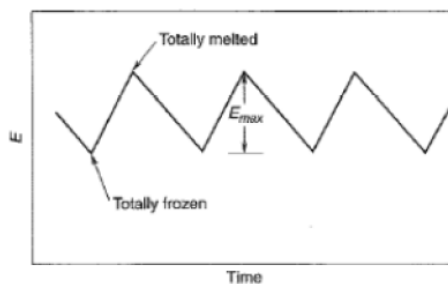
Assumendo la T dello spazio = 0 K e nessun flusso termico solare o planetario

Il PCM permette che il radiatore sia dimensionato sulla potenza media che viene dissipata dal componente nell'intero ciclo.

In assenza di PCM il radiatore deve essere dimensionato sulla potenza di picco

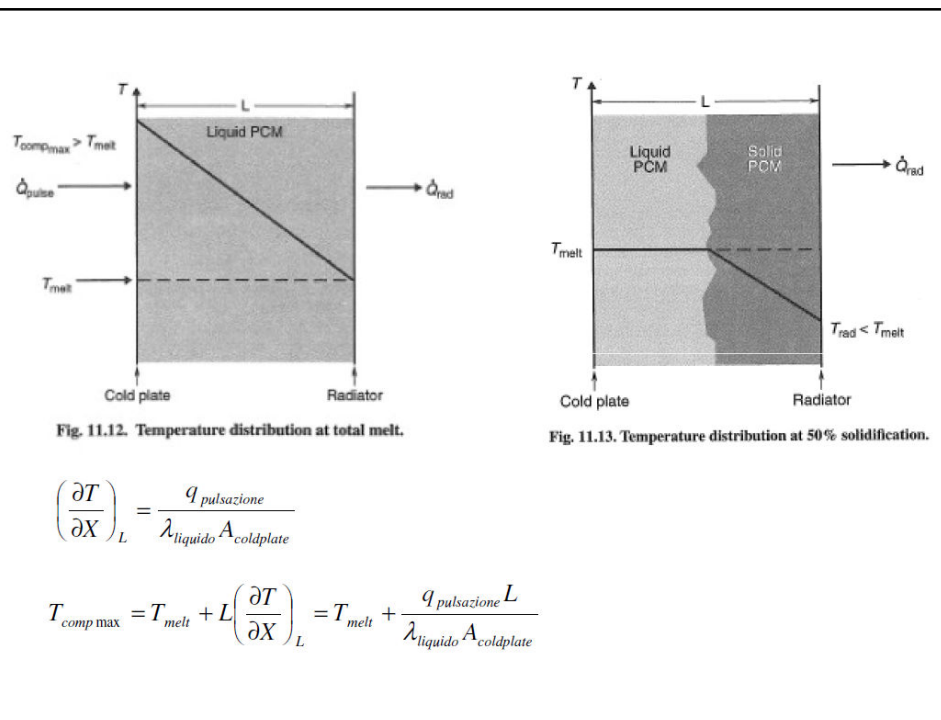
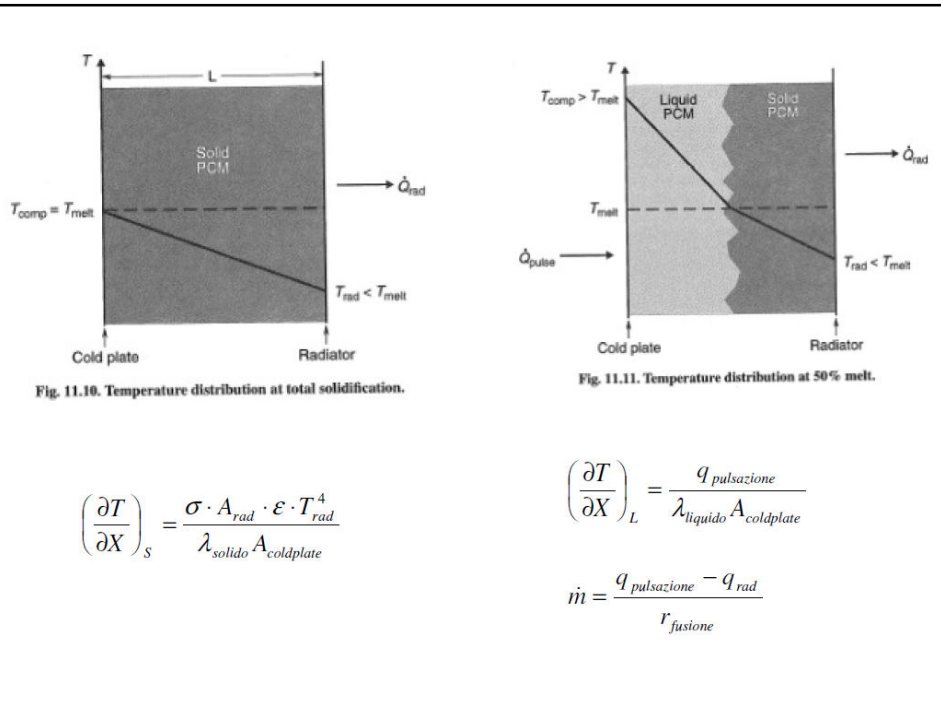
Si può avere una riduzione di dimensione e massa del radiatore

Si hanno però gradienti di temperatura per trasferire il calore dal componente al PCM, che possono provocare un aumento di temperatura del PCM.



$$\text{massa del PCM} = E_{\text{max}} / r_{\text{fusione}}$$

E_{max} energia immagazzinata nel PCM



$$m_{PCM} = \frac{E_{\max}}{r_{\text{fusione}}} = \rho_{PCM} A_{\text{coldplate}} L$$

$$T_{\text{comp max}} = T_{\text{melt}} + \frac{q_{\text{pulsazione}} E_{\max}}{\lambda_{\text{liquido}} A_{\text{coldplate}}^2 r_{\text{fusione}} \rho_{PCM}}$$

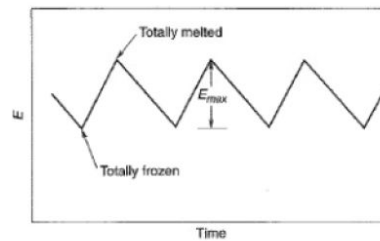
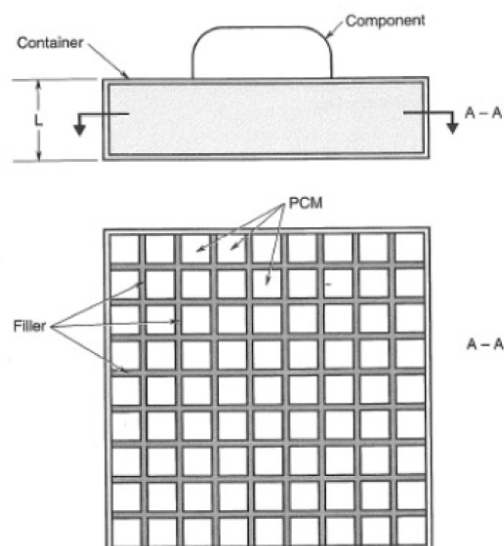


Fig. 11.9. Net energy in PCM.

Poiché tutti i parametri nell'equazione sono fissati anche la temperatura del componente è fissata. Non deve eccedere la temperatura massima ammessa del componente.

Se ciò avviene si inseriscono nel PCM superfici estese con alta conduttività termica, che forniscono dei percorsi con alta conduttività termica: alette di alluminio, nidi d'ape, fibre di carbonio



Filler cross-sectional area = A_F
 PCM cross-sectional area = A_{PCM}
 $A_F + A_{PCM} = A_T$ = total cross-sectional area

Fig. 11.14. PCM package with filler.

$A_F = 0$ solo PCM

$A_F/A_{tot} = 1$ solo alluminio

Aggiunta di Al provoca aumento di massa e spessore del PCM+Al

$T_{compMAX}$ è massima senza Al, raggiunge un minimo per $A_F/A_{tot} = 0.5$

La simulazione non ha tenuto in considerazione effetti di accumulo sensibile e della conduttività del PCM

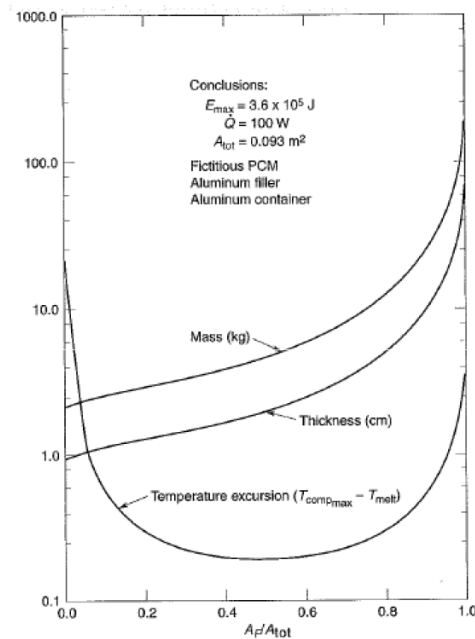


Fig. 11.15. PCM design optimization.

Proprietà di PCM fittizio

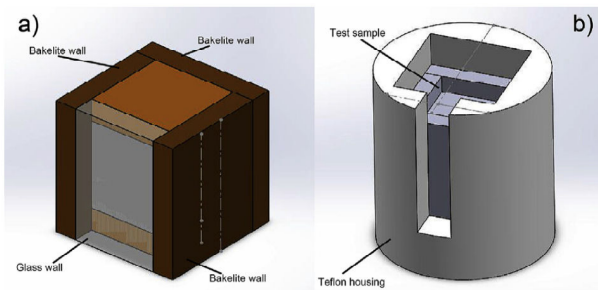
Proprietà	Variabile	Valore
Densità	ρ	1602 kg m^{-3}
Conducibilità termica	λ	$0.519 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$
Calore specifico	cp	$1673.6 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$
Calore latente di fusione	r	232400 J kg^{-1}

Le superfici estese devono essere saldate alla scatola o integrali alla scatola per evitare resistenze termiche di contatto che sono dominanti

Si devono fare simulazioni tri-dimensionali

Altro problema: accomodare variazioni di volume legate alla fusione-solidificazione del PCM: contenitori elastici o contenitori rigidi con volume per il vapore che però ha bassa conducibilità termica

Experimental analysis of phase change phenomenon of paraffin waxes embedded in copper foams



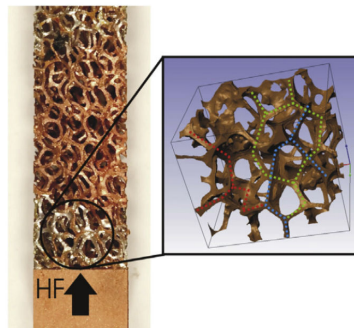
Thermophysical properties of the tested paraffin waxes

Type	T _{melt} [° C]	c _p [J kg ⁻¹ K ⁻¹]	λ [W m ⁻¹ K ⁻¹]	ρ [kg m ⁻³]
SASOLWAX 5203	52 - 54			
SASOLWAX 5603	56 - 58	1800 at 20 ° C 2400 at 70 ° C	0.25	920 at 20 ° C 777 at 70 ° C
SASOLWAX 5803	58 - 60			

PCM: 10 PPI copper foam sample



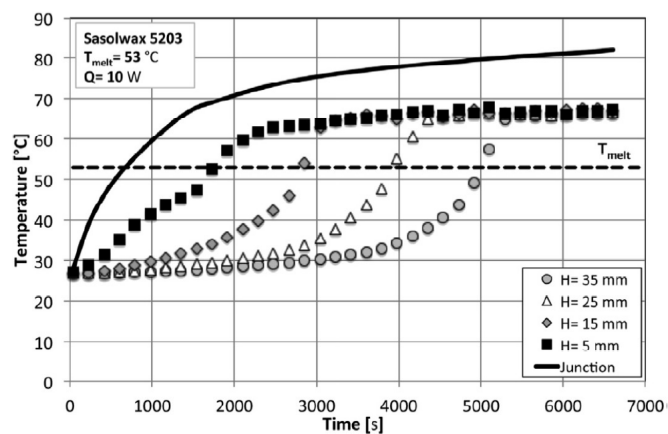
PCM: 5 PPI copper foam sample with a particular reconstructed via microtomography scans

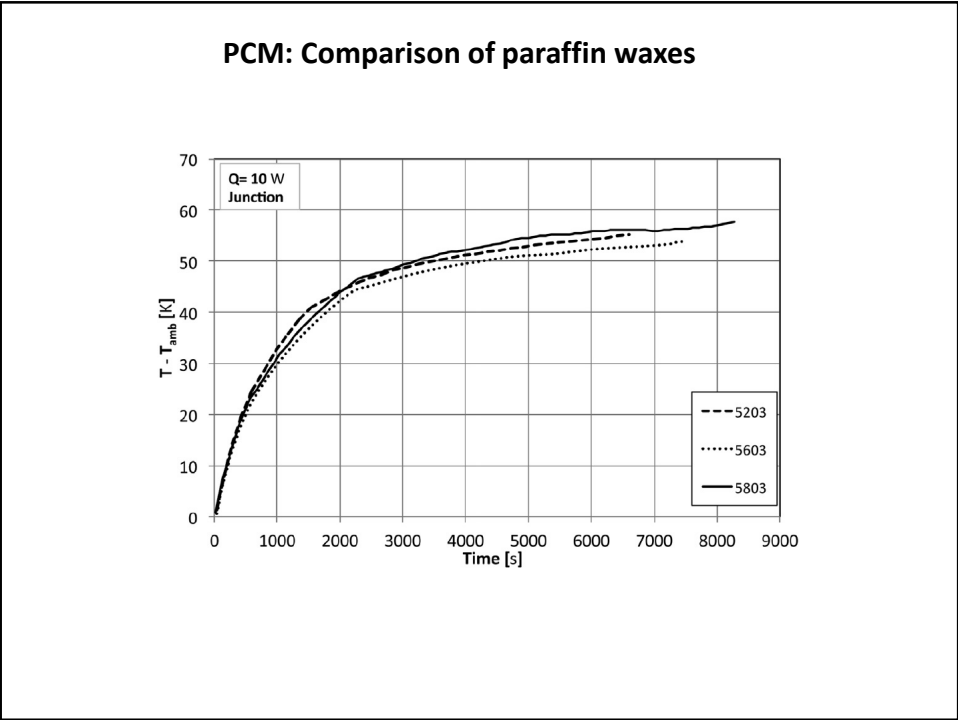
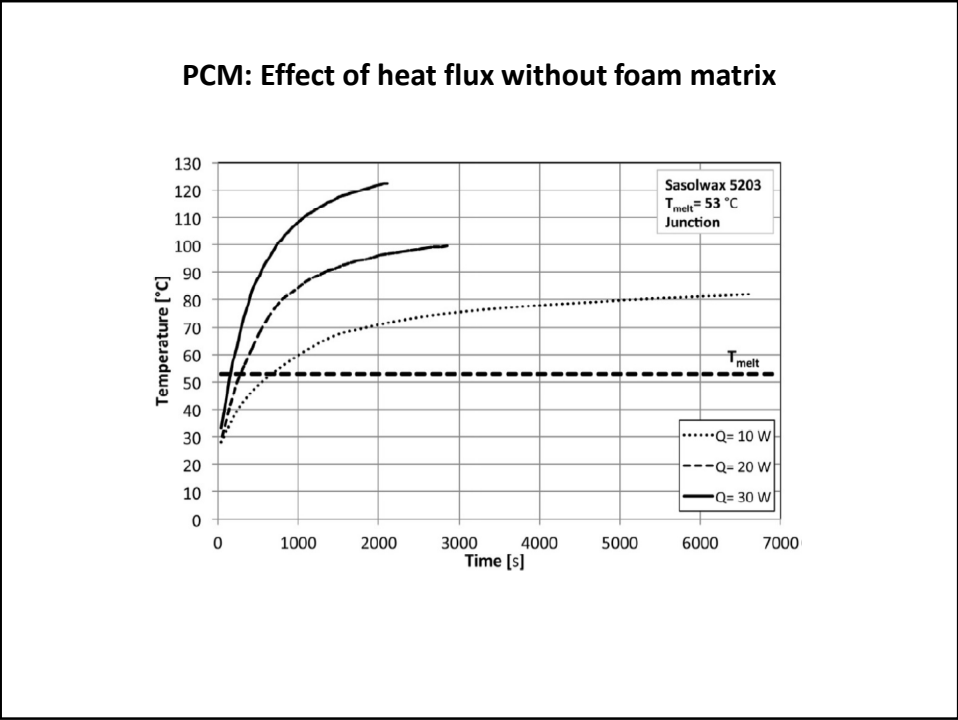


PCM: Major characteristics of the foam structures

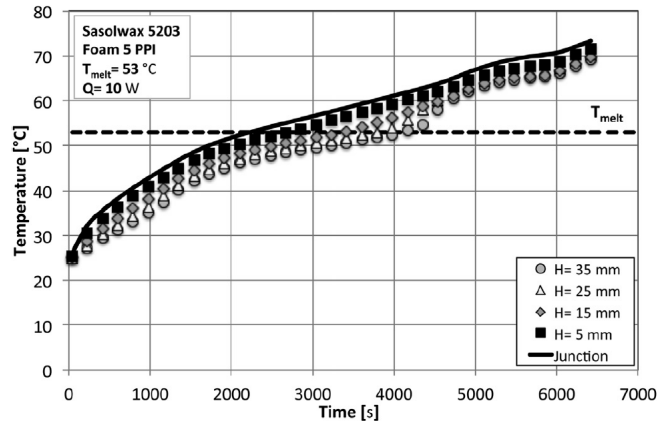
	Cu-5-6.5	Cu-10-6.6	Cu-40-6.4
Number of pores per inch, PPI ^a [in ⁻¹]	5	10	40
Relative density, ρ_R [%]	6.5	6.6	6.4
Porosity, ε [-]	0.935	0.934	0.936
Fibre thickness, t_b [mm]	0.495	0.432	0.244
Fibre length l_b [mm]	1.890	1.739	0.999
Surface area per unit of volume, a_{sv} [m ² m ⁻³]	292	692	1611

PCM: Temperature profiles during the phase change process at HF = 6.25 kW m⁻² without foam matrix.

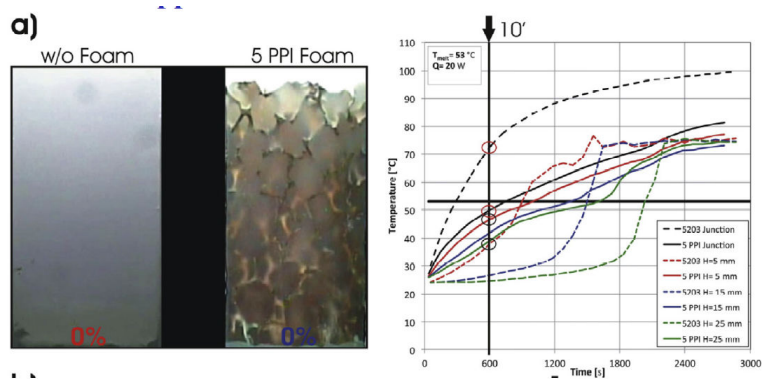




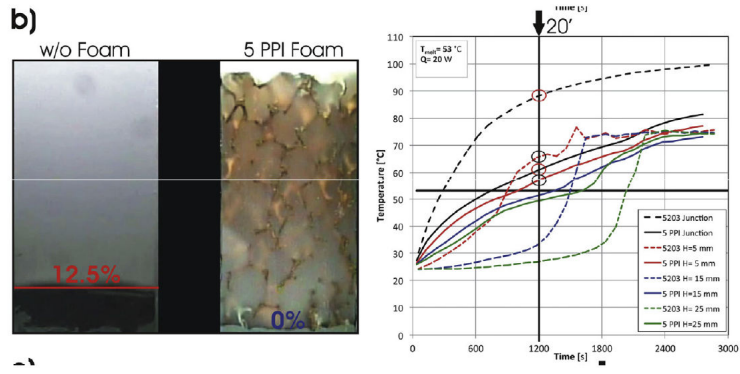
PCM: Temperature profiles of 5 PPI copper foam embedded with paraffin wax 5203 at Q = 10 W.



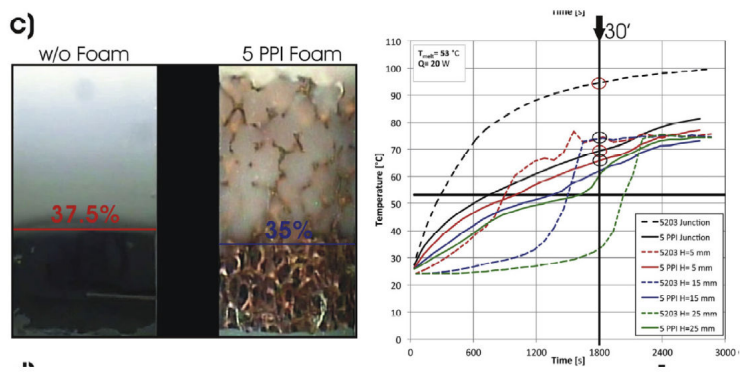
PCM: Phase change process with and without 5 PPI copper foam of Sasolwax 5203 at 20 W



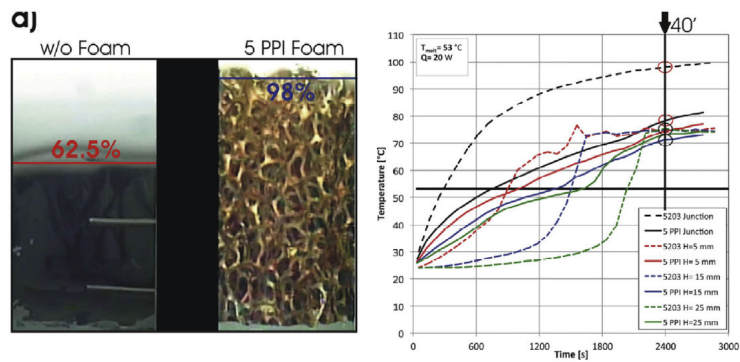
PCM: Phase change process with and without 5 PPI copper foam of Sasolwax 5203 at 20 W



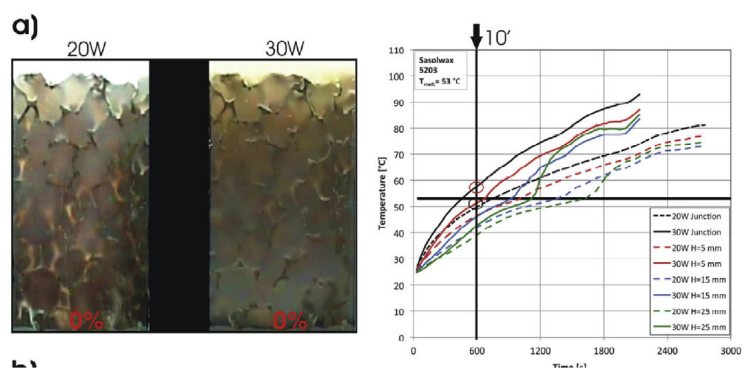
PCM: Phase change process with and without 5 PPI copper foam of Sasolwax 5203 at 20 W



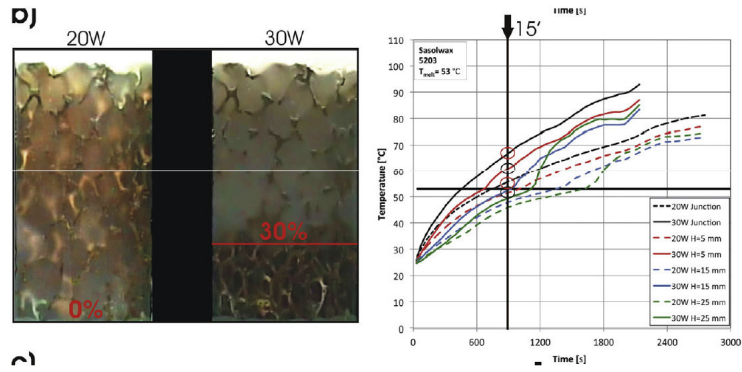
PCM: Phase change process with and without 5 PPI copper foam of Sasolwax 5203 at 20 W



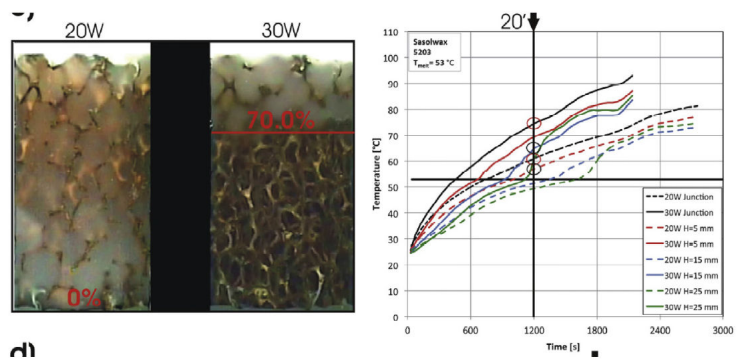
PCM: Phase change process of Sasolwax 5203 embedded in 5 PPI copper foam at 20 W and 30 W.



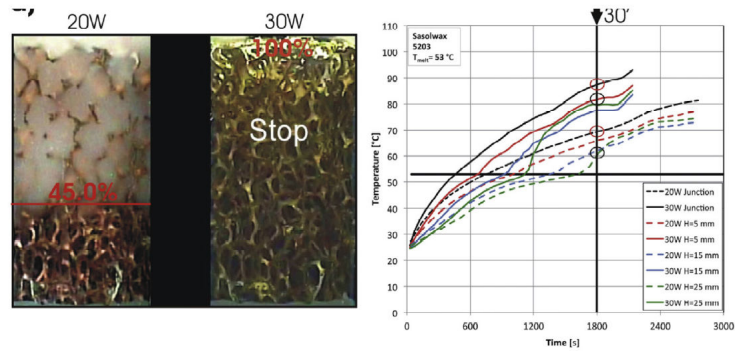
PCM: Phase change process of Sasolwax 5203 embedded in 5 PPI copper foam at 20 W and 30 W.



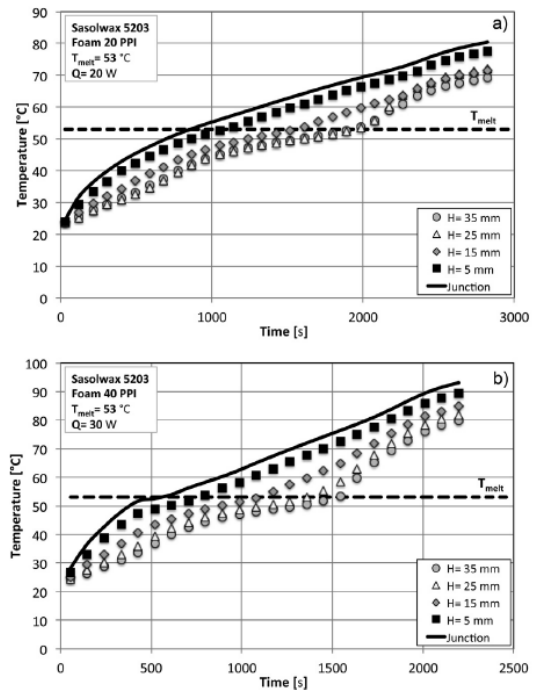
PCM: Phase change process of Sasolwax 5203 embedded in 5 PPI copper foam at 20 W and 30 W.



PCM: Phase change process of Sasolwax 5203 embedded in 5 PPI copper foam at 20 W and 30 W.



Temperature profiles:
 (a) 10 PPI copper foam embedded with paraffin wax 5203 at $Q \approx 20$ W;
 (b) 40 PPI copper foam embedded with paraffin wax 5203 at $Q \approx 30$ W.



PCM: Phase change process of Sasolwax 5203 embedded in 5 PPI copper foam at 20 W and 30 W

