مواد تغییر فاز دهنده برای ذخیره انرژی حرارتی

فهرست مطالب

- ذخیره سازی انرژی حرارتی و مزایای آن
- مشخصه های سیستم ذخیره سازی انرژی حرارتی
- معرفی روش های مختلف ذخیره سازی انرژی حرارتی
- مقایسه شرایط روش های مختلف ذخیره سازی انرژی حرارتی
- روش ترموشیمیایی برای ذخیره سازی انرژی حرارتی
- مواد مناسب برای روش ترموشیمیایی ذخیره سازی انرژی حرارتی
- ویژگی های یک ماده ترموشیمیایی مناسب
- ذخیره سازی حرارت به روش گرمای محسوس
- ویژگی مواد برای ذخیره سازی حرارت به روش گرمای محسوس
- ظرفیت گرمایی مواد

فهرست مطالب

- مزایا و معایب ذخیره سازی حرارت به روش گرمای محسوس
- ذخیره سازی حرارت به روش گرمای نهان
- ویژگی یک ماده تغییر فاز دهنده مناسب
- تفاوت بین نقطه ذوب و انجماد
- فرا سَرمایِش (فوق تبرید)
- تقسیم بندی مواد تغییر فاز دهنده
- مواد تغییر فاز دهنده فاز جامد-جامد
- مواد تغییر فاز دهنده فاز جامد-مایع
- پارافین ها
- غیر پارافین ها

فهرست مطالب

- مواد تغییر فاز دهنده غیرآلی
- مواد تغییر فاز دهنده اوتکتیک (ترکیبی)
- کپسوله کردن مواد تغییر فاز دهنده جامد-مایع
- مزایای کپسوله کردن مواد تغییر فاز دهنده جامد-مایع
- میکروکپسوله کردن مواد تغییر فاز دهنده جامد-مایع
- کاربردهای میکروکپسوله کردن مواد تغییر فاز دهنده جامد-مایع
- طراحی بستر های مواد تغییر فاز دهنده برای ذخیره انرژی حرارتی
- تکنیک های بهبود دهنده انتقال حرارت در مواد تغییر فاز دهنده

ذخیره سازی انرژی حرارتی و مزایای آن

- ذخیره سازی انرژی حرارتی (TES) به تکنولوژی ذخیره نمودن سرما و گرما برای استفاده در کاربردهای مختلف گفته می شود. به عنوان مثال، تقاضای انرژی می تواند طی روز و شب به توازن برسد. گرمای تابستان برای استفاده در زمستان ذخیره شود یا سرمای زمستان می تواند تامین کننده سیستم های تهویه هوای تابستان باشد.
- از جمله مزایای به کارگیری روش های ذخیره سازی انرژی حرارتی عبارتند از:

- تاخیر زمانی و قدرت انتقال فی مابین تولید یا دسترسی انرژی و مصرف آن در سیستم های دریافت کننده
- امنیت موجودی انرژی مراکز حساس مثل بیمارستانها، مراکز کامپیوتری و غیره
- اینرسی حرارتی (توانایی ذخیره و حفظ حرارت) به طوری که از تلفات حرارتی جلوگیری می شود

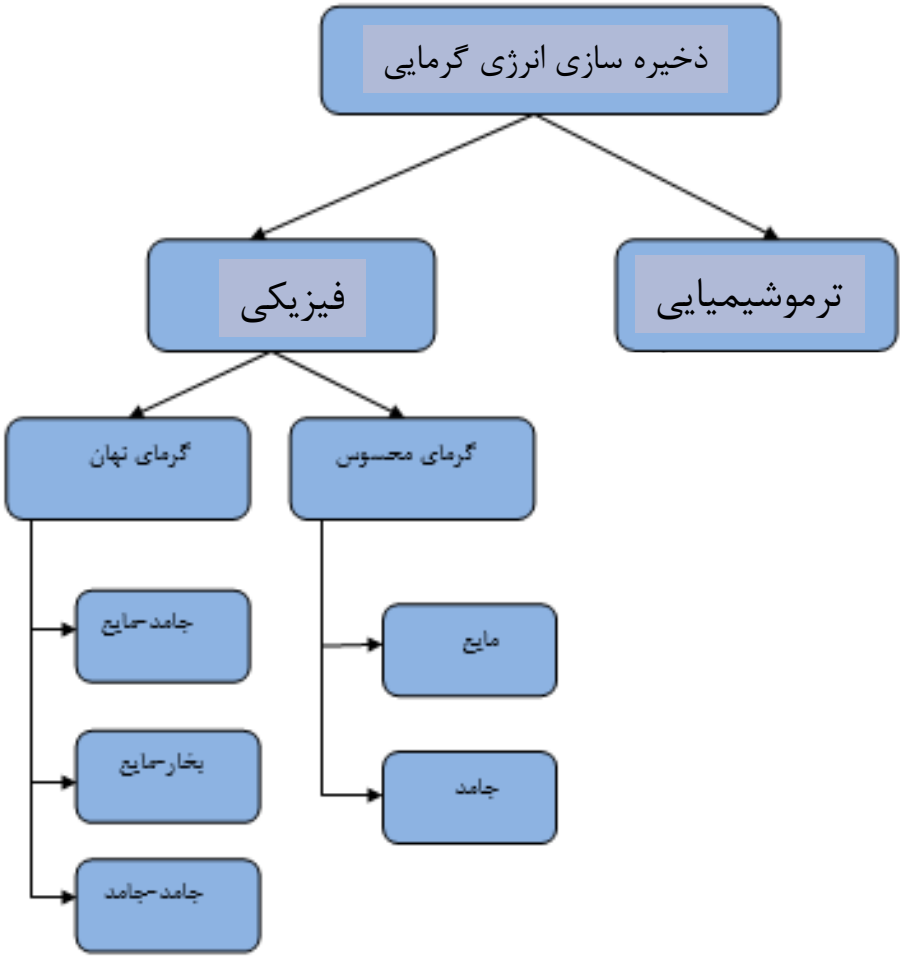
مشخصه های سیستم ذخیره سازی انرژی حرارتی

- یک سیستم ذخیره سازی انرژی حرارتی دارای مشخصه های زیر می باشد:

- مدت زمانی که سیستم میتواند انرژی حرارتی را بدون افت قابل توجهی ذخیره کند. در عمل ممکن است ذخیره انرژی حرارتی در مدت زمان کوتاه امکان پذیر باشد زیرا افت های انرژی به شکل تابش، جابجایی و هدایت وجود خواهند داشت.
- مشخصه مهم دیگر یک سیستم ذخیره انرژی حرارتی، ظرفیت حجمی انرژی یا میزان ذخیره انرژی در واحد حجم است.
- در عمل یک سیستم خوب باید انرژی حرارتی را برای زمان های طولانی تر ذخیره کند. همچنین یک سیستم خوب در حجم کمتر، انرژی بیشتری را ذخیره می کند. کاهش حجم هم در هزینه ها صرفه جویی می کند و هم تلفات را کاهش می دهد.

معرفی روش های مختلف ذخیره سازی انرژی حرارتی

- در شکل زیر روش های مختلف ذخیره سازی انرژی حرارتی نمایش داده شده است. روش های ذخیره سازی انرژی حرارتی به دو دسته کلی ترموشیمیایی و فیزیکی تقسیم بندی می شوند.



مقایسه روش های مختلف ذخیره سازی انرژی حرارتی

- در جدول زیر، رنج دمای کاری، ظرفیت ذخیره سازی، طول عمر و وضعیت تکنولوژی سه روش ذخیره سازی انرژی حرارتی مقایسه شده اند:

Performance Parameter	Type of Thermal Energy Storage		
	Sensible TES	Latent TES	Chemical TES (Sorption and Thermo-chemical)
Temperature range	Up to: 110 °C (water tanks) 50 °C (aquifers and ground storage) 400 °C (concrete)	20-40 °C (paraffins) 30-80 °C (salt hydrates)	20-200 °C
Storage density	Low (with high temperature interval): 0.2 GJ/m^3 (for typical water tanks)	Moderate (with low temperature interval): 0.3-0.5 GJ/m^3	Normally high: 0.5-3 GJ/m^3
Lifetime	Long	Often limited due to storage material cycling	Depends on reactant degradation and side reactions
Technology status	Available commercially	Available commercially for some temperatures and materials	Generally not available, but undergoing research and pilot project tests

مزایا و معایب روش های مختلف ذخیره سازی انرژی حرارتی

- در جدول زیر، مزایا و معایب سه روش ذخیره سازی انرژی حرارتی مقایسه شده اند:

	محسوس	نهان	ترموشیمیایی
Advantages	Low cost Reliable Simple application with available materials	Medium storage density Small volumes Short distance transport possibility	High storage density Low heat losses (storage at ambient temperatures) Long storage period Long distance transport possibility Highly compact energy storage
Disadvantages	Significant heat loss over time (depending on level of insulation) Large volume needed	Low heat conductivity Corrosivity of materials Significant heat losses (depending on level of insulation)	High capital costs Technically complex

روش ترموشیمیایی برای ذخیره سازی انرژی حرارتی

- ذخیره سازی انرژی حرارتی به روش ترموشیمیایی وابسته به انرژی جذب شده یا رها شده هنگام شکستن یا تغییر فرم پیوندهای مولکولی در یک واکنش شیمیایی می باشد.
- از جمله مزایای این روش عبارتند از:

- این روش دارای چگالی انرژی بالا می باشد که ناشی از واکنش شیمیایی است. این چگالی بالاتر از سایر روش های ذخیره سازی انرژی است و مقدار زیادی از انرژی را با مصرف ماده بسیار کم می توان ذخیره نمود. در حقیقت این روش یک روش فشرده است و مناسب برای جاهایی است که محدودیت فضا وجود دارد.
- این روش برای ذخیره سازی انرژی حرارتی به صورت بلند مدت (مثلا ذخیره فصلی انرژی خورشیدی) مناسب است زیرا تلفات انرژی در طول دوره ذخیره سازی وجود ندارد.
- در این روش ذخیره سازی در دمای محیط انجام می شود.

روش ترموشیمیایی برای ذخیره سازی انرژی حرارتی

- قانون اصلی ذخیره سازی حرارت توسط روش ترموشیمیایی بر اساس واکنش زیر می باشد:

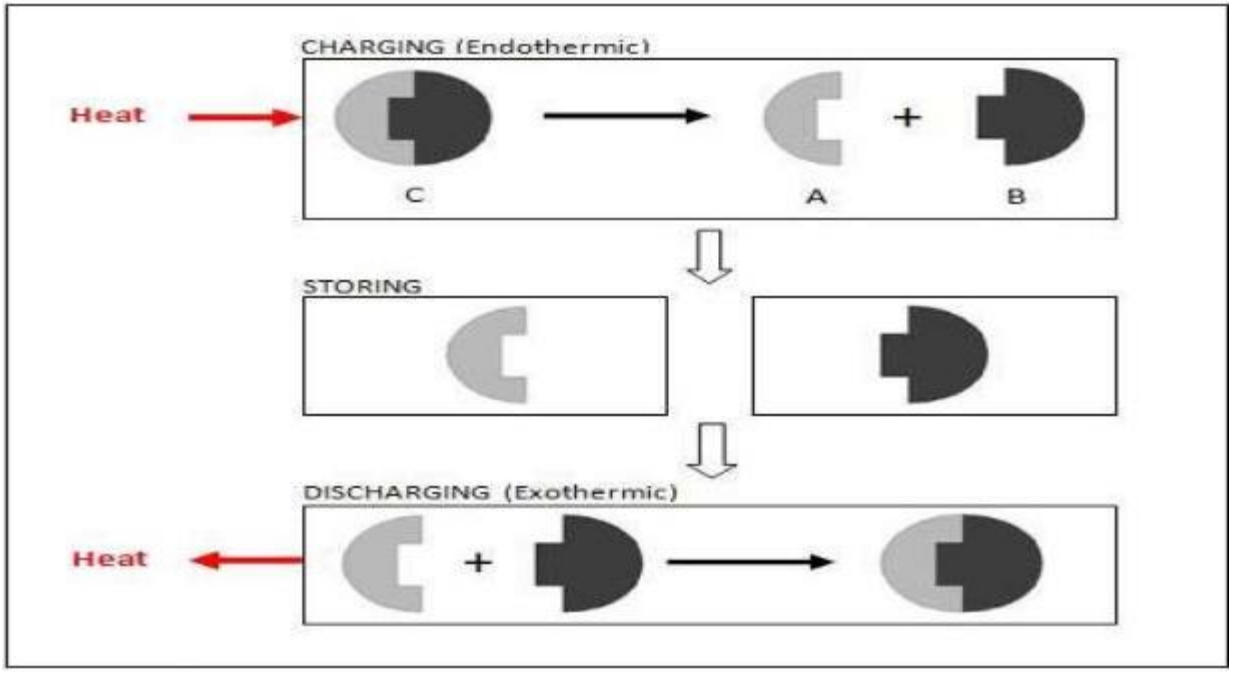
$$C + Heat \leftrightarrows A + B$$

- در این واکنش، ماده شیمیایی C انرژی حرارت را جذب کرده و تبدیل به دو جزء A و B می شود که می توانند به صورت جداگانه ذخیره شوند. واکنش معکوس می تواند وقتی که دو جزء A و B با یکدیگر ترکیب شده و دوباره ماده C را تشکیل دهند انجام شود. انرژی حرارتی در طول واکنش معکوس می تواند آزاد شود و مورد استفاده قرار گیرد. در واقع ظرفیت حرارتی این سیستم، گرمای واکنش آزاد شده هنگام تشکیل ماده C می باشد.
- معمولا ماده C در فاز جامد یا مایع و مواد A و B در هر سه فاز باشند.
- ماده A می تواند هیدروکساید، هیدرات، کربنات و ... باشد. ماده B می تواند CO، آمونیا، هیدروژن و ... باشد.

روش ترموشیمیایی برای ذخیره سازی انرژی حرارتی

- سه پروسه اصلی ذخیره سازی انرژی حرارتی به روش ترموشیمیایی عبارتند از:

  - شارژ
  - ذخیره
  - دشارژ



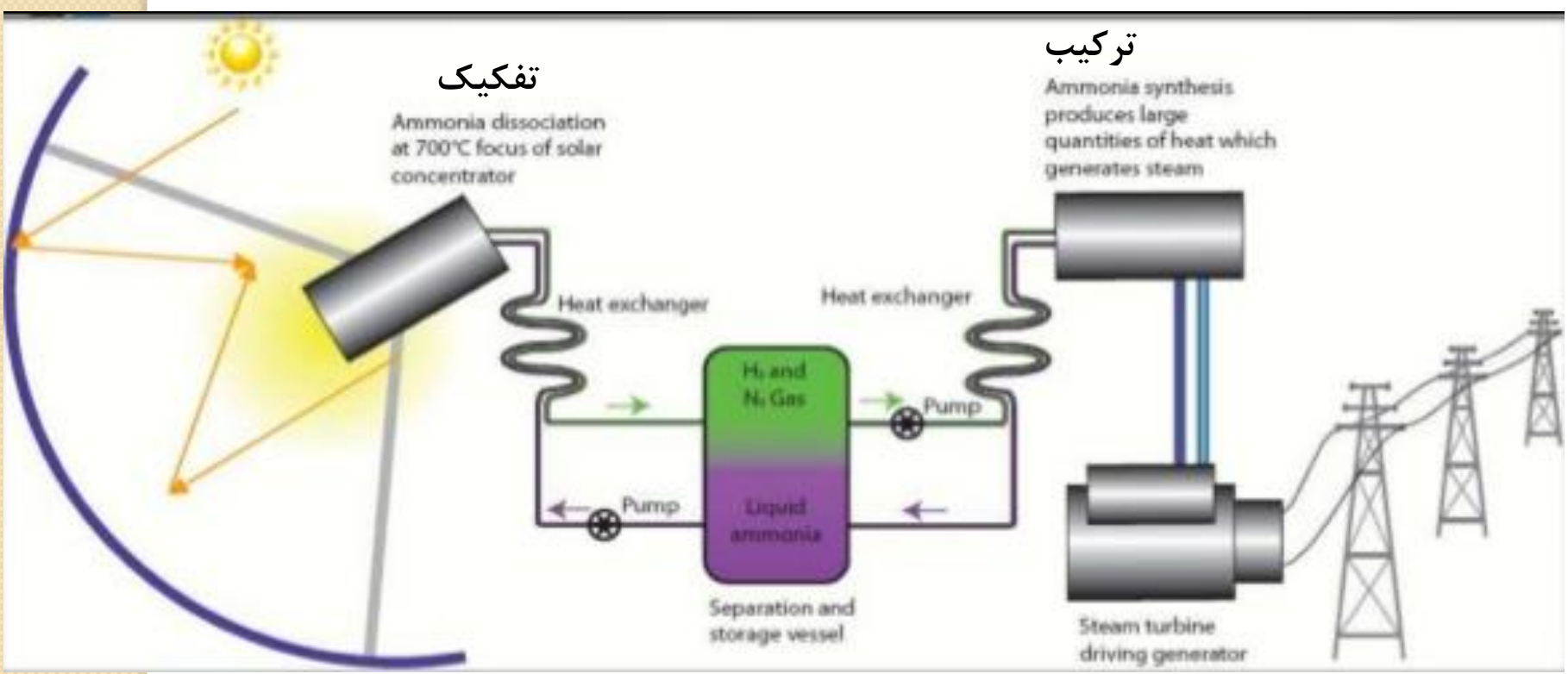
روش ترموشیمیایی برای ذخیره سازی انرژی حرارتی

- **مرحله شارژ**، یک فرآیند گرماگیر است. انرژی حرارتی در این مرحله از یک منبع انرژی گرمایی، که می تواند منبع انرژی تجدید پذیر یا منبع انرژی سوخت های فسیلی باشد، جذب می شود. این انرژی برای تفکیک ماده ترموشیمی به کار می رود. این گرما، معادل گرمای واکنش و آنتالپی تشکیل می باشد. بعد از این مرحله دو ماده متفاوت A و B تشکیل شده و ذخیره می شوند.
- **مرحله ذخیره سازی**، در این مرحله دو ماده A و B به صورت جداگانه بدون اتلاف انرژی یا اتلاف خیلی کم ذخیره می شوند. این مواد معمولا در دمای محیط ذخیره می شوند و بنابراین اتلاف آنچنانی ندارند به جز در زمان های ابتدایی بعد از شارژ که دو ماده ممکن است کمی خنک شوند.
- **مرحله دشارژ**، یک فرآیند گرماده است. انرژی حرارتی طی واکنش آزاد شده و میتوان از این گرما استفاده کرد. بعد از این مرحله، ماده اولیه دوباره تولید و از آن می توان در سیکل دوباره استفاده نمود.

روش ترموشیمیایی برای ذخیره سازی انرژی حرارتی

- در شکل زیر از ماده آمونیا ($NH3$) برای ذخیره سازی انرژی حرارتی در یک نیروگاه متمرکز کننده خورشیدی استفاده شده است:

$$2NH_3 + \Delta H \rightarrow N_2 + 3H_2$$



مواد مناسب برای روش ترموشیمیایی ذخیره سازی انرژی حرارتی

- در جدول زیر مواد مناسب برای ذخیره سازی انرژی حرارتی به روش ترموشیمیایی نمایش داده شده اند:

Table 1. Promising Materials for Thermochemical Energy Storage [8, 16]

Thermochemical Material (C)	Solid Reactant (A)	Working Fluid (B)	Energy Storage Density of Thermochemical Material (GJ/m^3)	Charging Reaction Temperature (°C)
$MgSO_4 \cdot 7H_2O$	$MgSO_4$	$7H_2O$	2.8	122
$FeCO_3$	FeO	CO_2	2.6	180
$Ca(OH)_2$	CaO	H_2O	1.9	479
$Fe(OH)_2$	FeO	H_2O	2.2	150
$CaCO_3$	CaO	CO_2	3.3	837
$CaSO_4 \cdot 2H_2O$	$CaSO_4$	$2H_2O$	1.4	89

MgSO4-Magnesium sulfate

FeCO3-Ferrous carbonate

Ca(OH)2-Calcium hydroxide

Fe(OH)2-Iron hydroxide

CaCO3-Calcium Carbonate

CaSO4.2H2O-Calcium Sulfate Dihydrate

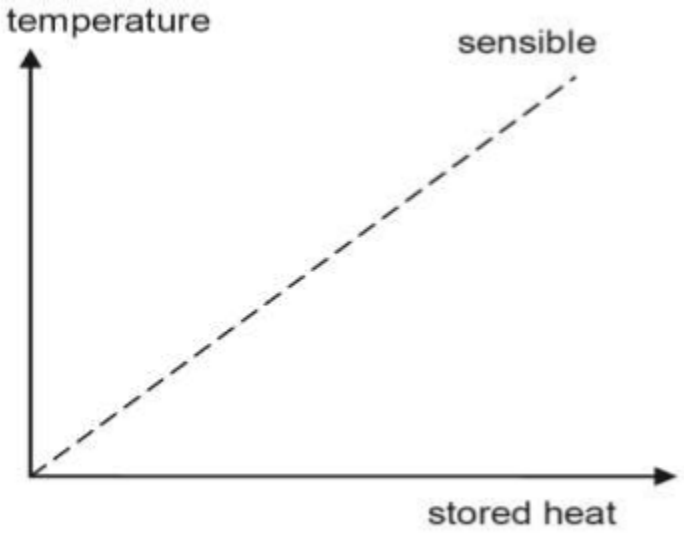
ویژگی های یک ماده ترموشیمیایی مناسب

- ویژگی های یک ماده ترموشیمیایی مناسب برای استفاده در یک سیستم ذخیره سازی انرژی حرارتی عبارتند از:

  - دوستار محیط زیست
  - غیر خورنده، غیر سمی و غیر قابل اشتعال
  - دانسیته انرژی بالا
  - مقرون به صرفه و در دسترس
  - عدم واکنش شیمیایی با گازهای محیط
  - دمای شارژ پایین (زیر ۱۰۰ درجه سانتی گراد)

ذخیره سازی حرارت به روش گرمای محسوس

- اگر دمای جسم را با دادن گرما افزایش دهیم، انرژی به صورت انرژی درونی در ماده ذخیره می شود. ذخیره سازی گرمای محسوس، با بالا بردن درجه حرارت ماده در حالت جامد، مایع و گاز انجام می شود. در این روش به دلیل اینکه تغییر دما را با یک سنسور هم می توان اندازه گیری نمود، آنرا روش محسوس می نامیم.
- شکل زیر ذخیره سازی حرارت به روش گرمای محسوس که همراه با تغییر دما است را نشان می دهد:



ذخیره سازی حرارت به روش گرمای محسوس

- مقدار گرمای ذخیره شده در ماده در این روش از رابطه زیر بیان می شود:

$$Q = \int_{T_i}^{T_f} mC_p dT$$

- همان طوریکه که مشاهده می شود، مقدار گرمای ذخیره شده از این روش به جرم، ظرفیت گرمایی و مقدار تغییر دما بستگی دارد.
- در این روش، آب به دلیل ارزانی و فراوانی، بهترین مایع ذخیره سازی حرارت محسوس در دمای زیر ۱۰۰ درجه سانتیگراد محسوب می شود. در دماهای بالاتر از ۱۰۰ درجه سانتی گراد از روغن، نمک مذاب، فلزات مایع و.... استفاده می شود.

ویژگی مواد برای ذخیره سازی حرارت به روش گرمای محسوس

- در جدول زیر، ویژگی برخی مواد جامد و مایع که از آنها می توان برای ذخیره سازی گرمای محسوس استفاده کرد، ارائه شده اند:

Medium	Fluid type	Temperature range (°C)	Density (kg/m^3)	Specific heat (J/kg K)
Rock			2560	879
Brick			1600	840
Concrete			1900–2300	880
Water		0–100	1000	4190
Caloriea HT43	Oil	12–260	867	2200
Engine oil	Oil	Up to 160	888	1880
Ethanol	Organic liquid	Up to 78	790	2400
Proponal	Organic liquid	Up to 97	800	2500
Butanol	Organic liquid	Up to 118	809	2400
Isotunaol	Organic liquid	Up to 100	808	3000
Isopentanol	Organic liquid	Up to 148	831	2200
Octane	Organic liquid	Up to 126	704	2400

- در این روش هم می توان از گاز، مایع و جامد استفاده نمود.

ظرفیت گرمایی مواد

- ظرفیت گرمایی یک ماده به دو عامل جنبش و حرکات ذرات و نیروهای جاذبه ی بین ذرات تشکیل دهنده ماده بستگی دارد.
- هنگامی که جنبش و حرکات ذرات تشکیل دهنده ی یک جسم افزایش یابد، به صورت افزایش دمای آن جسم ظاهر می شود. طبیعی است هر چه جنبش ذرات یک جسم سریع تر افزایش یابد در واقع دمای آن زودتر بالا رفته و دارای ظرفیت گرمایی کم تری خواهد بود.
- چنان چه نیروهای جاذبه ی بین ذرات تشکیل دهنده ی جسم، ضعیف تر باشند، افزایش دمای آن هم سریع تر خواهد بود. زیرا ذرات جسم، به آسانی از قید و بند این جاذبه ها رها شده، جنبش آن ها نیز زودتر افزایش یافته و دمای آن بالاتر می رود. بنابرین جسمی که دارای نیروهای جاذبه ی بین مولکولی ضعیف تری می باشد دارای ظرفیت گرمایی کم تری نیز می باشد. نیروهای جاذبه ی بین مولکول های ماده در حالت گاز کم تر از حالتهای مایع و جامد می باشد.

ظرفیت گرمایی مواد

- به عنوان مثال ظرفیت گرمایی آب در حالت مایع از بخار آب و یخ بیشتر است. در آب ذرات دارای حرکات انتقالی و ارتعاشی هستند در حالیکه در یخ مولکول ها فقط حرکت ارتعاشی دارند به همین دلیل برای بالا بردن شدت این حرکات (افزایش دما)، آب در مقایسه با یخ به گرمای بیشتری نیاز دارد. در مورد بخار آب به دلیل نیروی جاذبه بین مولکولی کم، به انرژی چندان زیاد برای افزایش انرژی جنبشی مولکول ها نیازی نیست. در نتیجه گرمای ویژه بخار آب نیز از آب کم تر است.

ظرفیت گرمایی مواد

- در صورت استفاده از مواد جامد برای ذخیره سازی انرژی حرارتی، بتن و سرامیک ریخته گری شده به دلیل قیمت پایین، هدایت حرارتی مناسب و ظرفیت گرمایی مناسب پیشنهاد می شوند.
- استفاده از نمک های مذاب برای رنج دمای کاری بالا مناسب هست. این مواد غیر سمی و غیر قابل اشتعال هستند.
- در رنج دمایی بالا، استفاده از روغن ها و فلزات مایع نیز مناسب است.
- برای ذخیره سازی حرارت به روش گرمای محسوس، آب یک انتخاب عمومی است زیرا ظرفیت گرمایی مناسبی دارد و بر خلاف جامدات به راحتی پمپ شده و انرژی را منتقل می کند.
- گازها به دلیل داشتن ظرفیت گرمایی پایین معمولا برای ذخیره گرما به صورت محسوس استفاده نمی شوند.

مزایا و معایب ذخیره سازی حرارت به روش گرمای محسوس

- سیستم های ذخیره گرمای محسوس ساده و از لحاظ تکنولوژی توسعه یافته هستند. این سیستم ها همچنین دارای معایبی نیز می باشند. از جمله معایب این سیستم ها عبارتند از:

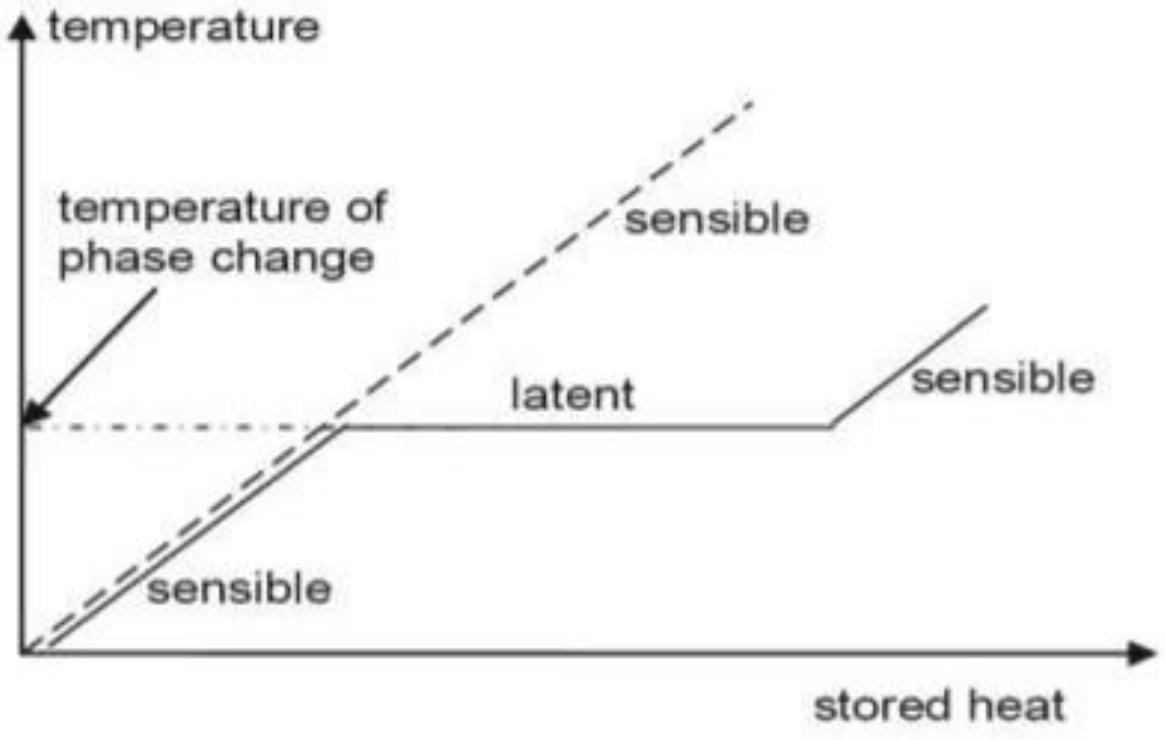
- در این روش چگالی انرژی حرارتی پایین است که موجب بالا رفتن حجم و هزینه سیستم می شود.
- دارای بازده کمی به دلیل ظرفیت پایین ذخیره حرارتی در حجم واحد می باشد.
- نیاز به حجم بالا به خصوص در مواردی که نیاز به نوسان دمایی کوچک داریم می باشد.

ذخیره سازی حرارت به روش گرمای نهان

- ذخیره سازی حرارت به روش گرمای نهان، روشی است که بر پایه جذب و یا آزاد سازی حرارت حین تغییر فاز استوار است. این روش یکی از جذاب ترین و پرکاربردترین روش های ذخیره سازی می باشد زیرا هم چگالی ذخیره انرژی بالایی دارد و هم ذخیره سازی را به دلیل تغییر فاز در دمای بالاتری انجام می دهد.
- در این روش برخلاف روش ذخیره سازی گرمای محسوس، جذب و آزاد سازی حرارت در دمای ثابت اتفاق می افتد.
- استفاده از این روش می تواند به ذخیره سازی حرارت به اندازه ۵ تا ۱۴ برابر روش ذخیره سازی گرمای محسوس منجر شود.
- مواد استفاده شده در این روش قادر هستند، انرژی حرارتی را به صورت نهان بدون هیچ تغییری حتی پس از هزاران چرخه تغییر فاز حفظ کنند.

ذخیره سازی حرارت به روش گرمای نهان

- شکل زیر ذخیره گرمای نهان در حین فرآیند تغییر فاز را نشان می دهد. حین فرآیند تغییر فاز ماده خود را در یک دمای ثابت نگه می دارد که به آن دمای تغییر فاز می گوییم.



ذخیره سازی حرارت به روش گرمای نهان

- ظرفیت ذخیره انرژی یک سیستم تغییر فاز دهنده از رابطه زیر محاسبه می شود:

$$Q = \int_{T_i}^{Tm} mC_p dT + \lambda + \int_{T_m}^{T_f} mC_p dT$$

- در این معادله Ti، Tf و Tm به ترتیب دماهای اولیه، ثانویه و تغییر فاز (مثلا دمای ذوب در تغییر فاز جامد-مایع) می باشند. λ هم گرمای نهان (مثلا ذوب در فرآیند تغییر فاز جامد-مایع) می باشد.
- این مواد همچنین ممکن است بخاطر تغییرات دما در آغاز و پایان فرآیند به صورت محسوس انرژی حرارتی را ذخیره نمایند ولی در مقایسه با گرمای نهان تغییر فاز، چنین ذخیره انرژی اندک است.

ذخیره سازی حرارت به روش گرمای نهان

- به طور کلی تغییر فاز به فرم های جامد-جامد، جامد-مایع، جامد-گاز، گاز-مایع می تواند انجام شود. در تغییر فاز جامد-گاز، با وجود گرمای نهان بالا ولی به دلیل تغییر حجم بالای اتفاق افتاده حین فرآیند تغییر فاز و مشکلات بوجود آماده برای نگهداری آنها، از این روش برای ذخیره سازی حرارت استفاده نمی شود.
- تغییر فاز از مایع به گاز هم به دلیل نیاز به گرما و حرارت بالا و همچنین ایجاد حجم بالای گاز عملی نمی‌باشد. حجم بالا سیستم را بزرگ، پیچیده و غیر عملی می کند.
- در میان مواد تغییر فاز دهنده، تغییر فاز جامد-مایع برای ذخیره انرژی حرارتی مناسب ترین می باشد.

ذخیره سازی حرارت به روش گرمای نهان

- در جدول زیر، پتانسیل مواد مختلف برای ذخیره حدود ۵۰۰۰ کیلوژول حرارت با تغییر دمای ۲۵ درجه سانتیگراد نمایش داده شده است.

Property	Heat storage material						
	Paraffin wax	Water	Dowtherm.A	Therminal 66	Cast iron	Rock	Concrete
Latent heat of fusion (kJ/kg)	190	*	*	*	*	*	*
Specific heat (kJ/kg K)	2.15	4.19	2.2	2.1	0.54	0.88	0.882
Density (kg/m^3)	790	1000	867	750	7200	1600	2200
Storage mass (kg)	20.513	47.73	90.91	95.24	370.37	227.27	226.76
Relative mass**	1	2.33	4.43	4.64	18.1	11.08	11.05
Storage volume (m^3)	0.02597	0.04773	0.10485	0.127	0.0514	0.142	0.1031
Relative volume**	1	1.84	4.04	4.89	1.98	5.47	3.969

*Latent heat of fusion is not of interest for sensible heat storage.
**Relative mass and volume are based on heat storage in paraffin wax.

The water is an excellent PCM, and its thermal storage capacity has been used from ancient times. However, the latent energy storage of the water can only be used in the applications in which it is adequate to store the thermal energy at approximately zero degrees, the melting/solidification temperature of the water. For applications in which it is needed to store the thermal energy at other temperatures, the water is not suitable; other materials should be used.

ذخیره سازی حرارت به روش گرمای نهان

- در جدول زیر، افزایش دمای مورد نیاز مواد مختلف برای ذخیره مقدار برابری از حرارت با هم مقایسه شده است:

Heat storage material	Temperature rise (°C)
Paraffin wax	59.9*
Water	93.17
Dowtherm A	145.8
Therminal 66	151.1
Concrete	311.4
Rock	312
Cast iron	486.4

اجزا یک سیستم ذخیره سازی حرارت به روش گرمای نهان

- یک سیستم ذخیره سازی حرارت به روش گرمای نهان دارای قسمت های زیر می باشد:
  - یک ماده تغییر فاز دهنده مناسب برای رنج دمایی مورد نظر
  - یک مخزن ذخیره برای قرار دادن ماده تغییر فاز دهنده
  - یک سطح تبادل گرما برای انتقال گرما از منبع گرما به ماده تغییر فاز دهنده و از ماده تغییر فاز دهنده به مصرف کننده حرارت

ویژگی یک ماده تغییر فاز دهنده مناسب

- در جدول زیر ویژگی های حرارتی، فیزیکی، شیمیایی و اقتصادی یک ماده تغییر فاز دهنده مناسب ارائه شده است:

Thermal properties	Physical properties	Chemical properties	Economic factors
Phase change temperature suitable to the desired operating range	High density	Chemical stability	Available in large quantities
High latent heat per unit mass	Low density variation during phase change	No chemical decomposition	Inexpensive
High specific heat	Little or no supercooling during freezing	Compatibility with container materials	
High thermal conductivity in both solid and liquid phases		Non-poisonous, non-inflammable and non-explosive	

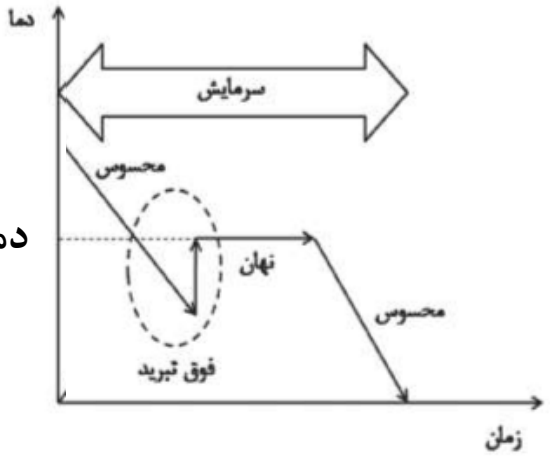
تفاوت بین نقطه ذوب و انجماد

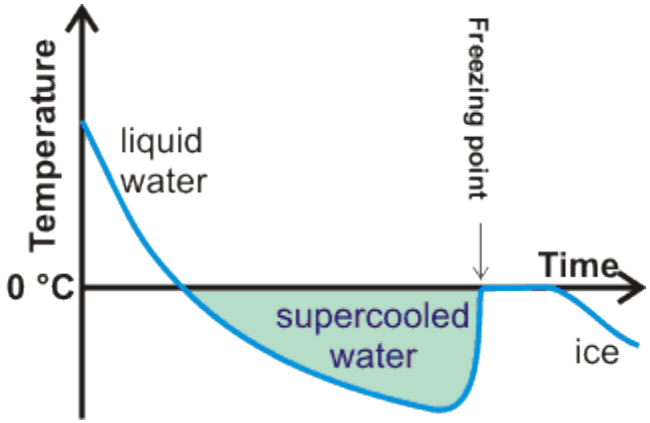
- نقطه ذوب یک ماده به عنوان دمایی گفته می شود که جامد در هنگام گرما دادن کافی به مایع تبدیل شود. این نقطه بستگی به خلوص ماده و فشار وارد شده به آن دارد.
- نقطه انجماد یک ماده به عنوان دمایی گفته می شود که ماده از حالت مایع آن به جامد تبدیل می شود. این نقطه بستگی به خلوص ماده و فشار وارد شده به آن دارد.
- برای بعضی از مواد، نقطه ذوب برابر با همان نقطه انجماد آن است. با این حال، برای مخلوط ها و ترکیبات آلی و برخی مواد ناخالص، نقطه انجماد با نقطه ذوب لزوما برابر نیست. ناخالصی ها و باکتری ها ممکن است نقش Antifreeze را ایفا کرده و باعث شوند نقطه انجماد کمتر از نقطه ذوب شوند.
- به حالتی که بین نقطه ذوب و انجماد تفاوت وجود دارد Thermal hysteresis می گویند.

فرا سَرمایِـش (فوق تبرید)

- فرا سَرمایِـش (فوق تبرید) فرآیندی است که در آن مایعات، طی سرد شدن **سریع**، به دمایی پایین‌تر از نقطه انجماد معمولی خود می‌رسند، بدون اینکه منجمد شوند.
- در این حالت دما به صورت قابل توجهی به زیر دمای انجماد اسمی می رسد ولی بدلیل وجود ناخالصی یا انجماد سریع کریستال های یخ تشکیل نمی شود و احتیاج به سرد کردن بیشتر برای تشکیل کریستال است. وقتی که اولین جوانه های کریستال تشکیل شد، دما افزایش و دوباره به دمای انجماد اسمی می رسد.

دمای انجماد اسمی





فرا سَرمایـِش (فوق تبرید)

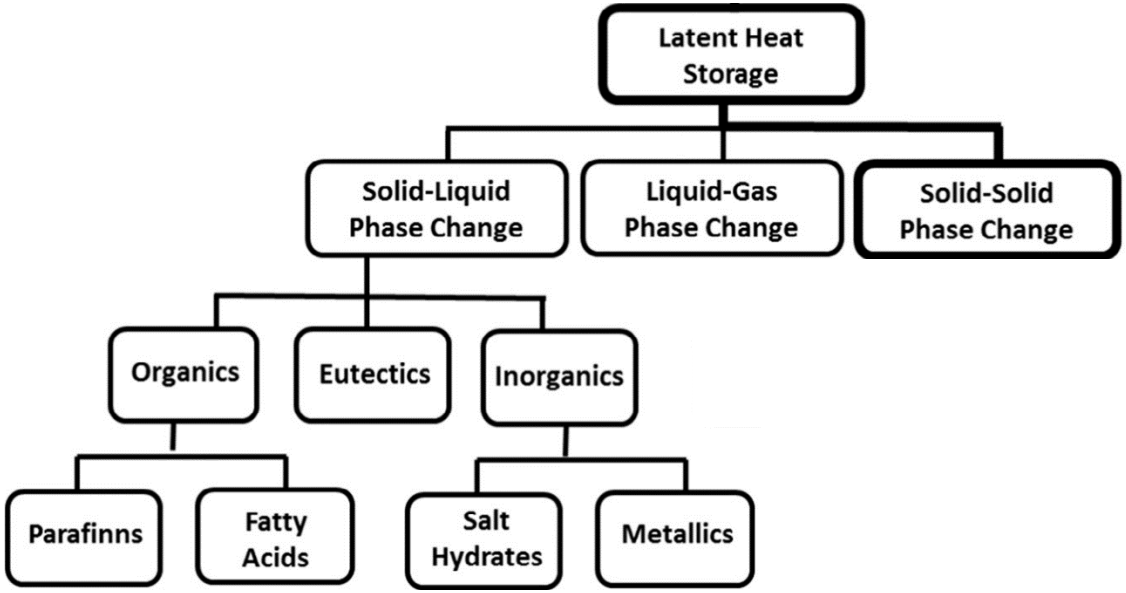
- فرا سَرمایـِش هنگامی اتفاق می افتد که گرما از یک مایع به سرعت خارج شود به طوریکه مولکول ها وقت کافی برای تراز کردن خود در ساختار مرتب شده یک جامد نداشته باشند. ماده تغییر فاز دهنده باید نرخ تبلور کافی حین انجماد و آزاد کردن حرارت داشته باشد. دقت شود اگر نرخ تبلور کافی نباشد کریستال های یخ کوچکی تشکیل می شود که ممکن است دوباره ذوب شوند. برای انجماد نیاز به رسیدن اندازه کریستال ها به مقدار مینیمی داریم.

فرا سَرمایـِش (فوق تبرید)

- فراسرمایش زیاد برای مواد تغییر فاز دهنده مناسب نیست، زیرا:
- یکی از کاربردهای ذخیره انرژی حرارتی به روش گرمای نهان و تغییر فاز، کنترل دما است یعنی گرما در یک محدوده دمای معین و ثابتی کنترل شود. با فرا سَرمایـِش، این هدف به خطر می افتد، زیرا دمای ماده تغییر فاز دهنده در حین آزاد سازی گرما، به زیر دمای انجماد اسمی می رود.
- چون این یک پدیده تصادفی است باعث می شود کنترل سیستم ذخیره حرارتی را دشوار کند.
- با وجود آزاد سازی حرارت از طریق محسوس ولی این مقدار حرارت آزاد شده در مقایسه با حرارت آزاد شده از طریق نهان خیلی کمتر است.

تقسیم بندی مواد تغییر فاز دهنده

- شکل زیر انواع مواد تغییر فاز دهنده را نشان می دهد:

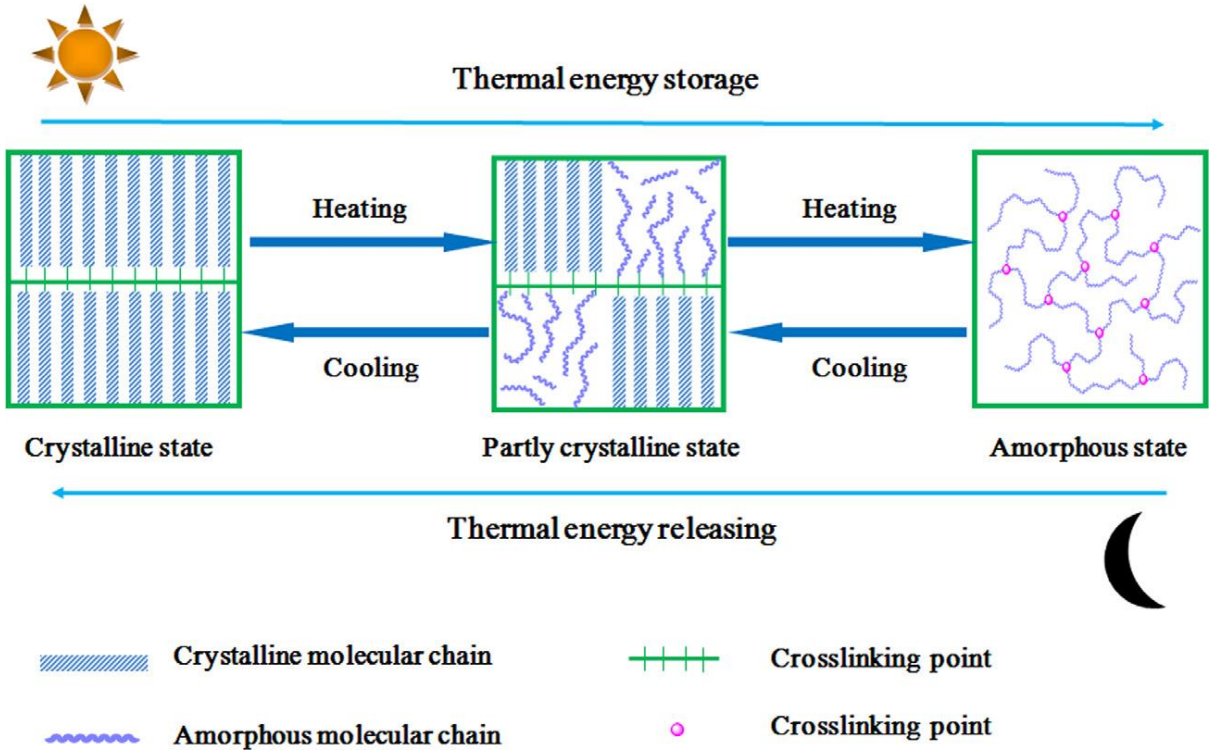


مواد تغییر فاز دهنده جامد-جامد

- مواد تغییر فاز دهنده جامد-جامد می توانند برای ذخیره سازی حرارت مورد استفاده قرار گیرند. در این روش گرما به شکل تغییر ساختار ماده از یک ساختار به ساختار دیگر ذخیره می شود. در این روش خواص کلی جامد حفظ می شود و فقط ساختار مولکولی تغییر می کند.
- خیلی از مواد جامد، حین دریافت حرارت ساختار مولکولیشان عوض می شود ولی تعداد خیلی کمی از آنها گرمای نهان کافی برای استفاده در سیستم های ذخیره سازی حرارتی دارند.
- پلی یورتان، پلی بوتادی ان و پلی اتیلن از جمله مهمترین مواد تغییر فاز دهنده جامد-جامد می باشند.

مواد تغییر فاز دهنده جامد-جامد

- در شکل زیر تغییر ساختار ملوکولی از حالت کریستالی به حالت نیمه کریستالی و غیر کریستالی (بی نظم) با دریافت حرارت و برعکس از حالت غیرکریستالی به کریستالی حین فرآیند آزاد کردن حرارت نشان داده شده است.



مواد تغییر فاز دهنده جامد-جامد

- مزایای روش استفاده از مواد تغییر فاز دهنده جامد-جامد برای ذخیره سازی حرارتی عبارتند از:
  - نداشتن هیچ گونه نشتی حین تغییر فاز
  - احتیاج نداشتن به کپسوله کردن
  - آماده سازی آسان در ابعاد دلخواه
  - تغییر حجم کمتر حین تغییر فاز
- معایب روش استفاده از مواد تغییر فاز دهنده جامد-جامد برای ذخیره سازی حرارتی عبارتند از:
- ظرفیت ذخیره انرژی پایین
- کند بودن فرآیند ذخیره انرژی

مواد تغییر فاز دهنده فاز جامد-مایع

- مواد تغییر فاز دهنده فاز جامد-مایع معمولا به سه گروه آلی، غیر آلی و یوتکتیک ها تقسیم بندی می شوند.
- مواد آلی را می‌توان به گروه پارافین‌ها و غیرپارافین‌ها مانند استرها، اسیدهای چرب، الکل‌ها و اسید گلیکولیک تقسیم‌بندی نمود.

پارافین ها

- پارافین زنجیره هایی از CH_3 (متیل) هستند. آنها مقاوم، ایمن، غیر خورنده، غیر سمی، قابل بازیافت و دارای قیمت پایینی هستند. در دمای زیر ۵۰۰ درجه سانتیگراد پایدار بوده و تغییرات حجمی کمتری در حالت ذوب دارند.
- تبلور زنجیره CH_3 مقدار زیادی گرمای نهان را حین جامد سازی رها کنید.
- در جدول زیر نقطه انجماد و گرمای نفوذ چند پارافین نمایش داده شده است:

Paraffin[a]	Freezing point/ range (°C)	Heat of fusion (kJ/kg)
6106	42–44	189
P116[c]	45–48	210
5838	48–50	189
6035	58–60	189
6403	62–64	189
6499	66–68	189

پارافین به عنوان ماده تغییر فاز دهنده

پارافین ها

No. of carbon atoms	Melting point (°C)	Latent heat of fusion (kJ/kg)
14	5.5	228
15	10	205
16	16.7	237.1
17	21.7	213
18	28.0	244
19	32.0	222
20	36.7	246
21	40.2	200
22	44.0	249
23	47.5	232
24	50.6	255
25	49.4	238
26	56.3	256
27	58.8	236
28	61.6	253
29	63.4	240
30	65.4	251
31	68.0	242
32	69.5	170
33	73.9	268
34	75.9	269

- نقطه ذوب این مواد با افزایش تعداد اتم های کربن و افزایش طول زنجیره CH_3 افزایش می یابد.
- گرمای نهان این مواد با تعداد اتم های کربن و طول زنجیره CH_3 رابطه مستقیم ندارد.
- در کنار ویژگی های مثبت، رسانایی حرارتی پایین، عدم سازگاری با ظروف پلاستیکی و اشتعال پذیری متوسط از نقاط ضعف پارافین ها هستند.

مواد آلی غیر پارافین

- مواد آلی غیر پارافین شامل تعداد زیادی مواد تغییر فاز دهنده با خواص بسیار متنوع هستند. استرها، اسیدهای چرب، الکل‌ها و اسید گلیکولیک در این طبقه بندی قرار می گیرند. برخلاف پارافین ها که خاصیت شبیه به هم دارند، هرکدام از این مواد، خواص مخصوص به خود را دارند.
- این مواد بسیار قابل اشتعال هستند و نباید در معرض دمای بیش از حد بالا، شعله و مواد اکسید کننده قرار بگیرند.
- برخی از ویژگی های این مواد آلی عبارتند از گرمای نهان ذوب بالا، رسانایی حرارتی پایین، بی ثباتی در دماهای بالا، سطح سمیت متغیر و نقطه شعله زنی پایین.
- این مواد بدون فرا سَرمایِش منجمد می شوند. قیمت این مواد ۲ تا ۲.۵ برابر گرانتر از پارافین هاست. از نظر خورندگی متوسط هستند. این مواد مناسب برای کاربردهای ذخیره سازی انرژی حرارتی با گرمای نهان در درجه حرارت پایین هستند.

مواد آلی غیر پارافین

- در جدول زیر خواص مواد آلی غیر پارافین نمایش داده شده اند:

Material	Melting point (°C)	Latent heat (kJ/kg)
Hypophosphoric acid	55	213
O-Xylene dichloride	55.0	121
β-Chloroacetic acid	56.0	147
Chloroacetic acid	56	130
Nitro naphthalene	56.7	103
Trimyristin	33–57	201–213
Heptaudecanoic acid	60.6	189
α-Chloroacetic acid	61.2	130
Bee wax	61.8	177
Bees wax	61.8	177
Glyolic acid	63.0	109
Glycolic acid	63	109
p-Bromophenol	63.5	86
Azobenzene	67.1	121
Acrylic acid	68.0	115
Dinto toluent (2,4)	70.0	111
Phenylacetic acid	76.7	102
Thiosinamine	77.0	140
Bromcamphor	77	174
Durene	79.3	156
Benzylamine	78.0	174
Methyl brombrenzoate	81	126
Alpha napthol	96	163
Glautaric acid	97.5	156
p-Xylene dichloride	100	138.7
Catechol	104.3	207
Quinone	115	171
Acetanilide	118.9	222
Succinic anhydride	119	204
Benzoic acid	121.7	142.8
Stibene	124	167
Benzamide	127.2	169.4

Material	Melting point (°C)	Latent heat (kJ/kg)
Formic acid	7.8	247
Caprilic acid	16.3	149
Glycerin	17.9	198.7
D-Lattic acid	26	184
Methyl palmitate	29	205
Camphenilone	39	205
Docasyl bromide	40	201
Caprylone	40	259
Phenol	41	120
Heptadecanone	41	201
1-Cyclohexylooctadecane	41	218
4-Heptadacanone	41	197
p-Joluidine	43.3	167
Cyanamide	44	209
Methyl eicosanate	45	230
3-Heptadecanone	48	218
2-Heptadecanone	48	218
Hydrocinnamic acid	48.0	118
Cetyl alcohol	49.3	141
α-Nepthylamine	50.0	93
Camphene	50	238
O-Nitroaniline	50.0	93
9-Heptadecanone	51	213
Thymol	51.5	115
Methyl behenate	52	234
Diphenyl amine	52.9	107
p-Dichlorobenzene	53.1	121
Oxolate	54.3	178

مواد تغییر فاز دهنده غیرآلی (نمک های هیدرات)

- مواد تغییر فاز دهنده غیر آلی به دو گروه نمک های هیدرات و فلزات تقسیم بندی می شوند. نمک های هیدرات دارای ویژگی های زیر هستند:

  - بالا بودن گرمای نهان در واحد حجم
  - بالا بودن ضریب هدایت حرارتی (تقریبا ۲ برابر پارافین ها)
  - پایین بودن تغییرات حجمی در حالت ذوب
  - خورنده نبودن و سازگار با پلاستیک
  - سمی بودن کم
  - قیمت مناسب

نمک های هیدرات H3039

- مشکل اصلی نمک های هیدرات بحث فراسرمایش است. نرخ جوانه زدن بلورها در دمای انجماد خیلی پایین است و به منظور یک نرخ قابل قبول جوانه زایی، محلول باید در دمایی پایین تر از دمای انجماد سرد شود و فرآیند دشارژ به تعویق می افتد.

مواد تغییر فاز دهنده غیرآلی (نمک های هیدرات)

- در جدول زیر خواص نمک های هیدرات نمایش داده شده است:

Material	Melting point (°C)	Latent heat (kJ/kg)
$K_2HPO_4 \cdot 6H_2O$	14.0	109
$FeBr_3 \cdot 6H_2O$	21.0	105
$Mn(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$	25.5	148
$FeBr_3 \cdot 6H_2O$	27.0	105
$CaCl_2 \cdot 12H_2O$	29.8	174
$LiNO_3 \cdot 2H_2O$	30.0	296
$LiNO_3 \cdot 3H_2O$	30	189
$Na_2CO_3 \cdot 10H_2O$	32.0	267
$Na_2SO_4 \cdot 10H_2O$	32.4	241
$KFe(SO_4)_2 \cdot 12H_2O$	33	173
$CaBr_2 \cdot 6H_2O$	34	138
$LiBr_2 \cdot 2H_2O$	34	124
$Zn(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$	36.1	134
$FeCl_3 \cdot 6H_2O$	37.0	223
$Mn(NO_3)_2 \cdot 4H_2O$	37.1	115
$Na_2HPO_4 \cdot 12H_2O$	40.0	279
$CoSO_4 \cdot 7H_2O$	40.7	170
$KF \cdot 2H_2O$	42	162
$MgI_2 \cdot 8H_2O$	42	133
$CaI_2 \cdot 6H_2O$	42	162
$K_2HPO_4 \cdot 7H_2O$	45.0	145
$Zn(NO_3)_2 \cdot 4H_2O$	45	110
$Mg(NO_3) \cdot 4H_2O$	47.0	142
$Ca(NO_3) \cdot 4H_2O$	47.0	153

Material	Melting point (°C)	Latent heat (kJ/kg)
$Fe(NO_3)_3 \cdot 9H_2O$	47	155
$Na_2SiO_3 \cdot 4H_2O$	48	168
$K_2HPO_4 \cdot 3H_2O$	48	99
$Na_2S_2O_3 \cdot 5H_2O$	48.5	210
$MgSO_4 \cdot 7H_2O$	48.5	202
$Ca(NO_3)_2 \cdot 3H_2O$	51	104
$Zn(NO_3)_2 \cdot 2H_2O$	55	68
$FeCl_3 \cdot 2H_2O$	56	90
$Ni(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$	57.0	169
$MnCl_2 \cdot 4H_2O$	58.0	151
$MgCl_2 \cdot 4H_2O$	58.0	178
$CH_3COONa \cdot 3H_2O$	58.0	265
$Fe(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$	60.5	126
$NaAl(SO_4)_2 \cdot 10H_2O$	61.0	181
$NaOH \cdot H_2O$	64.3	273
$Na_3PO_4 \cdot 12H_2O$	65.0	190
$LiCH_3COO \cdot 2H_2O$	70	150
$Al(NO_3)_2 \cdot 9H_2O$	72	155
$Ba(OH)_2 \cdot 8H_2O$	78	265
$Mg(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$	89.9	167
$KAl\ (SO_4)_2 \cdot 12H_2O$	91	184
$MgCl_2 \cdot 6H_2O$	117	167

مواد تغییر فاز دهنده غیرآلی (فلزات)

- مواد تغییر فاز دهنده غیر آلی فلزات شامل فلزات با نقطه ذوب پایین هستند. این مواد بدلیل وزن بالایشان هنوز به صورت جدی مورد استفاده قرار نگرفتند. گرمای نهان پایین در واحد وزن دارند. ضریب هدایت حرارتی بالا دارند. ظرفیت گرمایی پایین دارند.
- در میان مواد غیر آلی، از نمک های هیدرات بیشتر در زمینه خورشیدی استفاده شده است. در جدول زیر خواص فلزات نمایش داده شده است:

Material	Melting point (°C)	Latent heat (kJ/kg)
Gallium–gallium antimony eutectic	29.8	–
Gallium	30.0	80.3
Cerrolow eutectic	58	90.9
Bi–Cd–In eutectic	61	25
Cerrobend eutectic	70	32.6
Bi–Pb–In eutectic	70	29
Bi–In eutectic	72	25
Bi–Pb–tin eutectic	96	–
Bi–Pb eutectic	125	–

مواد تغییر فاز دهنده اوتکتیک (ترکیبی)

- یک اوتکتیک، ترکیبی از دو یا چند جز با نقطه ذوب پایین می باشد که هر یک از اجزا به طور همسان ذوب یا منجمد می شوند. این مواد معمولا بدون تفکیک ذوب یا منجمد می شوند. مواد تغییر فاز دهنده اوتکتیک (ترکیبی) می توانند به صورت آلی-آلی، معدنی-معدنی و یا آلی-معدنی باشند. این فناوری جدید است و اطلاعات زیادی در مورد خواص شیمیایی و حرارتی این مواد در دسترس نیست.

نمک اوتکتیک

مواد تغییر فاز دهنده اوتکتیک (ترکیبی)

- در جدول زیر خواص برخی از مواد ترکیبی نمایش داده شده است:

Material	Composition (wt.%)	Melting point (°C)	Latent heat (kJ/kg)
$CaCl_2 \cdot 6H_2O + CaBr_2 \cdot 6H_2O$	45 + 55	14.7	140
Triethylolethane + water + urea	38.5 + 31.5 + 30	13.4	160
$C_{14}H_{28}O_2 + C_{10}H_{20}O_2$	34 + 66	24	147.7
$CaCl_2 + MgCl_2 \cdot 6H_2O$	50 + 50	25	95
$CH_3CONH_2 + NH_2CONH_2$	50 + 50	27	163
Triethylolethane + urea	62.5 + 37.5	29.8	218
$Ca(NO_3) \cdot 4H_2O + Mg(NO_3)_3 \cdot 6H_2O$	47 + 53	30	136
$CH_3COONa \cdot 3H_2O + NH_2CONH_2$	40 + 60	30	200.5
$NH_2CONH_2 + NH_4NO_3$	53 + 47	46	95
$Mg(NO_3)_3 \cdot 6H_2O + NH_4NO_3$	61.5 + 38.5	52	125.5
$Mg(NO_3)_3 \cdot 6H_2O + MgCl_2 \cdot 6H_2O$	58.7 + 41.3	59	132.2
$Mg(NO_3)_3 \cdot 6H_2O + MgCl_2 \cdot 6H_2O$	50 + 50	59.1	144
$Mg(NO_3)_3 \cdot 6H_2O + Al(NO_3)_2 \cdot 9H_2O$	53 + 47	61	148
$CH_3CONH_2 + C_{17}H_{35}COOH$	50 + 50	65	218
$Mg(NO_3)_2 \cdot 6H_2O + MgBr_2 \cdot 6H_2O$	59 + 41	66	168
Napthalene + benzoic acid	67.1 + 32.9	67	123.4
$NH_2CONH_2 + NH_4Br$	66.6 + 33.4	76	151
$LiNO_3 + NH_4NO_3 + NaNO_3$	25 + 65 + 10	80.5	113
$LiNO_3 + NH_4NO_3 + KNO_3$	26.4 + 58.7 + 14.9	81.5	116
$LiNO_3 + NH_4NO_3 + NH_4Cl$	27 + 68 + 5	81.6	108

کپسوله کردن مواد تغییر فاز دهنده جامد-مایع

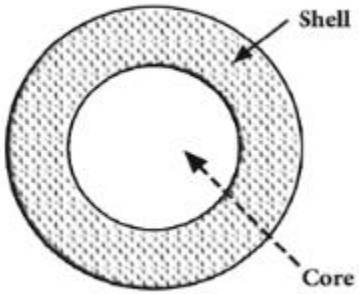
- با توجه به قابلیت جاری شدن مواد تغییر فاز دهنده در فاز مایع، نیاز به محفظه هایی خواهد بود که در فاز مایع به عنوان ظرف حاوی این مواد عمل نمایند. به محفظه ای که این مواد درون آن قرار میگیرند کپسول می گویند. در حقیقت کپسوله کردن مواد تغییر فاز دهنده باعث مهار کردن این مواد می شود. از جمله مزایای کپسوله کردن عبارت است از:

  - باعث مقاومت، انعطاف پذیری و پایداری حرارتی سیستم می شود.
  - از خوردگی اجزا جلوگیری می کند.
  - به عنوان مانع عمل می کند و از اینترکشن زیان آور با محیط جلوگیری می کند.
  - می تواند سطح مورد نیاز برای تبادل حرارت را فراهم کند.

- کپسول ها با توجه به اندازه و کاربردشان به دو دسته میکروکپسول و ماکروکپسول طبقه بندی می شوند.

میکروکپسوله کردن مواد تغییر فاز دهنده جامد-مایع

- در روش میکروکپسول مواد در کره های بسیار ریزی با قطر بین ۱ تا ۳۰ میکرومتر تعبیه می شوند. هر میکروکپسول حاوی هسته و پوسته است. مواد تغییر فاز دهنده به عنوان هسته، می توانند در حین تغییر حالت جامد-مایع، انرژی نهان حرارتی را جذب، ذخیره و آزاد کنند. پوسته می تواند از جنس مواد پلیمری (لاستیک) باشد.
- پوسته باید دارای هدایت حرارتی بالا و دمای ذوب بالاتری نسبت به ماده تغییر فاز دهنده باشد.

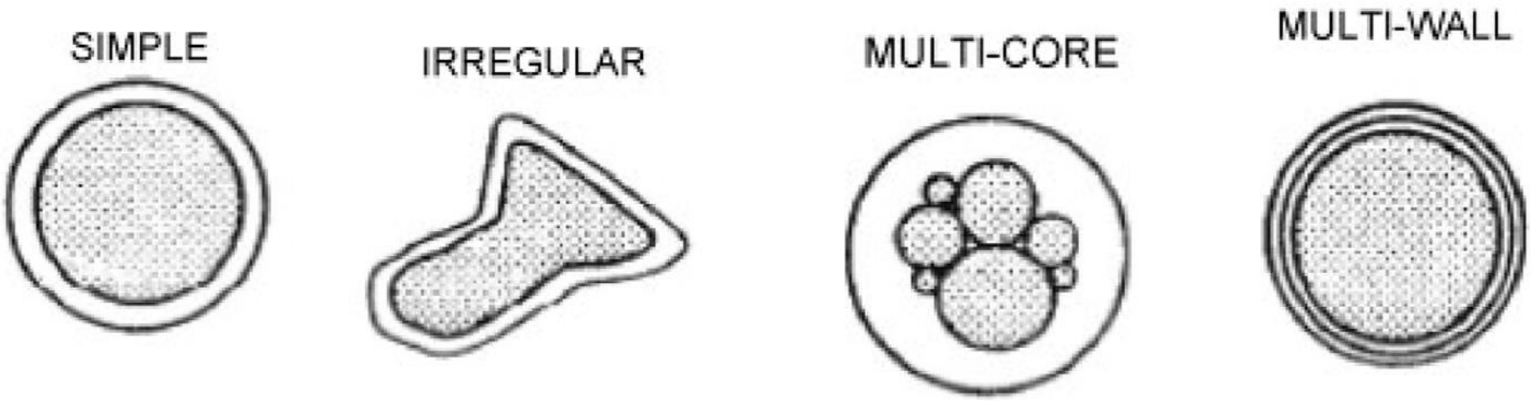


مواد تغییر فاز دهند به فرم میکروکپسول

- میکروکپسول ها باید دارای دیواره ی فشرده و سطح صافی و نفوذ ناپذیری باشند.
- پوسته از نظر اینکه جزئی به سامانه مواد تغییر فازی می کند و کسر جرمی ماده تغییر فازی را کاهش می دهد، می تواند منجر به کاهش کارایی حرارتی سامانه شود.

میکروکپسوله کردن مواد تغییر فاز دهنده جامد-مایع

- باتوجه به کاربرد ماده تغییر فاز دهنده، میکروکپسوله کردن ممکن است به صورت کروی ساده، نامنظم، چند هسته ای و چند دیواره ای انجام شود.



کاربردهای میکروکپسوله کردن مواد تغییر فاز دهنده

- در جدول زیر انواع کاربردهای میکروکپسوله کردن مواد تغییر فاز دهنده نشان داده شده اند:

Application fields of the MPCMs	Content
Buildings	Concrete mixes Cement Mortar Wallboards Sandwich panels Gypsum plaster Slabs
Textiles	Shoe insoles Cold water diving garments Leather products Military uniforms
Microencapsulated phase change material slurry	Microchannel heat exchangers Solar energy collectors Thermal power plants Building heating and cooling systems Air conditioning systems

کاربردهای میکروکپسوله کردن مواد تغییر فاز دهنده

- با توجه به اندازه بسیار ریز میکروکپسول ها، می توان این مواد را در انواع مواد ساختمانی دارای خلل و فرج در حین تولید ملات و به عنوان مواد افزودنی استفاده نمود. از جمله موارد کاربرد به این صورت، می توان به استفاده در بتن دیوارها و سقف و یا تخته های گچ حاوی این مواد اشاره نمود. از مزایای این روش، سهولت استفاده و از جمله معایب آن هزینه بالای تولید میکروکپسول هاست.
- جنس میکروکپسول ها جهت استفاده در مواد ساختمانی باید به گونه ای انتخاب شود که در مقابل نیروهای مکانیکی، گرما و بسیاری از مواد شیمیایی مقاوم باشد.

کاربردهای میکروکپسوله کردن مواد تغییر فاز دهنده

- در مواد تغییر فاز دهنده بکار رفته در جداره ساختمان، اگر ماده انتخاب شده دمای ذوبی در محدوده دمای همان منطقه در حوالی ظهر داشته باشد، فرایند تغییر فاز در طول روز در حدود ظهر که دمای محیط به حداکثر خود می رسد می تواند اتفاق بیفتد. بنابراین، پس از گرم شدن محیط و رسیدن آن به دمای حداکثر، مواد تغییر فاز دهنده در جداره نیز گرم شده و به نقطه ذوب خود می رسد، اما از این زمان به بعد، ماده مذکور به جذب انرژی گرمایی محیط ادامه می دهد ولی در برابر افزایش دمای خود و محیط اطراف خود مقاومت نموده و دما را در همان نقطه ذوب حفظ می نماید. این روند تا زمانی ادامه می یابد که کل مواد تغییر فاز دهنده از حالت جامد به مایع تبدیل شود که معمولاً چند ساعت به طول خواهد انجامید. پس از ذوب شدن کامل مواد تغییر فاز دهنده، مقاومت آن نیز در برابر افزایش دما از بین خواهد رفت، اما این اتفاق زمانی خواهد افتاد که به دلیل گذشتن ساعات اوج گرمای روز، محیط هم روند گرمایشی خود را متوقف نموده است. بنابراین، با استفاده از این مواد در جداره ساختمان توانسته ایم به طریقی از بار گرمایی محیط در ساعات اوج گرمایی بکاهیم.
- عکس این اتفاق طی فرایند تشکیل جامد صورت می پذیرد، به این معنی که علیرغم سرد شدن هوا در طی شب، مواد تغییر فاز دهنده پس از رسیدن به نقطه انجماد خود به دلیل آزادسازی گرمای نهان و تبدیل حالت از مایع به جامد در برابر کاهش دما مقاومت می نماید. این ماده از طریق آزادسازی گرمای جذب شده در طول روز، از کاهش دمای خود و محیط اطراف خود جلوگیری نموده و از این طریق نیز بخشی از بار سرمایشی محیط در طول ساعات سرد شب را کاهش خواهد داد. بنابراین، تنها با انتخاب هوشمندانه ماده تغییر فاز دهنده از نظر دمای تغییر فاز و کاربرد آن در جداره ساختمان می توان براحتی و بدون استفاده از تجهیزات مکانیکی اضافه و تنها با استفاده از قابلیت طبیعی این مواد برای تغییر فاز، از مصرف انرژی سرمایش و گرمایش در ساعات اوج مصرف انرژی کاست که این امر از طریق کاهش نوسانات دمای ساختمان و تامین نمودن دمای هوای متعادل تری در ساعات اوج گرما یا اوج سرما میسر می شود.

کاربردهای میکروکپسوله کردن مواد تغییر فاز دهنده

- از مواد تغییر فاز دهنده میکروکپسوله شده می توان برای تنظیم حرارتی پارچه ها و لباس ها استفاده نمود. از جمله موارد کاربرد این مواد در زمینه منسوجات می توان به موارد زیر اشاره نمود:
  - کفی کفش
  - لباس غواصی آب سرد
  - محصولات چرمی
  - لباس نظامی

کاربردهای میکروکپسوله کردن مواد تغییر فاز دهنده

- مواد تغییر فاز دهنده میکروکپسوله شده را می توان با سیال مخلوط کرد و به فرم دوغاب درآورد و به عنوان سیال انتقال حرارتی برای بهبود نرخ انتقال حرارت استفاده نمود. دوغاب می تواند مقدار زیادی از حرارت را ذخیره کرده و انتقال دهد. موارد استفاده از این مواد در سیستم های انتقال حرارتی زیر می باشد:

  - مبدلهای حرارتی با میکروکانال ها
  - گردآورنده های خورشیدی
  - نیروگاههای حرارتی
  - سیستم های سرمایش و گرمایش ساختمان

کپسوله کردن مواد تغییر فاز دهنده جامد-مایع

- با توجه به هزینه بالای تولید میکروکپسول ها و با هدف کم هزینه تر شدن، می توان مواد تغییر فاز دهنده را به صورت پاکتهای با ابعاد بزرگتر به کار برد.
- در روش ماکروکپسول، مواد در محفظه های بزرگتری به صورت پاکت یا ظروف با جنس های مختلف جاسازی می شوند. مواد تغییر فاز دهنده در این روش از چند گرم تا چند کیلوگرم در این محفظه ها جاگذاری می شود.

➢ شکل محفظه می تواند به صورت پنل های مستطیلی، کروی و... بسته به کاربرد آنها باشد.

مواد تغییر فاز دهنده به فرم ماکروکپسول

کپسوله کردن مواد تغییر فاز دهنده جامد-مایع

- محفظه نگهدارنده مواد تغییر فاز دهنده باید قابلیت جذب تغییرات حجم این مواد به هنگام تغییر فاز را داشته باشد و سازگار با آن نیز باشد.
- جنس محفظه می تواند از بطری های پلاستیکی (بطری های پلی اتیلن با چگالی بالا و پایین، بطری های پلی پروپیلن)، قوطی حلبی پوشانده شده با قلع و قوطی های فلزی دیگر باشد.

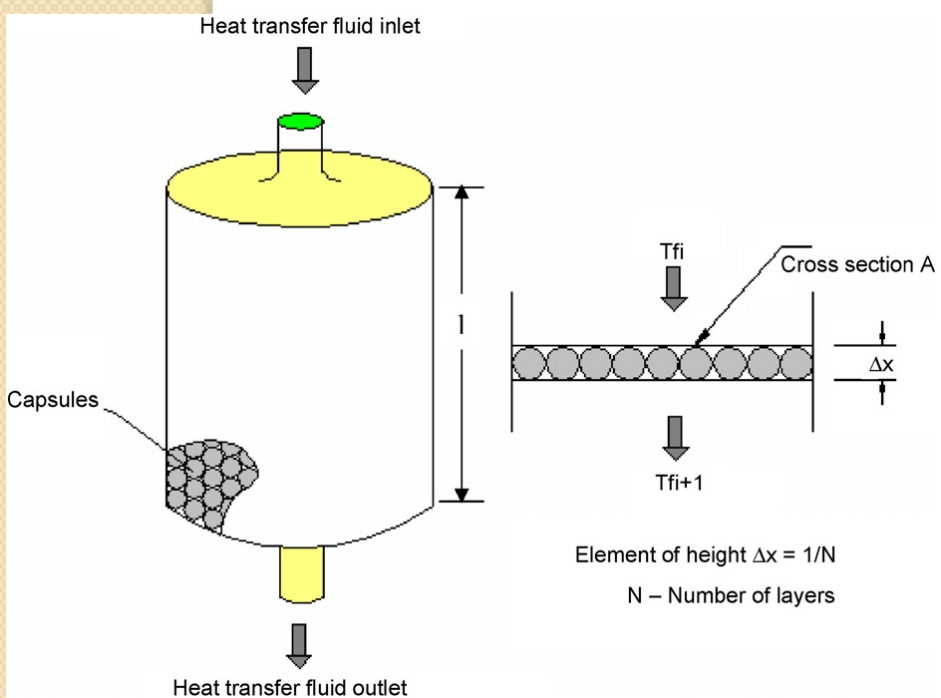
مزایای کپسوله کردن مواد تغییر فاز دهنده

- مزایای کپسوله کردن مواد تغییر فاز دهنده عبارتند از:
  - عدم اختلاط یا واکنش با فضای اطراف توسط این مواد
  - جلوگیری از اثرات زیست محیطی این مواد
  - استفاده از این مواد را که ممکن است سمی هم باشند در صنایع غذایی و ساختمانی فراهم میکند.
  - کپسول امکان جابجایی مواد مایع یا گاز را به صورت جامد فراهم میکند.
- امروزه با توجه به افزایش نسبت سطح به حجم، افزایش سرعت انتقال حرارت و همچنین مزیت های دیگر، کپسوله کردن مواد تغییر فازی در مقیاس نانومتر در مقایسه با ماکرو و میکرومتر از اهمیت به سزایی برخوردار است.

طراحی بستر های مواد تغییر فاز دهنده برای ذخیره انرژی حرارتی

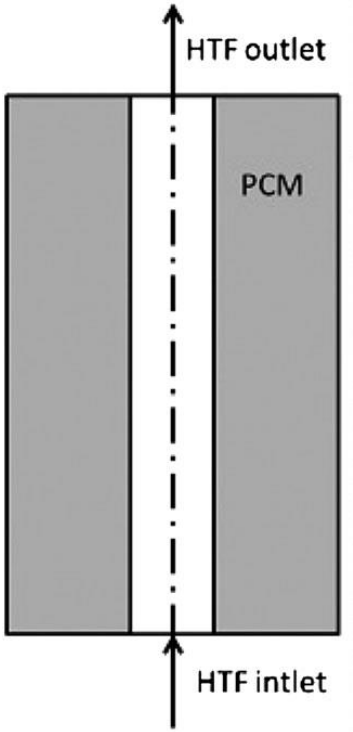
- یافتن یک وسیله مؤثر و اقتصادی برای دستیابی به انتقال حرارت لازم حین فرآیندهای ذوب و انجماد در یک سیستم ذخیره انرژی گرمای نهان ضروری است. به این منظور می توان از یک بستر شامل مواد تغییر فاز دهنده شده میکروکپسوله شده، یک مخزن و یک سیال که از خلل و فرج بستر جریان دارد استفاده نمود.

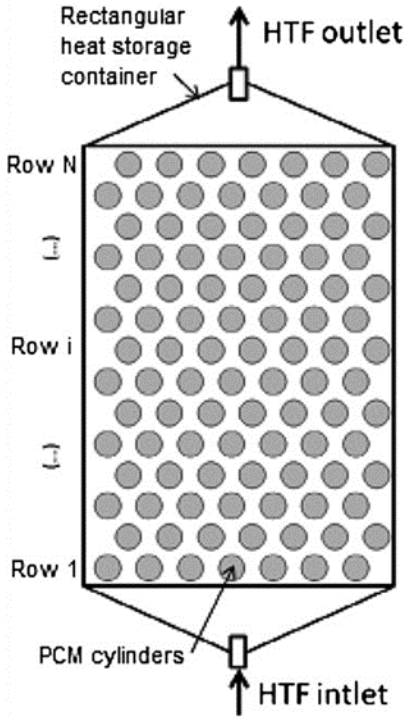
- در این بسترها گرما به یا از سیال حین جریان از روی بستر منتقل می شود. در وضعیت شارژ، سیال داخل از روی بستر عبور کرده و مواد تغییر فاز دهنده گرما را از سیال داغ دریافت کرده و حین ذوب شدن این گرما را به شکل نهان ذخیره می کنند. در وضعیت دشارژ، سیال سرد از بستر عبور کرده و ضمن دریافت حرارت از مواد تغییر فاز دهنده باعث انجماد این مواد می شوند. سیال گرم شده در این مرحله می تواند به صورت مستقیم برای تامین بار حرارتی استفاده شود یا گرمای خود را به صورت غیر مستقیم در یک مبدل



طراحی بستر های مواد تغییر فاز دهنده برای ذخیره انرژی حرارتی

- در شکل زیر دو نوع مختلف از مخزن ذخیره ساز حرارت نشان داده شده است:





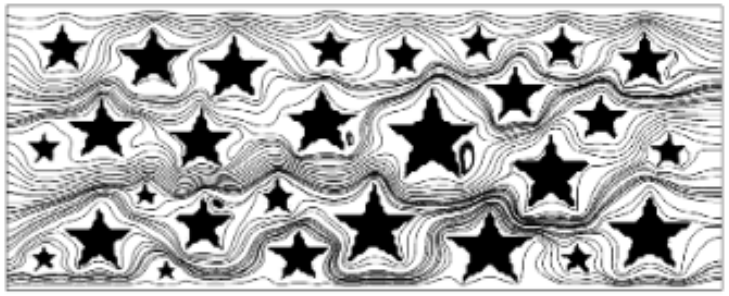
طراحی بستر های مواد تغییر فاز دهنده برای ذخیره انرژی حرارتی

- در هر دو وضعیت شارژ و دشارژ، اختلاف بین میانگین دمای سیال انتقال حرارت و دمای ماده تغییر فاز برای دستیابی به میزان قابل قبول نرخ انتقال حرارت باید کافی باشد.
- پارامترهای مهمی که برای طراحی این بستر باید در نظر گرفته شوند عبارت است از:

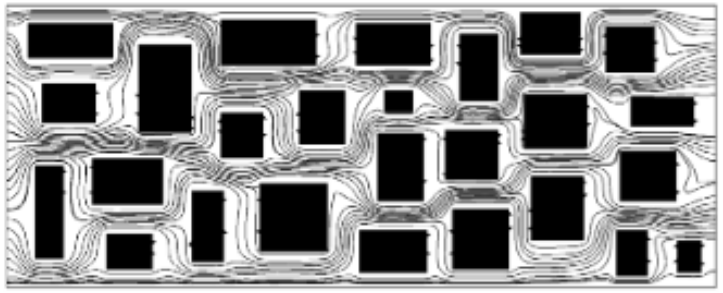
  - رنج دمای کاری سیستم ذخیره
  - دمای انجماد و ذوب ماده تغییر فاز دهنده
  - گرمای نهان ماده تغییر فاز دهنده
  - شکل بستر
  - بار حرارتی
  - افت فشار واحد ذخیره سازی و توان پمپاژ

طراحی بستر های مواد تغییر فاز دهنده برای ذخیره انرژی حرارتی

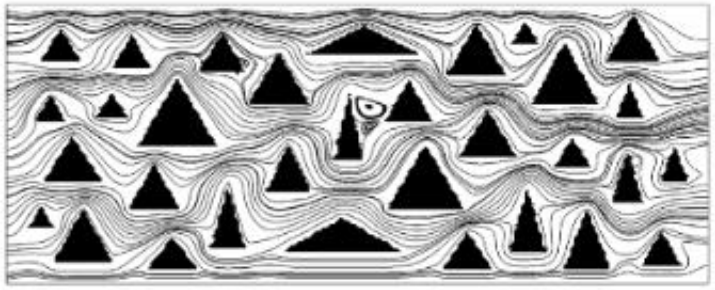
- شکل زیر تاثیر شکل بستر را بر خطوط جریان نشان می دهد:



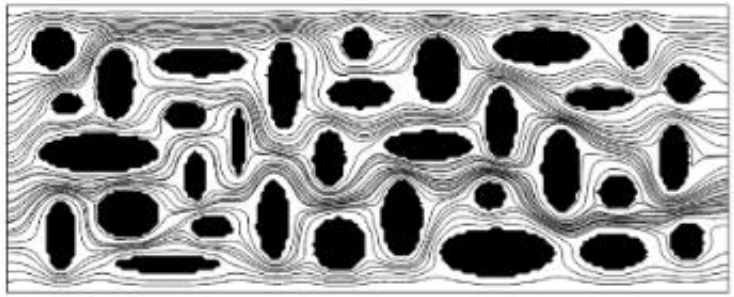
Star shape



Rectangular shape



Triangular shape



Elliptical shape

طراحی بستر های مواد تغییر فاز دهنده برای ذخیره انرژی حرارتی

- انتقال حرارت موثر بین ماده تغییر فاز دهنده و سیال انتقال حرارت موجب عملکرد بهتر سیستم ذخیره حرارتی می شود. عوامل موثر بر عملکرد یک بستر مواد تغییر فاز دهنده برای ذخیره انرژی حرارتی عبارتند از:

  - شکل، اندازه و جنس میکروکپسول ها
  - طول و نفوذ پذیری بستر و شکل مخزن
  - جنس سیال انتقال حرارتی و دبی آن
  - دمای اولیه سیال و ضریب انتقال حرارت

طراحی بستر های مواد تغییر فاز دهنده برای ذخیره انرژی حرارتی

- به طور کلی بررسی جریان و انتقال حرارت درون بسترهای مواد تغییر فاز دهنده پیچیده است از آنجایی که با مدهای انتقال حرارتی مختلف سر وکار داریم از جمله:

  - انتقال حرارت جابجایی بین دیوارهای مخزن و سیال انتقال حرارتی
  - انتقال حرارت جابجایی بین دیوارهای میکروکپسول ها و سیال انتقال حرارتی
  - انتقال حرارت هدایت بین دیوارهای میکروکپسول ها و مخزن
  - انتقال حرارت هدایت بین دیوارهای میکروکپسول ها با یکدیگر

طراحی بستر های مواد تغییر فاز دهنده برای ذخیره انرژی حرارتی

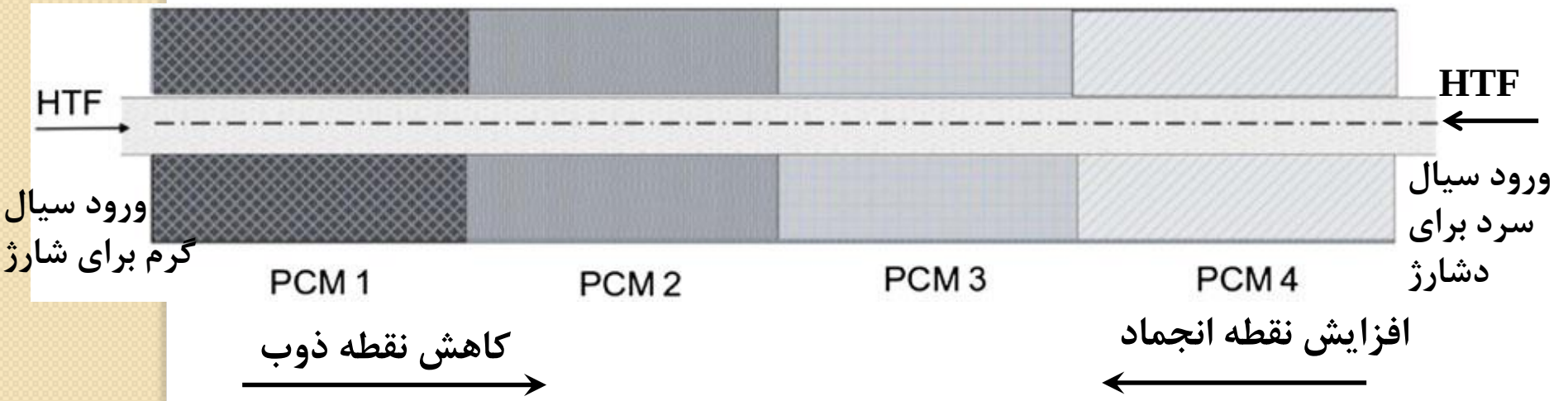
- مقاله مروری در این زمینه وجود دارد که کارهای انجام شده را خلاصه کرده است.

A. Felix Regin, S.C. Solanki, J.S. Saini, "Heat transfer characteristics of thermal energy storage system using PCM capsules: A review." Renewable and Sustainable Energy Reviews, 12 (2008) 2438–2458.

Sl. no.	References	Geometry	Storage medium	HTF	Mode of operation	Range of parameters	Remarks
1.	Benmansour et al. [23]	Spherical capsules inside a cylindrical tank	Paraffin wax	Air	Both charging and discharging	$560 < Re < 1120$; $T_{h,in}$: 70 °C; $T_{c,in}$: ambient; d_c: 31.8 mm; ε: 0.4056	Experimental investigation/ mathematical modelling
2.	Kousksou et al. [24]	Spherical capsules inside a cylindrical tank	Water/ice	Chilled glycol	Charging	$1 < \dot{m}_f < 2.5\ m^3/h$; $T_{initial}$: 6 °C; $-8 < T_{c,in} < -3.5$; d_c: 77 mm; ε: 0.5	Experimental investigation/ mathematical modeling
3.	Arkar and Medved [25]	Spherical capsules inside a cylindrical tank	Paraffin (RT20)	Air	Both charging and discharging	$50 < \dot{m}_f < 220\ m^3/h$; $T_{h,in}$: 35 °C; $T_{c,in}$: 10 °C; d_c: 50 mm; ε: 0.388	Mathematical modelling
4.	Wei et al. [26]	Capsules inside a rectangular tank	Paraffin wax (FNP-0090)	Water	Discharging	$5 < \dot{m}_f < 20$ lpm; $40 < T_{initial} < 105$ °C; $15 < T_{c,in} < 35$ °C; $2 < d_c < 5$ mm; $0.25 < \varepsilon < 0.5$	Experimental investigation/ mathematical modeling
5.	Seeniraj and Lakshmi Narasimhan [27]	Spherical capsules inside a cylindrical tank	–	–	Charging	$1.8 < St < 4$; $0.19 < Ste < 0.32$; $7833 < Pe < 13949$; $0.365 < \varepsilon < 0.65$	Mathematical modelling

سیستم ذخیره انرژی حرارتی چند لایه

- در شکل زیر کاربرد مواد تغییر فاز دهنده مختلف در یک سیستم ذخیره انرژی چند لایه را نشان می دهد.

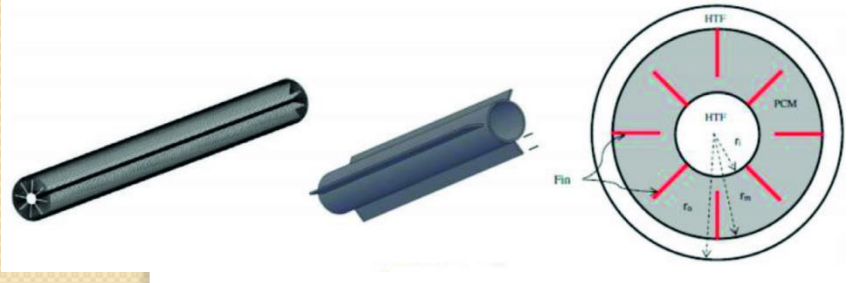


تکنیک های بهبود دهنده انتقال حرارت در مواد تغییر فاز دهنده

- مقادیر پایین ضریب هدایت حرارتی در مواد تغییر فاز دهنده منجر به انجام تعداد زیادی مطالعه در زمینه افزایش انتقال حرارت در طول فرآیند انجماد و ذوب این مواد شده است.
- هدایت حرارتی پایین مواد تغییر فاز دهنده باعث نرخ انتقال حرارت کمتر از مایع انتقال حرارت به این مواد می شود. در نتیجه این امر باعث می شود که ذخیره انرژی و ظرفیت آزادسازی انرژی توسط سیستم ذخیره انرژی حرارتی نهان کاهش یافته و زمان لازم برای فرآیندهای ذوب و انجماد کامل نیز افزایش یابد.
- محققان روش های مختلفی را برای حل این موضوع پیشنهاد دادند.

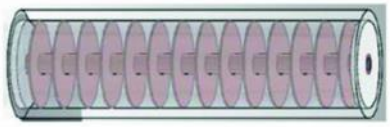
افزایش انتقال حرارت به کمک سطوح گسترش یافته

- برای افزایش انتقال حرارت در سیستم های حرارتی می توان از پره ها یا سطوح گسترش یافته استفاده کرد. پره ها با شکل های مختلف نظیر طولی، حلقوی، صفحه ای، سوزنی و.... بدین منظور استفاده شده اند.

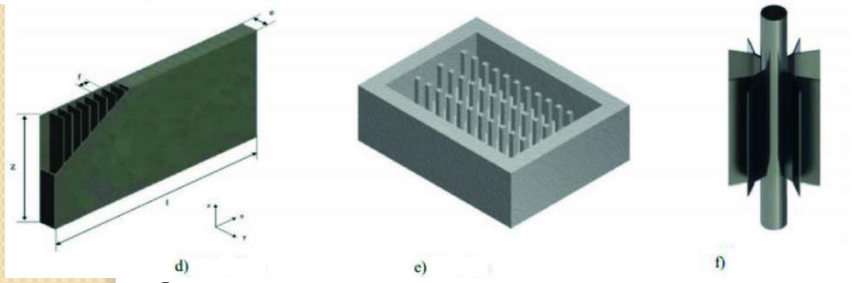


Longitudinal fins

- پره ها نرخ انتقال حرارت هدایتی را با اضافه کردن سطح انتقال حرارت افزایش می دهند. همچنین انتخاب پره با هدایت حرارتی بالا می تواند موثر تر باشد. همچنین پره ها عمق انتقال حرارت سیستم ذخیره حرارتی نهان را بهبود داده و از این طریق فرآیند ذوب و انجماد را تسریع می کند.



Circular fins

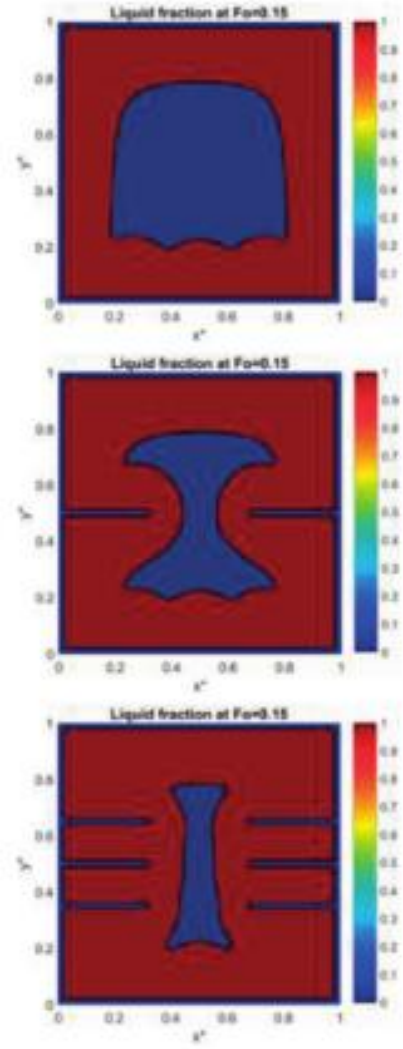


Plates fins **Pins fins** **Tree shape fins**

افزایش انتقال حرارت به کمک سطوح گسترش یافته

- شکل زیر نشان می دهدکه نرخ ذوب ماده تغییر فاز دهنده با افزودن پره و افزایش تعداد پره ها افزایش می یابد. ظرفیت ذخیره انرژی سیستم ذخیره حرارتی نهان با افزایش تعداد پره های داخلی کاهش می یابد.

  بنابراین باید یک شکل پره و تعداد مناسب از آنرا انتخاب نمود.



- نتایج نشان داد که پره طولی بهترین بهبود را در میان انواع پره در سیستم های ذخیره ایجاد می کند. سادگی، ساخت آسان و هزینه کم ساخت از جمله مزایای دیگر این نوع

افزایش انتقال حرارت به کمک مواد متخلخل

- از مواد متخلخل نظیر فوم های فلزی (فوم آلومینیوم، فوم مس و فوم نیکل) و فوم های غیر فلزی (فوم گرافیت و فوم گرافیت گسترش یافته) می توان برای بهبود راندمان حرارتی مواد تغییر فاز دهنده استفاده نمود.
- مواد متخلخل معمولا با افزایش هدایت حرارتی ماده تغییر فاز دهنده و فراهم نمودن نسبت سطح به حجم بالا موجب بهبود راندمان حرارتی این مواد می شوند.

نمونه ای از فوم های فلزی

مزایا و معایب استفاده از مواد متخلخل

- مزایا و معایب ترکیب مواد متخلخل با مواد تغییر فاز دهنده در جدول زیر ارائه شده اند:

مزایا	معایب
بهبود ضریب هدایت حرارتی	مواد تغییر فاز دهنده ممکن است باعث خوردگی فوم های فلزی می شوند.
یکنواخت نمودن توزیع دما	انتقال حرارت جابجایی به دلیل محدودیت در حرکت مایع PCM کاهش می یابد.
افزایش سطح انتقال حرارت	استفاده از مواد متخلخل به ویژه در نفوذ پذیری های پایین می تواند منجر به کاهش گرمای نهان مواد تغییر فاز دهنده شود. استفاده از مواد متخلخل می تواند منجر به کاهش ظرفیت حرارتی مواد تغییر فاز دهنده شود.

نکاتی در مورد استفاده از مواد متخلخل در مواد تغییر فاز دهنده

- فوم آلومینیوم باید با مواد تغییر فاز دهنده با دمای ذوب کم یا متوسط ترکیب شود زیرا آلومینیوم در مقایسه با سایر فوم های فلزی دارای مقدار نقطه ذوب پایین ۶۶۰ درجه سانتیگراد می باشد. بنابراین استفاده از آلومینیوم در مواد تغییر فاز دهنده به فرم نمک مانند KNO_3, $NaCl$, KCl, $NaNO_3$, $MgCl_2$ توصیه نمی شود.
- فوم نیکل با نقطه ذوب بالا در حدود ۱۴۵۵ درجه سانتیگراد می تواند با مواد تغییر فاز دهنده با نقطه ذوب بالاتر ترکیب شود.
- فوم های متخلخل با نفوذپذیری کم برای انتقال حرارت هدایتی مناسب هستند در حالیکه فوم های متخلخل با نفوذپذیری بالا برای انتقال حرارت جابجایی مناسب هستند.

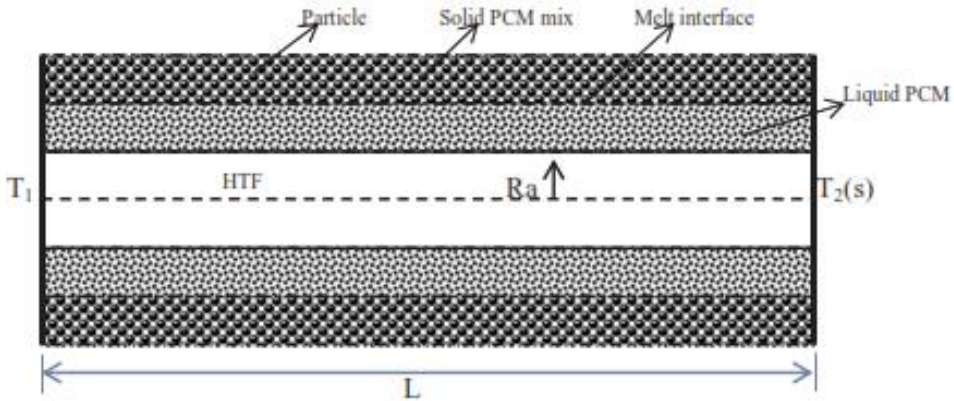
نکاتی در مورد استفاده از مواد متخلخل در مواد تغییر فاز دهنده

- فوم های گرافیتی به دلیل نقطه ذوب خیلی بالا، ۴۱۲۵ درجه سانتیگراد، و هدایت حرارتی قابل قبول پتانسیل آنرا دارند که در مواد تغییر فاز دهنده با نقاط ذوب بالا استفاده شوند. این مواد غالباً در نیروگاه های متمرکز خورشیدی به کار می روند.
- فوم گرافیت گسترش یافته یک نوع بهبود یافته گرافیت است. ماده ای است که دارای هدایت حرارتی بسیار بزرگ و چگالی بسیار کم می باشد.
- در جدول زیر خواص ترموفیزیکی مواد متخلخل استفاده شده در مواد تغییرفاز دهنده نمایش داده شده است:

Material	ρ (Kg/m^3)	K (W/m-K)	T_m (°C)	Cost ($/ton)
Copper	8933	350–401	1086	6685
Aluminum	2700	205–230	660	1996
Nickel	8907	89	1455	11,089
Graphite	2266	170	4125	1750

استفاده از نانوذرات و نانوسیالات در مواد تغییر فاز دهنده

- از نانوذرات با هدایت حرارتی بالا مانند AL_2O_3، Cu، AL و CuO می توان برای بهبود انتقال حرارت بویژه هدایت حرارتی در مواد تغییر فاز دهنده استفاده نمود. استفاده از نانوذرات تاثیر کمی روی دمای ذوب/انجماد مواد تغییر فاز دهنده دارند.
- با افزایش دما و ذوب ماده تغییر فاز دهنده، افزایش هدایت حرارتی این مواد با استفاده از نانوذرات به دلیل آن به دلیل تشدید حرکت براونی بیشتر می شود.
- همچنین از ناوسیالات میتوان برای بهبود نرخ انتقال حرارت در واحدهای ذخیره حرارتی به کمک مواد تغییر فاز دهنده استفاده نمود.



واحد ذخیره سازی حرارت حاوی نانوذرات پراکنده

استفاده از نانوذرات و نانوسیالات در مواد تغییر فاز دهنده

- در جدول زیر هدایت حرارتی موادی که در اندازه نانو می توان از آنها در مواد تغییرفاز دهنده استفاده نمود نمایش داده شده است:

Material		Thermal conductivity/ W/m K	Material		Thermal conductivity/ W/m K
Silicon dioxide	SiO_2	1.38	Al_2O_3	40	Aluminium oxide
Iron oxide	Fe_3O_4	7.2	Cu	325	Copper
Titanium dioxide	TiO_2	8.3	Au	417	Gold
Copper oxide	CuO	13.51	Ag	444	Silver
Zinc oxide	ZnO	15	SiC	497	Silicon carbide