

Università degli Studi di Padova – Dipartimento di Ingegneria Industriale

Corso di Laurea in Ingegneria Aerospaziale

Materiali a cambiamento di fase per il controllo termico in ambito spaziale

Tutor universitario: Prof. ssa Roberta Bertani

Laureando: *Matteo Campa*

Padova, 22/3/2024

Anno accademico 2023-2024

- **MATERIALI A CAMBIAMENTO DI FASE**
 - **Calore latente**
 - **Proprietà dei PCM**
 - **PCM organici, inorganici ed eutettici**
 - **Miglioramenti delle prestazioni**

- **APPLICAZIONI PER IL CONTROLLO TERMICO IN AMBITO SPAZIALE**
 - **Sistemi per il controllo termico dei dispositivi elettronici**
 - **Sistemi di accumulo dell'energia termica**
 - **Condensatori termici**
 - **Cargo containers**
 - **Dispositivi sperimentali**

- **CONCLUSIONI**

I materiali a cambiamento di fase (PCM) sono materiali caratterizzati da un elevato calore latente di fusione in grado di immagazzinare o rilasciare grandi quantità di energia durante una transizione di fase, senza provocare variazioni significative di temperatura.

È possibile distinguere i PCM presenti sul mercato in tre principali macrocategorie: organici, inorganici ed eutettici.

La scelta di un determinato materiale a cambiamento di fase è dettata da un compromesso fra più parametri, tra cui proprietà termoplastiche, sostenibilità economica e disponibilità commerciale.

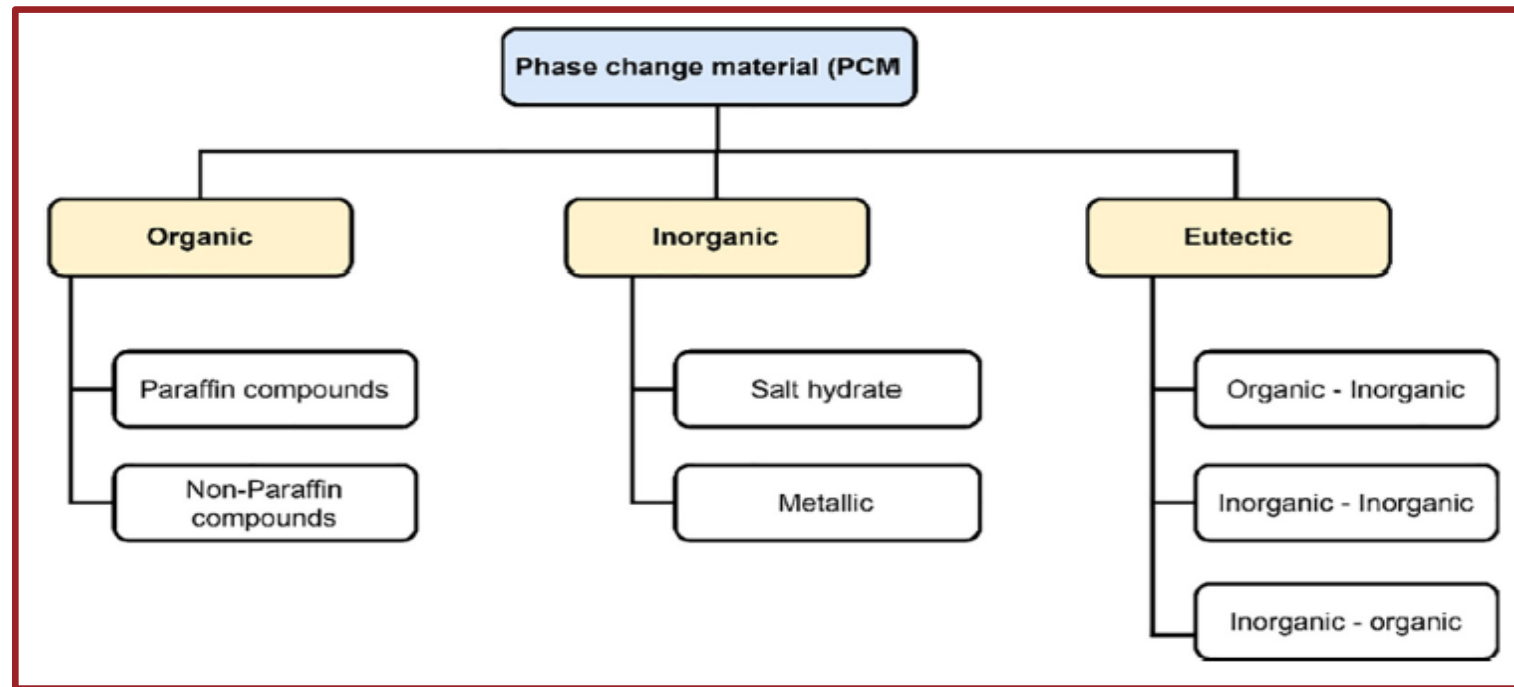


Figura 1 - Classificazione dei PCM [3, Bibliografia]

Il calore latente è la quantità di energia termica necessaria affinché un chilogrammo di una determinata sostanza compia una trasformazione di fase.

Esistono differenti tipologie di calore latente ed ognuno si riferisce ad un determinato cambiamento di fase.

Il calore sensibile rappresenta la quantità di calore che causa una variazione di temperatura di un materiale.

Unità di misura del calore latente: J/Kg (o cal/g).

Il calore latente è funzione del tipo di sostanza e del tipo di cambiamento di fase.

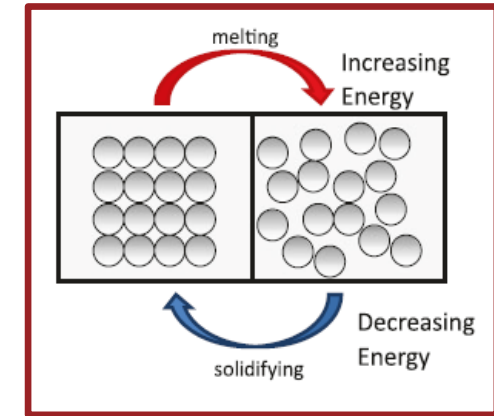


Figura 2 – Processo di fusione/solidificazione [7, Bibliografia]

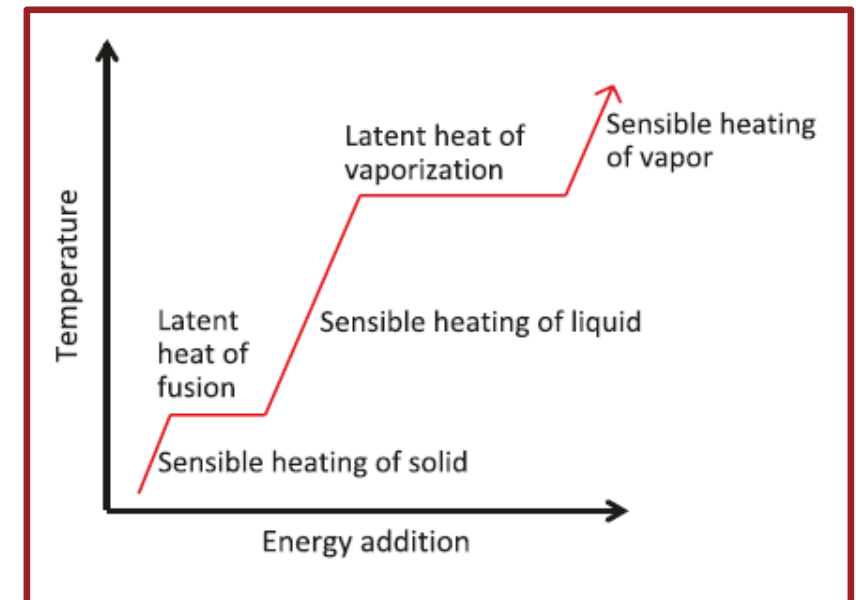


Figura 3 – Esempio di curva di riscaldamento [7, Bibliografia]

Per individuare quale sia il materiale a cambiamento di fase più adatto ad una determinata applicazione è necessario analizzare le loro molteplici proprietà:

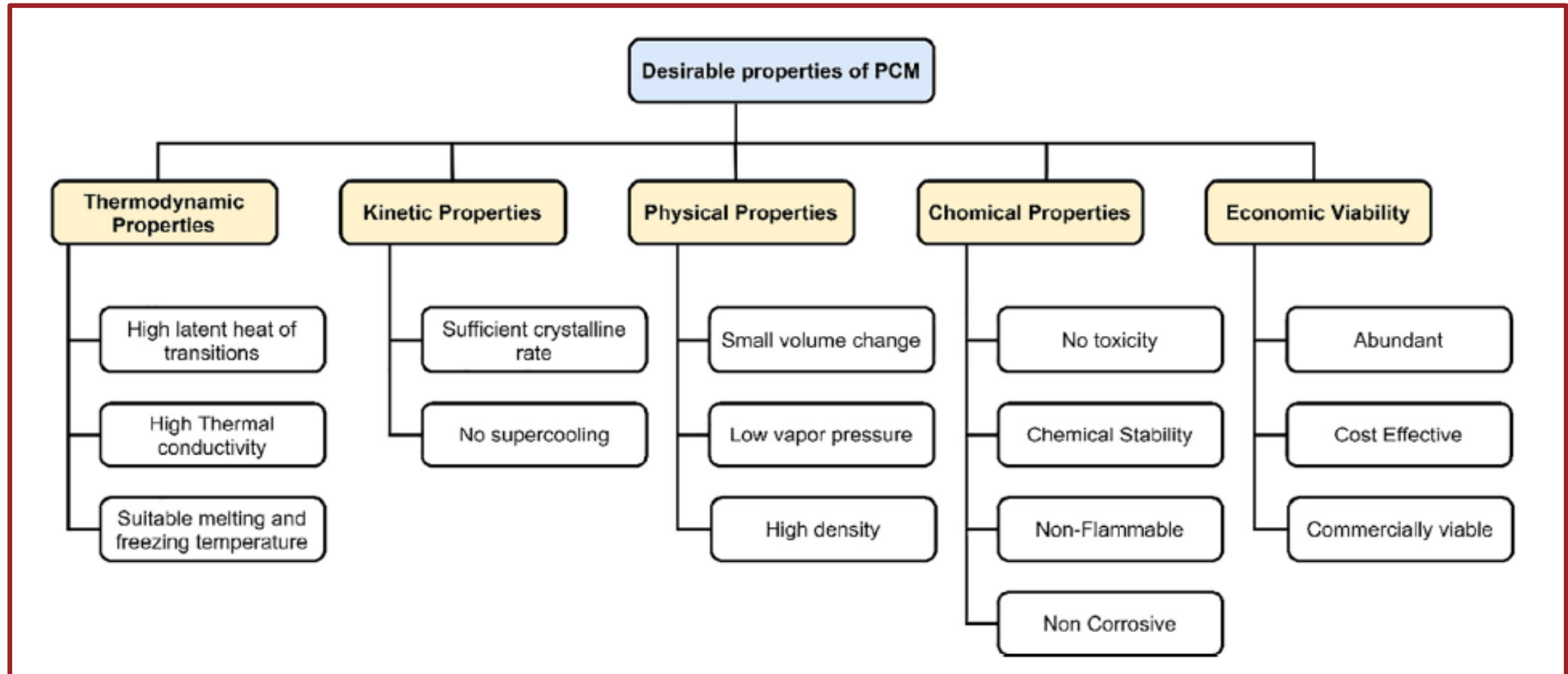


Figura 4 – Proprietà ricercate in un PCM [3, Bibliografia]

PCM ORGANICI

- **Composti paraffinici e non paraffinici**
- **Superficie chiara, morbida e cerosa**
- **« Mushy zone »**
- **Alti calori latenti (200-300 kJ/kg)**
- **Chimicamente e fisicamente stabili**
- **Non corrosivi**
- **Infiammabili**
- **Basse conducibilità termiche**
- **Controllo termico dei dispositivi elettronici**

PCM ORGANICI

- **Sali e sali idrati**
- **Punti di fusione da 10°C a 900°C**
- **Transizioni di stato nette**
- **Calori latenti pari ai PCM organici**
- **Basse conducibilità termiche**
- **Variazioni di densità contenute**
- **Instabili e corrosivi**
- **Non altamente infiammabili**
- **Tendenza a sottoraffreddare**
- **Applicazioni relative all'energia solare**

PCM ORGANICI

- **Miscela di due o più sostanze**
- **Organico-Organico, Organico-Inorganico, Inorganico-Inorganico**
- **Leghe metalliche**
- **Bassi calori latenti**
- **Elevate densità**
- **Alte conducibilità termiche**
- **Chimicamente e fisicamente stabili**
- **Compatibili con molti materiali**

Un PCM « ideale » presenta queste caratteristiche:

- **Elevato calore latente**
- **Elevato calore specifico**
- **Elevata conducibilità termica**
- **Variazioni di densità contenute durante le transizioni di fase**
- **Bassa, o assente, tendenza al sottoraffreddamento**
- **Stabilità chimica e fisica**
- **Non infiammabile**
- **Non corrosivo**
- **Economico**

Maggiore importanza riservata a:

Conducibilità termica



Calore sensibile



Calore latente



Tecniche di miglioramento:

Materiali altamente conduttivi

Nanoparticelle (biossido di silicio)

Nanoparticelle (grafite)

Molteplici problemi relativi al controllo termico sono dovuti all'ampio numero di componenti elettronici impiegati a bordo di un veicolo spaziale

L'esempio più semplice (sx) è dato dal controllo termico PCM relativo a componenti che operano una singola volta durante la missione.

Un altro esempio (dx) è dato dal controllo termico PCM dedicato a componenti che operano ciclicamente durante la missione

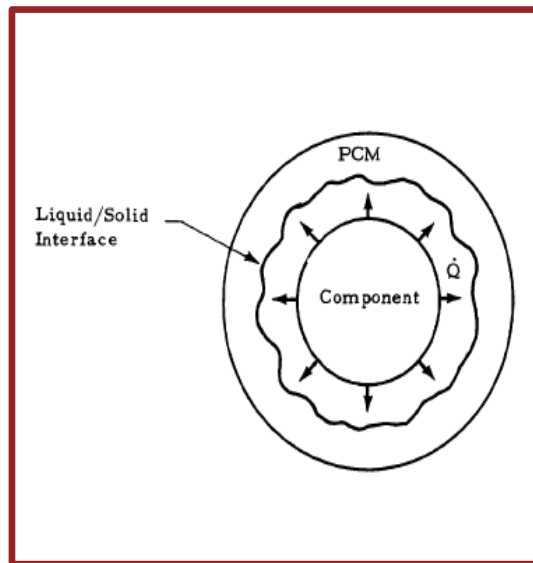


Figura 5 – Sistema di controllo termico PCM per componenti a singolo utilizzo [15, Bibliografia]

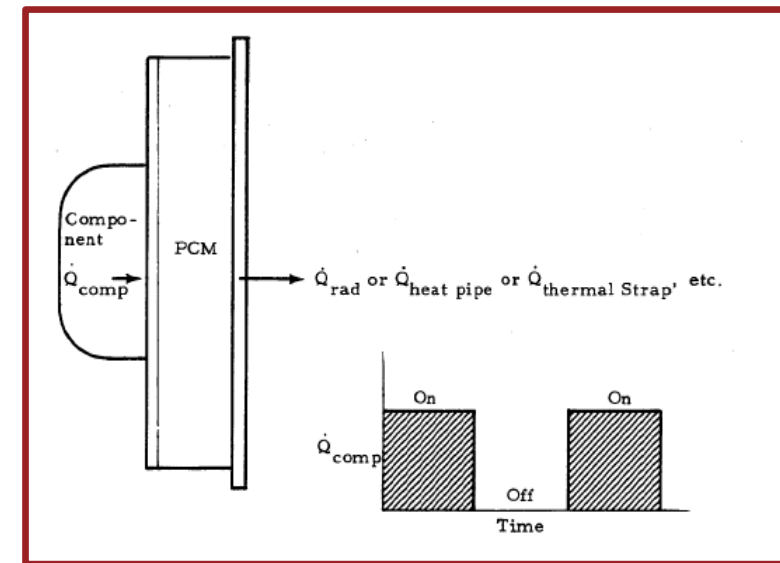


Figura 6 – Sistema di controllo termico PCM per componenti che operano ciclicamente [15, Bibliografia]



Figura 7 – Lunar Roving Vehicle [18, Sitografia]

All'interno della missione spaziale Apollo 15, tre sistemi di controllo termico basati sull'utilizzo di PCM sono stati utilizzati sul Lunar Roving Vehicle

L'accumulo e il rilascio di energia termica mediante l'impiego di materiali a cambiamento di fase risultano utili anche per missioni spaziali caratterizzate da un ambiente operativo le cui condizioni mutano costantemente

Alcuni esempi relativi ad applicazioni di tale genere sono:

- **Satellite orbitante attorno alla terra**
- **Vano di refrigerazione o per l'equipaggio**
- **Veicoli d'atterraggio per pianeti e lune sprovvisti di atmosfera**

Un sistema di accumulo dell'energia termica utilizzante PCM è utile anche per immagazzinare l'energia dissipata da componenti elettronici in funzione

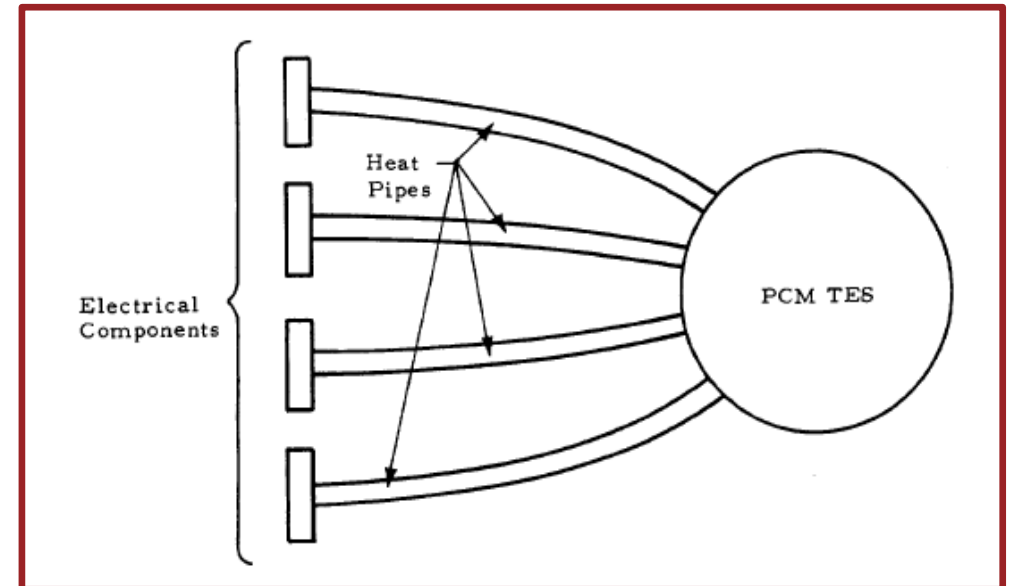


Figura 8 – Sistema centrale di accumulo dell'energia termica utilizzante PCM [15, Bibliografia]

I PCM risultano essere un'ottima implementazione nei confronti di applicazioni che prevedono l'utilizzo di sistemi di controllo termico che sfruttano un fluido operativo

Materiale a cambiamento di fase utilizzato per:

- **Smorzare le variazioni di temperatura subite dal fluido operativo di ritorno dai radiatori esterni**
- **Diminuire area d'ingombro e peso del radiatore**

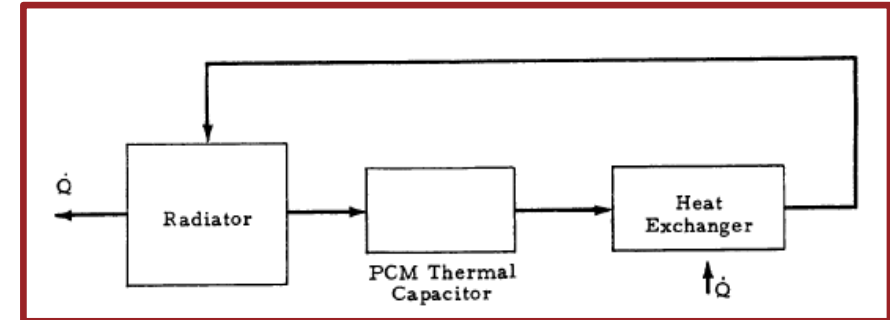


Figura 9 – Schema di impianto di un condensatore termico utilizzando PCM [15, Bibliografia]

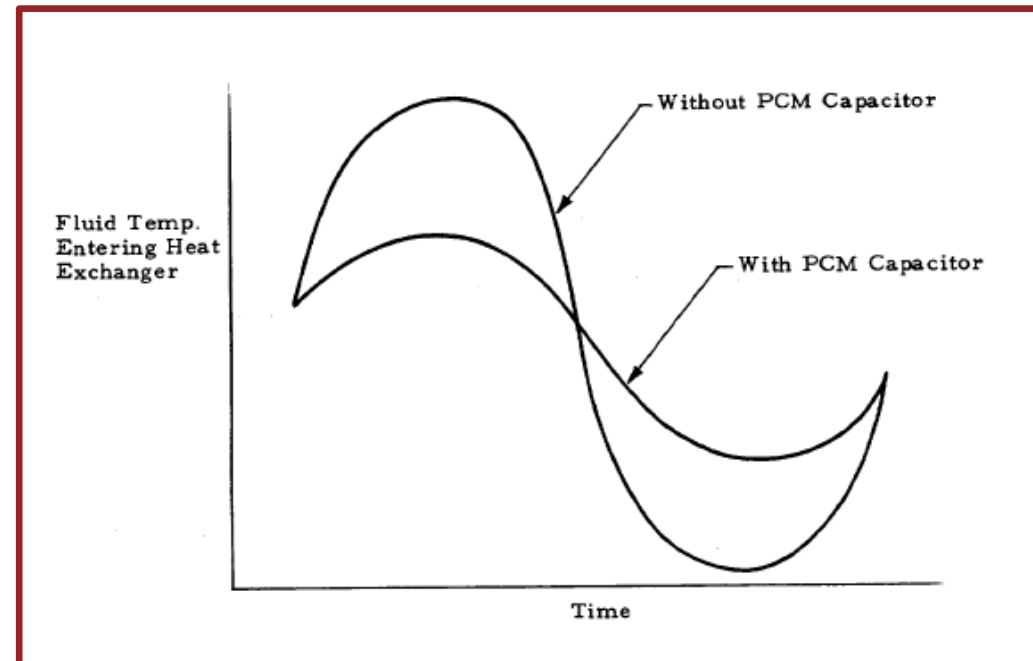


Figura 10 – Grafico relativo all'evoluzione della temperatura del fluido operativo nel tempo [15, Bibliografia]

I materiali a cambiamento di fase possono essere impiegati anche per stabilizzare la temperatura di campioni biologici

ECCO (ESA Conditioned Containers)

Container in grado di gestire temperature che vanno dai -25°C ai 40°C

Compatibili con diversi veicoli spaziali come Soyuz, HTV e la Crew Dragon di SpaceX

Utilizzati con successo dal 2008



Figura 11 – Container ECCO [17, Sitografia]

I sistemi di controllo termico che prevedono l'impiego di materiali a cambiamento di fase possono essere utilizzati anche all'interno di applicazioni spaziali dedite all'attività di ricerca e di sperimentazione

PCM integrati all'interno della strumentazione in modo da mantenere costante l'intervallo di temperatura operativa

Un esempio è rappresentato dalla misurazione delle proprietà radioattive di una superficie sfruttando i PCM

$$q_{RAD} = \frac{m_{PCM} \cdot h_f}{\Delta\theta_{melt}}$$

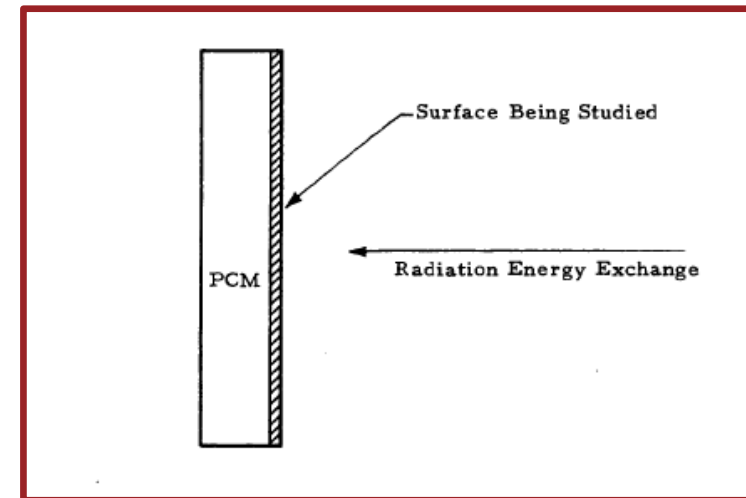


Figura 12 – Superficie da analizzare connessa ad un PCM [15, Bibliografia]

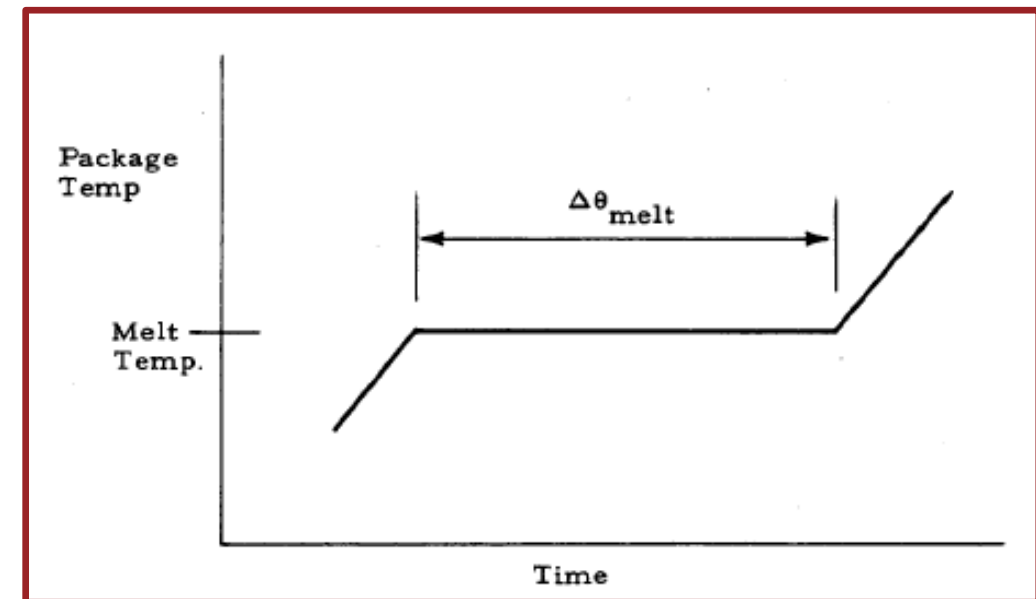


Figura 13 – Curva relativa alla temperatura del PCM in funzione del tempo[15, Bibliografia]

→ **Le prestazioni dei PCM risultano compromesse principalmente dai bassi valori di conducibilità termica e dal basso tasso di diffusione termica**

→ **Necessario approfondire le tecniche di miglioramento delle prestazioni già esistenti ma anche proseguire le ricerche in modo da far fronte a questo problema**

→ **La sopravvivenza all'interno dell'ambiente spaziale rappresenta una grande sfida per quanto riguarda i sistemi di controllo termico ma le costanti fluttuazioni di temperatura e i flussi termici scambiati dal veicolo spaziale con l'ambiente circostante costituiscono delle condizioni ideali per l'impiego dei PCM allo scopo di ottenere un affidabile, semplice ed efficiente controllo termico di tipo passivo**

1. Zakir Khan, Zulfiqar Khan, Abdul Ghafoor, A review of performance enhancement of PCM based latent heat storage system within the context of materials, thermal stability and compatibility, 2016
2. Y.B. Tao, Ya-Ling He, A review of phase change material and performance enhancement method for latent heat storage system, 2018
3. Ram Kunwer, Swapnil Sureshchandra Bhurat, Thermal Characterization of phase change materials (PCM) for heating applications, 2021
4. Suraj Arun Tat, P. Muthukumar, Pranab Kumar Mondal, Design, development and performance investigations of a latent heat storage with PCM encapsulation, 2023
5. John A. Noël, Mary Anne White, Heat capacities of potential organic phase change materials, 2018
6. Peng Q., Wei X., Ding J., Yang J., Yang X., High temperature thermal stability of molten salt materials, 2008
7. Amy S. Fleischer, Thermal Energy Storage Using Phase Change Materials - Fundamentals and Applications, 2015
8. Samer Kahwaji, Mary Anne White, Prediction of the properties of eutectic fatty acid phase change materials, 2018
9. Pal D., Joshi Y.K., Application of phase change materials to thermal control of electronic modules: a computational study, 1997
10. S. Jegadheeswaran, Sanjay D. Pohekar, Performance enhancement in latent heat thermal storage system: A review, 2009
11. Iñaki Garmendia, Haritz Vallejo, Miguel Seco, Eva Anglada, Design and Fabrication of a Phase Change Material Heat Storage Device for the Thermal Control of Electronics Components of Space Applications, 2022
12. Neri G., Koehler A., De Parolis M., Zolesi V., ESA conditioned container: a system for passive temperature controlled transportation of experiments for the international space station, 2012
13. Bogdan Marian Diaconu, Mihai Cruceru, Lucica Anghelescu, Phase change materials in space systems. Fundamental applications, materials and special requirements. A review, 2023
14. William R. Humphries, Performance of finned thermal capacitors, 1974
15. D.V. Hale, M.J. Hoover, M.J. O'Neill, Phase Change Materials Handbook, 1971
16. <https://cordis.europa.eu/article/id/255177-eutectic-alloys-boost-seasonal-thermal-energy-storage/it>
17. <http://www.kayser.it/index.php/ecco-miniocco/>
18. https://nssdc.gsfc.nasa.gov/planetary/lunar/apollo_lrv.html

GRAZIE PER L'ATTENZIONE!