

Pengaruh Penambahan Nukleator $\text{SrCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ dan Pengental HEC terhadap Efek *Supercooling* dan Pemisahan Fase PCM $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$

Sri R. A. Usna^{1*}, Inge M. Sutjahja^{2*}, Daniel Kurnia²

¹ Program Studi Fisika, Universitas Andalas, Jl. Universitas Andalas, Padang
25163, Indonesia

² Program Studi Fisika, Institut Teknologi Bandung, Jl. Ganesha No. 10, Bandung 40132,
Indonesia

* Corresponding author. E-mail: srihayualfitri@sci.unand.ac.id (Sri Rahayu Alfitri Usna),
inge@fi.itb.ac.id (Inge Magdalena Sutjahja)

ABSTRAK

Kalsium klorida heksahidrat ($\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) merupakan salah satu material berubah fase (Phase Change Material, PCM). Material ini termasuk dalam kelompok PCM inorganic garam hidrat dengan temperatur lebur 29°C dan entalpi yang cukup tinggi yaitu 190 kJ/kg , sehingga berpotensi sebagai medium penyimpan energi termal laten (latent thermal energy storage, latent TES). Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh penambahan 1% berat agen nukleator stronsium klorida heksahidrat ($\text{SrCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) dan 1-2% berat agen pengental hidroksietil selulosa (HEC) pada $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ untuk meminimalkan efek *supercooling* dan pemisahan fase, serta percepatan proses nukleasi. Dari hasil eksperimen yang dilakukan, penambahan 1% berat $\text{SrCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ dapat mengurangi efek *supercooling* secara signifikan, efek pemisahan fase sekitar 70% hingga iterasi ke-38, serta percepatan proses nukleasi $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ dibandingkan tanpa penambahan $\text{SrCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$. Sedangkan untuk komposisi $\text{SrCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ (1% berat) + HEC (1-2% berat) juga mampu mengurangi efek *supercooling* secara signifikan, begitu pula dengan efek pemisahan fasenya yakni sekitar 60% hingga iterasi ke-38.

Kata Kunci : PCM $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, nukleator, agen pengental, pemisahan fase, *supercooling*, TES

ABSTRACT

Calcium chloride hexahydrate ($\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) is one of the phase change materials (PCM). This material belongs to the PCM inorganic salt hydrate group with a melting temperature of $29\text{ }^\circ\text{C}$ and a relatively large enthalpy of 190 kJ/kg . It has the potential as a medium of latent thermal energy storage (latent TES). This study aims to determine the effect of adding 1 wt% of the nucleating agent strontium chloride hexahydrate ($\text{SrCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) and 1-2 wt% of the thickening agent hydroxyethyl cellulose (HEC) on $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ to minimize the *supercooling* and phase separation effects and acceleration of the nucleation process. The experimental results show that adding 1 wt% of $\text{SrCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ can significantly reduce the *supercooling*, the phase separation effect about 70% until the 38th iteration, and acceleration of the nucleation process of $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ compared without the addition of $\text{SrCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$. Meanwhile, the composition of $\text{SrCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ (1 wt%) + HEC (1-2 wt%) reduce the *supercooling* effect and the phase separation effect significantly, namely 60% until the 38th iteration.

Keywords : PCM $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, nucleator, thickning agent, phase separation, *supercooling*, TES

1. Pendahuluan

Penggunaan energi listrik untuk sistem pengondisian udara ruang tumbuh secara signifikan, hingga tiga kali lebih besar dari tahun 1990 hingga 2016. Sistem pengondisian udara ruang terutama sistem pendingin ruangan biasanya melalui kipas angin dan *air conditioner* (AC) yang berkontribusi cukup besar terhadap tuntutan energi global. Sistem pendingin ruangan menyumbang hampir 20% dari total energi listrik yang digunakan pada

gedung-gedung di seluruh dunia saat ini [1].

Pada tahun 2020, sistem pendingin ruangan menyumbang hampir 16% dari konsumsi listrik global pada sektor bangunan. Permintaan AC relatif naik lebih cepat di negara-negara tropis seperti India dan Indonesia, dengan rata-rata pemasangan tahunan meningkat sekitar 10% sejak tahun 2010 [2].

Di Indonesia, konsumsi energi listrik oleh AC menempati urutan tertinggi ke

enam dari konsumsi listrik nasional [3]. Di sisi lain, sampai saat ini sumber energi listrik nasional masih didominasi oleh pembangkit listrik berbahan bakar fosil seperti batubara, gas, dan bahan bakar minyak (BBM) yaitu sekitar 66% hingga 80% [3]. Untuk menekan tingginya permintaan tenaga listrik pada penggunaan AC, dibutuhkan sumber energi alternatif.

Salah satu sumber energi alternatif yang cukup menjanjikan adalah energi termal yang dipancarkan matahari dan energi termal yang berasal dari limbah kalor. Namun keberadaan matahari secara umum terbatas, dan limbah kalor belum banyak dimanfaatkan. Untuk menjawab permasalahan ini maka diperlukan suatu material yang dapat menyimpan energi termal (*thermal energy storage*, TES). Energi termal yang tersimpan pada waktu tertentu dapat digunakan kembali pada waktu yang lain.

Secara umum energi termal dapat disimpan dalam bentuk sistem penyimpan kalor sensibel (*sensible heat storage*), penyimpanan kalor laten (*latent heat storage*), dan penyimpanan kalor kimia (*chemical heat storage*) [4]. Teknologi TES dapat membantu untuk memaksimalkan potensi energi terbarukan pada pembangkit listrik, industri, dan pembangunan [5]. Material yang dapat digunakan sebagai

medium penyimpan kalor, baik kalor sensibel maupun kalor laten disebut sebagai material berubah fase (*Phase Change Material*, PCM) [6,7]. Dalam aplikasinya, sistem penyimpanan kalor laten memiliki kemampuan menyimpan energi panas per unit volume lebih tinggi, yaitu mencapai 5-14 kali lebih besar dibandingkan penyimpanan kalor sensibel [8].

Secara umum, PCM dapat diklasifikasikan dalam tiga jenis, yaitu PCM organik (contoh: parafin dan *fatty acid*), PCM anorganik (contoh: garam, garam hidrat, dan logam), serta PCM eutektik yang merupakan campuran organik-organik, organik-anorganik, dan anorganik-anorganik [7]. $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ termasuk dalam kategori PCM anorganik garam hidrat, dengan temperatur lebur 29°C dan entalpi yaitu 190 kJ/kg [9,10]. Temperatur lebur PCM ini berada pada rentang temperatur zona nyaman manusia di daerah tropis, sehingga dalam aplikasinya dapat dimanfaatkan sebagai pengendali temperatur ruang, alternatif penggunaan AC [11–14].

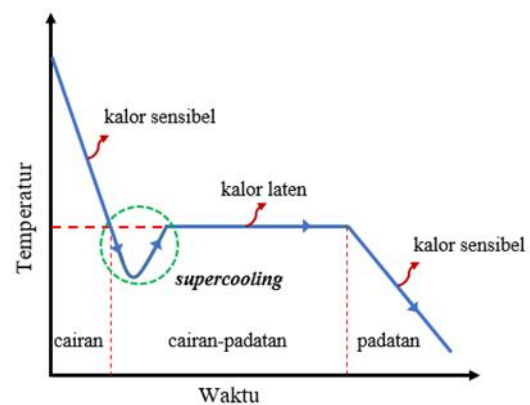
Penggunaan PCM $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ sebagai medium dari sistem penyimpan energi termal laten lebih efektif dibandingkan penyimpan energi termal sensibel dalam mengendalikan temperature udara ruang. Hal ini disebabkan karena PCM

$\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ dapat menyimpan atau melepaskan kalor relatif besar di sekitar temperatur transisi fasenya. Dengan kata lain, pada siang hari $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ menyerap kalor dalam jumlah relatif besar tanpa mengalami kenaikan temperatur yang berarti, sedangkan pada malam hari $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ mengembalikan kalor yang diserapnya ke lingkungan sehingga dapat menjaga temperatur ruang cukup stabil. Selain penghematan konsumsi energi listrik, penggunaan PCM $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ juga dapat mempengaruhi pergeseran beban puncak konsumsi energi listrik AC pada siang hari.

PCM $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ memiliki kelebihan seperti panas laten dan konduktivitas panas yang tinggi, perubahan volume yang kecil ketika berubah fase, relatif mudah diperoleh di pasaran, tidak terlalu beracun, serta harganya yang terjangkau [8,13,15,16]. Namun, PCM $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ juga memiliki beberapa kekurangan, yaitu munculnya efek *supercooling* dan efek pemisahan fase pada proses kristalisasi yang dapat menurunkan performa PCM sebagai TES [7,8,11].

Supercooling atau *subcooling* merupakan efek yang muncul saat material akan mulai mengalami nukleasi, dimana temperatur turun secara signifikan di bawah temperatur peleburan [7]. Efek

supercooling hanya terjadi pada perubahan fase cair ke fase padat (kristalisasi). Jika temperatur *supercooling* tidak tercapai, maka material tidak akan berubah fase dari cair ke padat dan kalor yang dilepaskan hanya berupa kalor sensibel. Gambar 1 memperlihatkan proses pendinginan dengan munculnya efek *supercooling*.



Gambar 1. Proses pendinginan yang menunjukkan efek *supercooling*

Kajian pengaruh penambahan aditif atau agen nukleator untuk menekan efek *supercooling* telah lama dilakukan untuk beberapa jenis PCM. Tahun 1992 George A. Lane melaporkan beberapa jenis nukleator dalam jumlah tertentu yang dapat meminimalkan efek *supercooling* pada PCM $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$. Seperti penambahan 1% berat $\text{SrCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ dilaporkan dapat menghilangkan efek *supercooling* yang muncul pada proses kristalisasi $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ [17]. Pada tahun 2016, Sutjahja, dkk. juga melaporkan bahwa penambahan 1% berat $\text{SrCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ dapat

menekan efek *supercooling* (rata-rata derajat *supercooling* 0,3 °C), serta menunjukkan waktu induksi yang lebih singkat, sehingga aplikasi $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ sebagai TES menjadi lebih optimal [18]. Selanjutnya pada tahun 2018, Zou, dkk. juga melaporkan penambahan 2% berat $\text{SrCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ dapat menekan efek *supercooling* PCM komposit $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ hingga 0,95 °C, dan menunjukkan keandalan termal yang sangat baik setelah 50 siklus pemanasan dan pendinginan [19]. Sementara pada PCM eutektik $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ -20% $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ dengan penambahan 1% $\text{SrCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ dan 0,5% CMC, menunjukkan bahwa derajat *supercooling* berkurang hingga 0,57 °C [16].

Di sisi lain, sebagian garam hidrat tidak dapat melebur secara kongruen karena terdiri dari campuran dua komponen atau lebih (komposisi heterogen) dengan densitas yang berbeda [7]. Akibatnya, sejumlah fase air yang dilepaskan oleh garam hidrat tidak cukup untuk melarutkan kristal garam yang terbentuk selama proses dehidrasi. Dengan siklus pemanasan-pendinginan yang terus menerus, pemisahan fase akan terus meningkat, yang mengakibatkan penurunan kapasitas penyimpanan termal secara bertahap. Oleh karena itu pemisahan fase termasuk

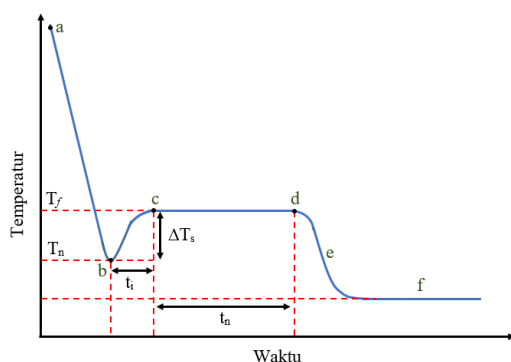
permasalahan besar juga dari PCM garam hidrat [20].

Ada tiga metoda untuk menekan efek pemisahan fase pada PCM $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ [7]. Pertama, mengubah komposisi hidrat dari $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, namun penyimpanan kalor secara keseluruhan akan berkurang dan rentang peleburan menjadi lebih lebar. Kedua, membatasi jarak antar fase dengan menambahkan polimer dari turunan selulosa, namun metoda ini hanya efisien digunakan untuk PCM skala kecil. Ketiga, menambahkan agen pengental untuk meningkatkan viskositas $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$. Metode terakhir dinilai lebih baik dari kedua metoda lainnya, namun juga lebih rumit karena dapat mengubah diagram fase dari PCM untuk mencapai peleburan kongruen

Penambahan 3 hingga 5% berat pengental *super-absorbant polymers* (SAP) efektif untuk mencegah pemisahan fase yang tidak diinginkan dari garam anorganik hidrat tinggi. Sementara untuk jenis garam anorganik hidrat rendah didapatkan bahwa penambahan 2 hingga 4% berat pengental *carboxymethyl cellulose* (CMC) lebih efektif menekan efek pemisahan fase [21]. Efimova dkk. (2014) menggunakan 3% berat agen pengental SiO_2 , *xanthan*, dan metilselulosa pada PCM eutektik garam hidrat $\text{Zn}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O} + \text{Mn}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$

+ KNO_3 . Hasil yang diperoleh menunjukkan PCM dengan SiO_2 muncul efek pemisahan fase setelah beberapa siklus; PCM dengan metilselulosa memiliki viskositas tinggi setelah 480 siklus, namun menunjukkan pemisahan fase yang signifikan; PCM dengan *xanthan* tidak menunjukkan pemisahan fase yang signifikan setelah 480 siklus [22]. Li dkk. (2014) melaporkan penambahan pengental HEC sangat efektif menekan efek pemisahan fase serta dapat mereduksi *supercooling* hingga 2°C yang muncul pada PCM eutektik $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ – $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ [23].

Beberapa parameter termofisika seperti temperatur nukleasi (T_n), temperatur *freezing* (T_f), waktu induksi (t_i), dan waktu nukleasi (t_n) dapat ditentukan dari kurva perubahan temperatur bergantung waktu selama proses pendinginan atau solidifikasi hingga padatan kristal terbentuk, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 2. Tipikal kurva perubahan temperatur terhadap waktu pada proses

kristalisasi yang menunjukkan beberapa parameter karakteristik [24,25,18]

PCM $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ dalam fase cair yang didinginkan mengalami *supercooling* dimana temperatur PCM turun secara signifikan dari titik a (temperatur lebur) menuju titik b (T_n). Proses pertumbuhan kristal primer dimulai dari titik b menuju titik c, dimana nukleasi (inti kristal) mulai tumbuh pada antar muka fase padat dan cair dalam selang waktu t_i . Proses ini membutuhkan energi Gibbs yang cukup besar dan pelepasan termal yang tinggi sehingga temperatur kembali naik menuju titik c [18]. Perbedaan temperatur nukleasi (T_n) dan temperatur *freezing* (T_f) merupakan derajat *supercooling* dari PCM (ΔT_s). *Supercooling* menghalangi PCM mengkristal pada temperatur kristalisasinya [24]. Pertumbuhan kristal sekunder (yang sebenarnya) terukur dari titik c ke titik d pada temperatur *freezing* (T_f). Oleh karena itu waktu antara titik c dengan titik d disebut sebagai waktu nukleasi (t_n) atau waktu laten. Kemudian pertumbuhan kristal dilanjutkan dengan proses modifikasi ukuran dan bentuk kristal agar menjadi kristal sempurna yang ditunjukkan oleh titik e. Keadaan setimbang dicapai ketika proses kristalisasi mencapai titik f [18].

Pada penelitian ini digunakan bahan aditif kimiawi agen nukleator $\text{SrCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ yang memiliki struktur kristal yang serupa (*isomorphous*) dengan PCM $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$. Bahan aditif ini bekerja dengan cara berperan sebagai pusat-pusat nukleasi yang menarik fase cair dari $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ menjadi padatan. Selain penggunaan bahan tunggal aditif kimiawi $\text{SrCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ pada PCM $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, penelitian ini juga menggunakan bahan campuran antara $\text{SrCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ dan agen pengental HEC yang merupakan *cross linked polymer* yang dapat mengikat air. Paramater termal akan dikaji dari kurva perubahan temperatur terhadap waktu pada proses kristalisasi $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$.

2. Metode Penelitian

Pada set eskperimen pertama untuk menguji efek nukleator $\text{SrCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ pada $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ disiapkan dua buah tabung reaksi, masing-masing diisi dengan 18 g PCM $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ murni dan $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ yang ditambahkan dengan 1% berat $\text{SrCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$. Pengukuran dilakukan pada proses perubahan fase cair ke padat (solidifikasi). PCM terlebih dahulu dipanaskan hingga di atas titik lebur (~ 35 - 50 °C) dengan cara merendamnya di dalam air panas. Setelah temperatur stabil, sampel kemudian didinginkan dengan

memasukkan kedua sampel di dalam tabung reaksi ke dalam waterbath bersuhu ~ 24 - 25 °C di kondisi udara normal dalam ruang. Pengukuran dilakukan dengan cara merekam nilai temperatur terhadap waktu dalam selang 3-4 jam, dimana dalam selang waktu pengukuran tersebut temperatur udara relatif konstan. Eksperimen diulangi hingga siklus ke 50 (iterasi 50).

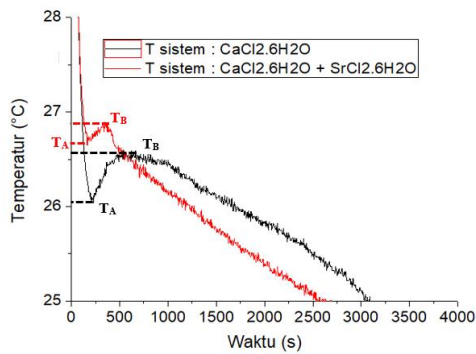
Pada set eksperimen kedua untuk menguji efek agen pengental HEC pada $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, disiapkan 3 tabung reaksi, masing-masing berisi sampel $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ murni, $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O} + 1\%$ berat $\text{SrCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O} + 1\%$ berat HEC, dan $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O} + 1\%$ berat $\text{SrCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O} + 2\%$ berat HEC.

Pada kedua set eksperimen, efek pemisahan fase dilakukan dengan mengukur ketinggian kristal (fase padat) $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ yang tumbuh pada setiap iterasi. Pengukuran berulang dilakukan hingga 50 iterasi.

3. Hasil dan Pembahasan

3.1 Pengaruh Penambahan Nukleator $\text{SrCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ pada PCM $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$

Seperti yang diilustrasikan pada Gambar 3, kurva temperatur terhadap waktu dari PCM $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ yang ditambahkan $\text{SrCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ (0,5-1% berat) menunjukkan pengurangan efek supercooling pada proses penurunan temperatur atau solidifikasi.

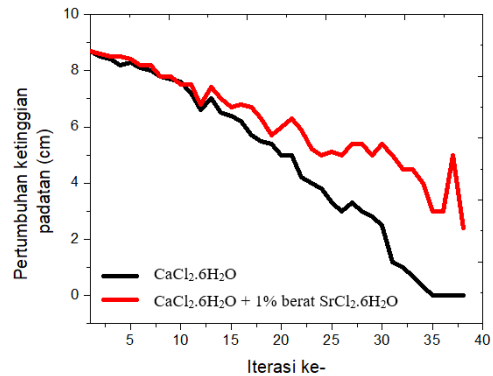


Gambar 3. Kurva perubahan temperatur terhadap waktu dari PCM $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ dengan dan tanpa penambahan nukleator $\text{SrCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ pada iterasi ke 3.

Hasil analisa 20 data dari total 50 kali iterasi yang dilakukan, pengurangan efek supercooling dari penambahan 1% berat agen nukleator $\text{SrCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ditunjukkan oleh nilai derajat supercooling sebesar 0,06-1,30 °C dengan rata-rata 0,43 °C (Tabel 1).

Tabel 1. Pengaruh penambahan 1% berat nukleator $\text{SrCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ terhadap derajat supercooling PCM $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$

No.	Komposisi PCM	ΔT_s (°C)		
		min	maks	rata-rata
1	$\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	0,15	1,76	0,66
2	+ 1% berat $\text{SrCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	0,06	1,30	0,43



Gambar 4. Pertumbuhan ketinggian padatan PCM $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ dengan dan tanpa nukleator $\text{SrCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ hingga iterasi ke 38.

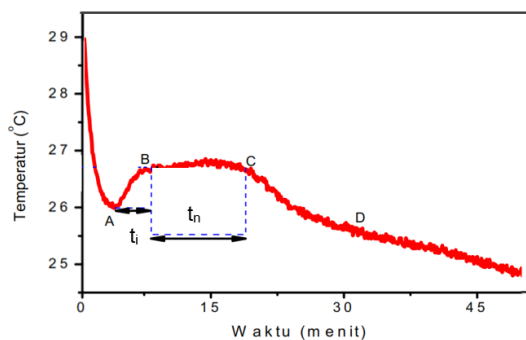
Selain menekan efek supercooling, penambahan 1% berat bahan aditif juga diketahui dapat mengurangi efek pemisahan fase seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.

Pengurangan efek pemisahan fase PCM murni $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ pada iterasi ke-20 adalah sekitar 43% dan pada $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O} + \text{SrCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ (1% berat) adalah 31%. Pada iterasi ke-38 PCM murni $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ menunjukkan tidak ada penumbuhan padatan sama sekali sedangkan pada $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O} + \text{SrCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ (1% berat) masih menunjukkan pertumbuhan padatan seperti ditunjukkan oleh data pada Tabel 2.

Tabel 2. Pengaruh penambahan 1% berat nukleator $\text{SrCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ terhadap efek pemisahan fase PCM $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$

No.	Komposisi PCM	Efek pemisahan fase (%)
1	CaCl ₂ .6H ₂ O	100
2	CaCl ₂ .6H ₂ O + 1% berat SrCl ₂ .6H ₂ O	72

Selanjutnya percepatan proses nukleasi sebagai efek lain dari penambahan bahan kimia aditif SrCl₂.6H₂O dapat dilihat dari parameter waktu induksi (t_i) dan waktu laten (t_n) seperti diilustrasikan pada Gambar 5 untuk salah satu grafik hasil pengukuran.



Gambar 5. Ilustrasi parameter waktu induksi (t_i) dan waktu nukleasi (t_n), dari PCM CaCl₂.6H₂O dengan penambahan SrCl₂.6H₂O pada iterasi ke 9.

Pada Gambar 5, t_i adalah waktu induksi dan t_n adalah waktu laten, masing-masing berkaitan dengan waktu bagi pertumbuhan inti-inti kristal yang stabil dan waktu terjadinya proses transisi fase hingga sebagian besar cairan telah menjadi

padatan. Parameter laju nukleasi yang berkaitan dengan waktu induksi dan waktu laten tersebut ditentukan oleh Persamaan (1) yang dikenal sebagai persamaan Arrhenius untuk proses nukleasi yang teraktivasi termal.

$$J = A \exp \left[- \frac{16\pi\gamma^3 v^2}{3k^2 T^3 (\ln S)^2} \right]$$

dimana, A adalah konstanta, v adalah volume molekular, k adalah konstanta Boltzmann, S adalah derajat supersaturasi, T adalah temperatur, dan γ adalah tegangan antar muka. Dari Persamaan (1) terlihat bahwa laju nukleasi ditentukan secara utama oleh variabel temperatur, derajat supersaturasi, dan tegangan antar muka. Semakin kecil nilai t_i dan t_n menunjukkan bahwa respons PCM dalam melepaskan kalor laten dari sistem ke lingkungan juga semakin cepat sehingga mengurangi keterlambatan waktu layanan (*time lag*) bagi PCM sebagai material pengondisi udara pasif.

Pengaruh tambahan aditif kimiawi SrCl₂.6H₂O secara umum meningkatkan derajat supersaturasi dan reduksi yang berpengaruh pada perbesaran ukuran inti kristal yang stabil bagi terjadinya proses nukleasi. Nilai-nilai minimum, maksimum, dan rata-rata dari waktu induksi (t_i) dan waktu laten (t_n) dari PCM CaCl₂.6H₂O

murni dan PCM $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ yang ditambahkan dengan 1% berat aditif kimiawi $\text{SrCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ditunjukkan pada Tabel 3 dan Tabel 4.

Tabel 3. Pengaruh penambahan 1% berat nukleator $\text{SrCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ terhadap waktu induksi PCM $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$

(1)

No.	Komposisi PCM	t_i (detik)		
		min	maks	rata-rata
1	$\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	105	546	295
2	$\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ + 1% berat $\text{SrCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	7	399	166

Tabel 4. Pengaruh penambahan 1% berat nukleator $\text{SrCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ terhadap waktu laten PCM $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$

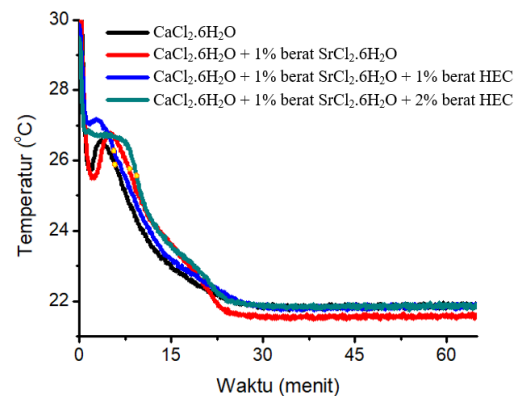
No.	Komposisi PCM	t_n (detik)		
		min	maks	rata-rata
1	$\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	107	1827	722
2	$\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ + 1% berat $\text{SrCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	25	665	21

Dari kedua tabel tersebut terlihat bahwa penambahan 1% berat bahan kimia $\text{SrCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ mampu meningkatkan waktu

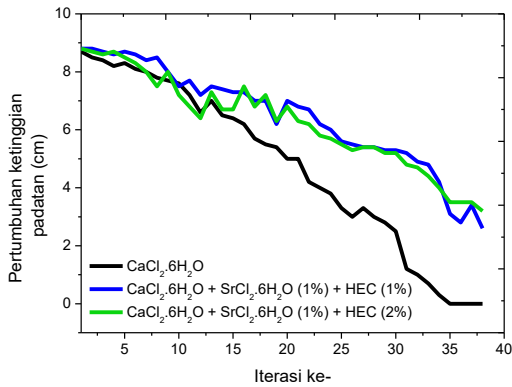
induksi sebesar 129 detik lebih cepat dan waktu laten sekitar 701 detik lebih cepat.

3.2 Pengaruh Penambahan Agen Pengental HEC pada PCM $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$

Selain menggunakan aditif kimiawi tunggal $\text{SrCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ pada PCM $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, penelitian ini juga menggunakan komposisi campuran aditif $\text{SrCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ dan HEC untuk menekan efek supercooling dan efek pemisahan fase secara signifikan. Komposisi campuran aditif $\text{SrCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ yang digunakan adalah 1% berat dan agen pengental HEC yang digunakan 1-2% dari berat PCM $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$.



Gambar 6. Kurva perubahan temperatur terhadap waktu dari PCM $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ dengan penambahan 1% berat nukleator $\text{SrCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ dan 1-2% berat HEC pada iterasi ke 3.



Gambar 7. Pertumbuhan ketinggian padatan PCM $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ dengan penambahan 1% berat nukleator $\text{SrCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ dan 1-2% berat HEC hingga iterasi ke 38.

Gambar 6 dan 7 menunjukkan grafik temperatur terhadap waktu pada proses pendinginan yang memberikan ilustrasi pengurangan efek supercooling dan efek pemisahan fase dari penambahan $\text{SrCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ (1% berat) dan HEC (1-2% berat) pada PCM $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$. Nilai derajat supercooling rata-rata dari 20 proses iterasi adalah 0,09-1,01 °C dengan rata-rata 0,48 °C. Secara lengkap reduksi efek supercooling PCM $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ dan $\text{SrCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ (1%) dengan dan tanpa penambahan HEC dapat dilihat pada Tabel 5.

Tabel 5. Pengaruh penambahan 1% berat nukleator $\text{SrCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ + 1-2% berat HEC terhadap derajat supercooling PCM $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$

No.	Komposisi PCM	ΔT_s (°C)		
		min	maks	rata-rata
1	$\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	0,15	1,76	0,66
2	$\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ + $\text{SrCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ (1% berat)	0,06	1,30	0,43
3	$\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ + $\text{SrCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ (1% berat) + HEC(1-2% berat)	0,09	1,01	0,48

Selanjutnya reduksi efek pemisahan fase PCM $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ yang ditambahkan $\text{SrCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ (1%) dan agen pengental HEC dapat dilihat pada Tabel 6. Pada Tabel 6 terlihat bahwa agen pengental HEC memiliki peran yang cukup signifikan saat dikombinasikan dengan bahan aditif kimia $\text{SrCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ dalam menekan efek pemisahan fase pada $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ yakni sekitar 63% sampai iterasi ke-38.

Tabel 6. Pengaruh penambahan 1% berat nukleator $\text{SrCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ + 1-2% berat HEC terhadap efek pemisahan fase PCM $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$.

No.	Komposisi bahan aditif	Pengurangan efek
-----	------------------------	------------------

	pemisahan fase
1 CaCl ₂ .6H ₂ O	100%
CaCl ₂ .6H ₂ O +	
2 SrCl ₂ .6H ₂ O (1% berat)	72%
CaCl ₂ .6H ₂ O +	
3 SrCl ₂ .6H ₂ O(1% berat) + HEC(1-2% berat)	63%

4. Simpulan

Sebanyak 1% berat bahan aditif kimiawi SrCl₂.6H₂O memiliki pengaruh yang signifikan terhadap penekanan efek supercooling dan efek pemisahan fase, serta mampu mempercepat proses nukleasi pada PCM CaCl₂.6H₂O untuk aplikasi pengontrol temperatur ruang udara. Kinerja PCM CaCl₂.6H₂O dengan penambahan 1% berat SrCl₂.6H₂O menunjukkan nilai derajat supercooling rata-rata 0,430 °C dari 20 kali iterasi dan reduksi efek pemisahan fase sekitar 70% pada iterasi ke-38, serta percepatan nukleasi dengan waktu induksi (t_i) rata-rata sekitar 2 kali lebih cepat dan waktu nukleasi (t_n) maksimum 3 kali lebih cepat dibandingkan tanpa penambahan SrCl₂.6H₂O. Penambahan 1-2% berat agen pengental HEC pada PCM CaCl₂.6H₂O + 1% berat SrCl₂.6H₂O memiliki kinerja temperature supercooling rata-rata 0,480 °C dari 20 kali iterasi dan reduksi efek

pemisahan fase adalah sekitar 60% pada iterasi ke-38.

5. Referensi

1. IEA. (2018). *The Future of Cooling*. International Energy Agency.
2. IEA. (2021). *Cooling*. International Energy Agency.
3. BPPT. (2021). *Perspektif Teknologi Energi Indonesia: Tenaga Surya untuk Penyediaan Energi Charging Station*. Pusat Pengkajian Industri Proses dan Energi (PPIPE) dan Badan Pengkajian dan Penerapan Teknologi (BPPT).
4. Ali, S., & Deshmukh, S. P. (2020). An overview: Applications of thermal energy storage using phase change materials. *Materials Today: Proceedings*, 26, 1231–1237.
5. IRENA. (2020). *Innovation Outlook: Thermal Energy Storage*. International Renewable Energy Agency.
6. Yang, T., King, W. P., & Miljkovic, N. (2021). Phase change material-based thermal energy storage. *Cell Reports Physical Science*, 2(8), 100540.
7. Mehling, H., Cabeza, L. F., Mayinger, F., & Mewes, D. (2008). *Heat and cold storage with PCM: An up to date introduction into basics and applications*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg Springer e-books.

8. Sharma, A., Tyagi, V. V., Chen, C. R., & Buddhi, D. (2009). Review on thermal energy storage with phase change materials and applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13(2), 318–345.
9. Jeon, J., Lee, J.-H., Seo, J., Jeong, S.-G., & Kim, S. (2013). Application of PCM thermal energy storage system to reduce building energy consumption. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 111(1), 279–288.
10. Lazaar, M., Bouadila, S., Kooli, S., & Farhat, A. (2014). Conditioning of the tunnel greenhouse in the north of Tunisia using a calcium chloride hexahydrate integrated in polypropylene heat exchanger. *Applied Thermal Engineering*, 68(1–2), 62–68.
11. Farid, M. M., Khudhair, A. M., Razack, S. A. K., & Al-Hallaj, S. (2004). A review on phase change energy storage: Materials and applications. *Energy Conversion and Management*, 45(9–10), 1597–1615.
12. Carlsson, B. (2009). Phase change behaviour of some latent heat storage media based on calcium chloride hexahydrate. *Solar Energy*, 83(4), 485–500.
13. Suwono, A., Indartono, Y. S., Irsyad, M., & Al-Afkar, I. C. (2015). Application of calcium chloride as an additive for secondary refrigerant in the air conditioning system type chiller to minimized energy consumption. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 88, 012035.
14. U, S. R. A., Putri, W. A., Sutjahja, I. M., Kurnia, D., & Wonorahardjo, S. (2016). The effectiveness of organic PCM based on lauric acid from coconut oil and inorganic PCM based on salt hydrate $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ as latent heat energy storage system in Indonesia. *Journal of Physics: Conference Series*, 739, 012119.
15. Prabhu P.A., Shinde N.N., & Prof. Patil P.S. (2012). Review of Phase Change Materials For Thermal Energy Storage Applications. *International Journal of Engineering Research and Applications (IJERA)*, 2(3), 871–875.
16. He, M., Yang, L., & Zhang, Z. (2018). Experimental studies on cycling stable characteristics of inorganic phase change material $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ - $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ modified with $\text{SrCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ and CMC. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 108, 022058.
17. Lane, G. A. (1992). Phase change materials for energy storage nucleation to prevent supercooling. *Solar Energy*

- Materials and Solar Cells*, 27(2), 135–160.
18. Sutjahja, I. M., A U, S. R., Kurniati, N., Pallitine, I. D., & Kurnia, D. (2016). The role of chemical additives to the phase change process of $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ to optimize its performance as latent heat energy storage system. *Journal of Physics: Conference Series*, 739, 012064.
19. Zou, T., Fu, W., Liang, X., Wang, S., Gao, X., Zhang, Z., & Fang, Y. (2018). Preparation and performance of modified calcium chloride hexahydrate composite phase change material for air-conditioning cold storage. *International Journal of Refrigeration*, 95, 175–181.
20. Xie, N., Huang, Z., Luo, Z., Gao, X., Fang, Y., & Zhang, Z. (2017). Inorganic Salt Hydrate for Thermal Energy Storage. *Applied Sciences*, 7(12), 1317.
21. Ryu, H. W., Woo, S. W., Shin, B. C., & Kim, S. D. (1992). Prevention of supercooling and stabilization of inorganic salt hydrates as latent heat storage materials. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 27(2), 161–172.
22. Efimova, A., Pinnau, S., Mischke, M., Breikopf, C., Ruck, M., & Schmidt, P. (2014). Development of salt hydrate eutectics as latent heat storage for air conditioning and cooling. *Thermochimica Acta*, 575, 276–278.
23. Li, G., Zhang, B., Li, X., Zhou, Y., Sun, Q., & Yun, Q. (2014). The preparation, characterization and modification of a new phase change material: $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ – $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ eutectic hydrate salt. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 126, 51–55.
24. Mullin, J. W. (2001). *Crystallization* (4th ed). Butterworth-Heinemann.
25. Zhang, Z., Sun, D.-W., Zhu, Z., & Cheng, L. (2015). Enhancement of Crystallization Processes by Power Ultrasound: Current State-of-the-Art and Research Advances: Power ultrasound. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 14(4), 303–316.