

Analisis Karakteristik dan Sifat Termofisika *Phase Change Material* (PCM) Berbasis *Salt Hydrate* Kalsium Klorida dengan Zat Aditif untuk Aplikasi Sistem Refrigerasi *Hybrid* pada *Reefer Container*

Muhammad Rizqi Aditya Veva, Sutopo Purwono Fitri, dan Ede Mehta Wardhana
Departemen Teknik Sistem Perkapalan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)
e-mail: sutopopf@gmail.com

Abstrak—*Reefer container* bergantung pada energi listrik kapal dalam skala besar sebagai sumber dayanya. *Reefer container* tidak dapat berfungsi secara optimal tanpa pasokan energi listrik yang kontinu. Dalam upaya mengatasi fluktuasi suhu dan mengurangi konsumsi energi, telah diperkenalkan teknologi berupa *Phase Change Material* (PCM) yang mampu menyimpan energi termal dan diterapkan pada sistem pendinginan *hybrid* pada *reefer container*. Penelitian ini bertujuan untuk menguji dan menganalisis karakteristik, sifat termofisika, dan pengaruh penambahan zat aditif (agen nukleasi dan agen pengental) pada karakteristik dan sifat termofisika PCM berbasis *salt hydrate* kalsium klorida untuk aplikasi pada suhu rendah. Metode yang digunakan pada penelitian ini yaitu metode eksperimental meliputi *Supercooling Test*, DSC Test, dan FTIR Test. Dari keenam sampel yang telah diuji, terdapat dua sampel terbaik yaitu sampel S1 dan S6. Hal tersebut dikarenakan memiliki titik beku antara -20°C s.d. -25°C sesuai dengan temperatur kerja *reefer container* dan derajat *supercooling* yang rendah. Sampel PCM S1-C20S0 (20% w.t. $\text{CaCl}_2 - \text{H}_2\text{O}$) memiliki titik beku -21.33°C , derajat *supercooling* rendah sebesar 0.45°C , dan kalor laten sebesar 6.64 J/g . Sampel PCM S6-C20S2C05 (20% w.t. $\text{CaCl}_2 - \text{H}_2\text{O} + 2\% \text{ w.t. SrCl}_2 + 0.5\% \text{ w.t. CMC}$) memiliki titik beku -24.49°C , derajat *supercooling* sebesar 0.05°C , dan kalor laten sebesar 3.11 J/g . Kedua larutan ini menunjukkan adanya gugus OH dan C=O, maka tergolong sebagai larutan hidrat, khususnya *salt hydrate*. Adapun pengaruh penambahan zat aditif dapat mengurangi derajat *supercooling* pada larutan PCM, tetapi juga mengurangi kalor laten larutan PCM.

Kata Kunci—DSC Test, FTIR Test, Phase Change Material, Supercooling Test.

I. PENDAHULUAN

REEFER *container* merupakan contoh dari penggunaan sistem refrigerasi di kapal yang memanfaatkan energi listrik besar sebagai sumber tenaganya untuk menjaga suhu muatan di dalamnya, hal ini berdampak pada tingginya biaya operasional aktivitas distribusi suatu komoditas. *Reefer container* 40 ft membutuhkan daya antara 7.4-7.7 kW untuk mendapatkan suhu -18°C pada bagian dalam kontainer [1]. *Reefer container* tidak dapat beroperasi sebagaimana mestinya apabila tidak ada suplai energi listrik secara kontinu. Misalnya ketika kapal mengalami keadaan *emergency*, *blackout*, dan *overhaul*. Hal seperti itu menyebabkan muatan di dalam *reefer container* tersebut mengalami penurunan kualitas dan bisa juga sampai terjadi pembusukan.

Saat ini, *Phase Change Material* (PCM) merupakan alternatif teknologi yang banyak digunakan dalam aplikasi sistem refrigerasi karena dapat menyimpan energi termal

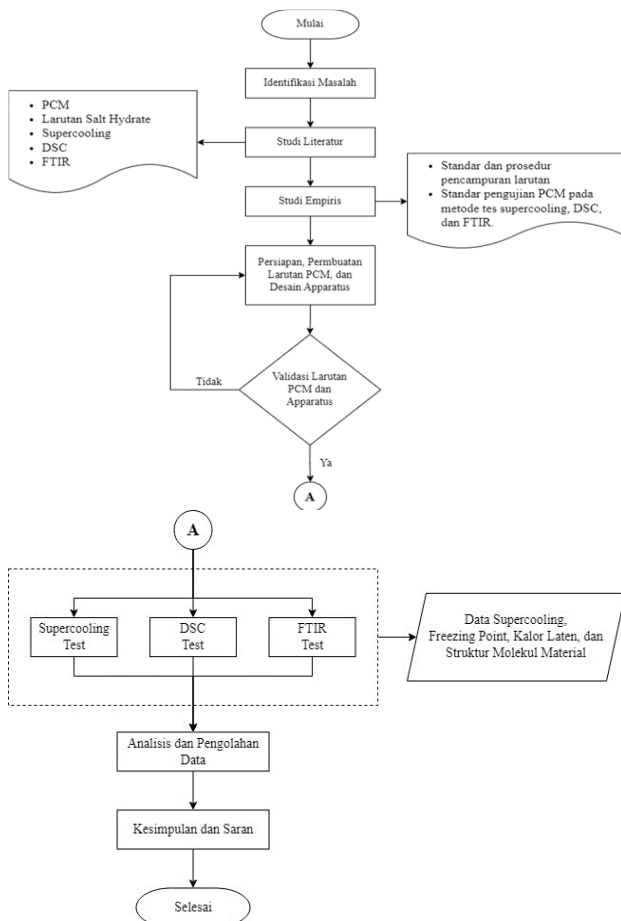
sebagai kalor laten [2]. Teknologi PCM dapat menggantikan peran sistem refrigerasi konvensional dari *reefer container* selama beberapa waktu. Kalsium klorida dianggap sebagai PCM *salt hydrate* representatif karena keunggulan entalpi fusi yang tinggi, tidak beracun, dan mudah didapatkan. Secara umum dengan kebanyakan hidrat garam, CaCl_2 memiliki kecenderungan menuju *supercooling* dan pemisahan fase dalam aplikasi praktis [3]. Solusi untuk masalah tersebut adalah dengan menggunakan tambahan zat aditif berupa agen nukleasi dan agen pengental. Agen nukleasi dapat dibedakan menjadi nukleator isomorfik dan nukleator non-isomorfik dengan membandingkan kesamaan struktur kristal dan parameter kisi aditif dan bahan yang melekat padanya [3]. Hingga saat ini belum ada penelitian yang menggunakan CaCl_2 dengan tambahan zat aditif untuk aplikasi PCM pada suhu -20°C sesuai dengan suhu *reefer container*.

Penelitian ini bertujuan untuk menguji dan menganalisis karakteristik, sifat termofisika, dan pengaruh penambahan zat aditif berupa SrCl_2 sebagai *nucleating agent* dan CMC sebagai zat pengental pada karakteristik dan sifat termofisika PCM berbasis *salt hydrate* untuk aplikasi pada suhu rendah. Serangkaian pengujian yang akan dilakukan terhadap PCM yaitu meliputi *Supercooling Test*, DSC (*Differential Scanning Calorimetry*) dan juga analisis FTIR (*Fourier Transform Infrared Spectroscopy*). Pada pengujian *Supercooling Test* bertujuan untuk mengetahui apakah material akan mengalami fenomena *supercooling* atau tidak, *freezing point*, dan *nucleating point*. Sedangkan pada pengujian DSC bertujuan untuk mengetahui kalor laten, sedangkan pada pengujian FTIR bertujuan untuk mengetahui struktur molekul material.

II. URAIAN PENELITIAN

A. Thermal Energy Storage (TES)

Thermal Energy Storage (TES) adalah material yang dapat menyimpan energi untuk digunakan kemudian. Dengan terjadinya perubahan suhu atau fase, pada energi yang disimpan. Hal ini menunjukkan bahwa TES memiliki dua sistem kerja, yaitu dengan perubahan temperatur yang disebut *sensible heat* dan dengan perubahan fasa yang disebut *latent heat*. *Latent heat* material biasanya dikenal sebagai *phase change material* (PCM). Selain dapat menyerap dan melepaskan panas dengan melalui perubahan fase, PCM juga dapat melakukannya dengan melalui perubahan suhu. Dengan kata lain, PCM juga memiliki



Gambar 1. Flowchart metodologi penelitian.

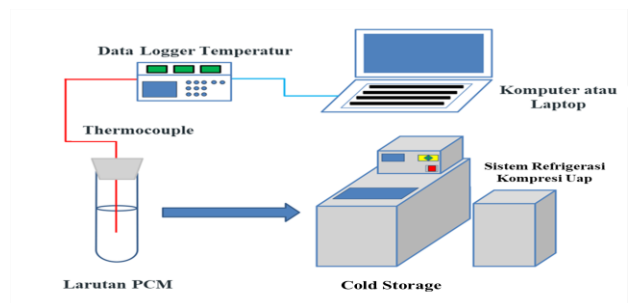
kemampuan *sensible heat*. *Latent heat* selalu lebih besar bila dibandingkan dengan *sensible heat* sehingga kalor spesifik *latent heat* lebih sering dimanfaatkan [4].

B. Kalor Laten dan Perubahan Fasa

Suhu suatu zat tidak akan berubah selama perubahan fase sampai seluruh zat berubah fase. Transisi fase yang paling sering termasuk fusi (dari padat ke cair), meleleh (dari padat ke cair), menguap (dari cair ke gas), kondensasi (dari gas ke cair), dan sublimasi (padat ke gas). Ketika suatu zat berubah fase, energi yang diserap digunakan untuk meningkatkan energi potensial sedangkan energi kinetik tetap. Energi yang diperlukan untuk mengubah fasa tanpa mengubah suhu disebut panas laten (L). Sedangkan energi yang dibutuhkan untuk melakukan perubahan fasa dari padat ke cair dan sebaliknya dikenal sebagai laten heat of fusion (H) [5].

C. Phase Change Material (PCM)

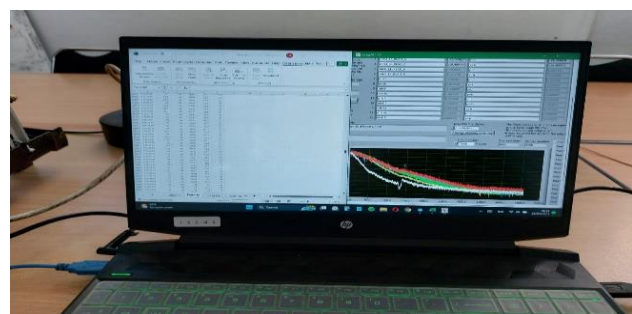
Phase Change Material (PCM) adalah zat yang dapat berubah fasa dan melepaskan atau menyerap energi yang cukup pada transisi fase untuk menghasilkan panas atau dingin. Material PCM memiliki panas laten yang tinggi. Bahan PCM memiliki kemampuan unik untuk meleleh dan membeku pada suhu tertentu, serta menyimpan dan melepaskan energi selama perubahan fasa [6]. Jenis PCM *salt hydrate* memiliki konduktivitas panas yang lebih tinggi, kalor laten lebih tinggi, dan fenomena degradasi yang lebih rendah. Namun, ada kekurangannya, seperti fenomena *supercooling*, pemisahan fase, dan korosi pada bahan kemasan [7].



Gambar 2. Skema apparatus untuk *supercooling test*.



Gambar 3. Peletakan larutan dan termokopel ke dalam *cold storage*.



Gambar 4. Proses pengambilan data dengan LJ LogM.

D. Kalsium Klorida (CaCl₂)

Larutan yang dapat berubah fasa dari padat menjadi cair salah satunya adalah larutan kalsium klorida. Golongan bahan berubah fase non-organik meliputi kalsium klorida. Ketika dikombinasikan dengan air, kalsium klorida akan menghasilkan larutan hidrat. Dengan mengubah persentase massa atau volume campuran, kalsium klorida sendiri dapat diubah menjadi larutan hidrat. Satu manfaat lain menggunakan larutan kalsium klorida adalah bahwa kita dapat memodifikasi titik beku dan titik leleh larutan dengan memodifikasi fraksi massa CaCl₂ terhadap air, sehingga memungkinkan kita memodifikasi larutan ke kondisi kerja yang diinginkan [8].

E. Stronsium Klorida (SrCl₂) Sebagai Agen Nukleasi

Stronsium klorida (SrCl₂) adalah garam anorganik yang dihasilkan dari campuran yang menggabungkan stronsium dan klorida. Senyawa ini bersifat netral dalam larutan, seperti kebanyakan garam pada umumnya. Ini dapat digunakan sebagai sumber daya dalam sintesis organik untuk membuat berbagai jenis senyawa strontium. Jika dibandingkan dengan sulfida, ia memiliki keunggulan tidak bereaksi dengan oksigen dan karbon dioksida, sehingga memudahkan penanganan di industri. Dengan meningkatnya konsentrasi SrCl₂·6H₂O, derajat *supercooling* berlebih dari larutan berbasis kalsium menurun tajam, tetapi setelah persen massa SrCl₂·6H₂O lebih dari 2% massa, derajat

Tabel 1.
Komposisi PCM yang akan dibuat

No	Nama Sampel	Perbandingan Persentase Massa			
		Kalsium Klorida (CaCl ₂)	Air (H ₂ O)	Agen Nukleasi Stronsium Klorida (SrCl ₂ ·6H ₂ O)	Zat Pengental Carboxymethyl Cellulose (CMC)
S1	C20S0	20%	80%	-	-
S2	C20S2C1	20%	80%	+ 2%	+ 1%
S3	C22S0	22%	78%	-	-
S4	C22S2C1	22%	78%	+ 2%	+ 1%
S5	C20S2C0	20%	80%	+ 2%	-
S6	C20S2C05	20%	80%	+ 2%	+ 0.5%

Tabel 2.
Temperature Program pada pengujian DSC

Temperature Program	
Start Temp. [°C]	0
Temp Rate [°C/min]	-10
Hold Temp. [°C]	-40
Hold Time [min]	0
Gas	Udara

pendinginan malah meningkat. Oleh karena itu, 2% massa SrCl₂·6H₂O sebagai agen nukleasi terbaik [9].

F. Supercooling/Subcooling

Supercooling adalah keadaan metastabil PCM di mana mereka tetap dalam fase cair ketika didinginkan di bawah suhu titik lelehnya. Misalnya, pada tekanan atmosfer di laboratorium, air murni dapat didinginkan hingga -41°C tanpa melalui transisi fase padat. Oleh karena itu, dalam aplikasi jangka pendek, menggunakan cairan supercooled bukanlah metode yang efisien. Meskipun demikian, karena cairan supercooled dapat dipertahankan dalam keseimbangan termal dengan suhu lingkungan untuk jangka waktu yang lama, supercooling merupakan karakteristik yang menarik dalam aplikasi jangka panjang [10].

III. METODOLOGI PENELITIAN

Metode yang digunakan pada penelitian ini yaitu metode eksperimental. Penelitian akan dimulai dengan penentuan masalah, dan akan dilanjutkan dengan studi literatur, studi empiris, persiapan solusi PCM dan desain peralatan, pembuatan solusi PCM dan kalibrasi peralatan, validasi solusi PCM, berbagai pengujian (uji sub/supercooling, DSC, FTIR), pengumpulan & analisis data, dan diakhiri dengan kesimpulan dan rekomendasi. Alur penelitian ditunjukkan oleh Gambar 1.

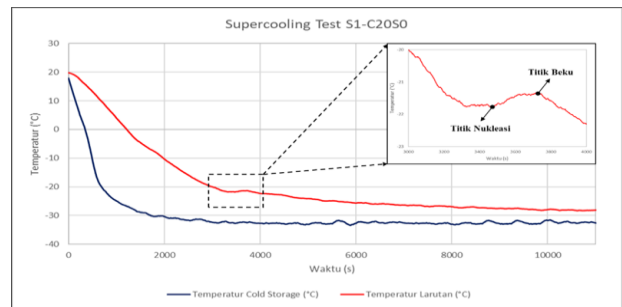
A. Persiapan Pembuatan Larutan PCM dan Desain Apparatus

Pada penelitian sebelumnya, pembuatan PCM dilakukan dengan mencampurkan kalsium klorida (CaCl₂) dengan air distilasi/suling (H₂O) dengan persentase berat kalsium klorida (CaCl₂) sebanyak 50.66%, 29.8%, 30,5%. Namun karena titik beku yang dihasilkan tidak sesuai yang diharapkan, maka perlu dilakukan penyesuaian persentase perbandingan CaCl₂, H₂O, dan zat aditif yang berfungsi sebagai agen nukleasi yaitu stronsium klorida heksahidrat.

Pada penelitian ini dengan mengacu pada penelitian sebelumnya komposisi yang digunakan untuk pembuatan PCM seperti pada Tabel 1 agar bisa mendapat titik beku

Tabel 3.
Data Hasil Supercooling Test

Sampel PCM	Bahan Dasar PCM	Zat Aditif	Titik Nukleasi (°C)	Titik Beku (°C)	Derajat Supercooling (°C) *Lower better
S1-C20S0	20% w.t. CaCl ₂	-	-21.78	-21.33	0.45
S2-C20S2C1	20% w.t. CaCl ₂	2% SrCl ₂ + 1% CMC	-25.84	-25.70	0.14
S3-C22S0	22% w.t. CaCl ₂	-	-26.11	-25.55	0.56
S4-C22S2C1	22% w.t. CaCl ₂	2% SrCl ₂ + 1% CMC	-27.36	-27.27	0.09
S5-C20S2C0	20% w.t. CaCl ₂	2% SrCl ₂	-25.81	-25.54	0.27
S6-C20S2C05	20% w.t. CaCl ₂	2% SrCl ₂ + 0.5% CMC	-24.54	-24.49	0.05



Gambar 5. Hasil Supercooling Test Sampel S1-C20S0.

yang diinginkan sekitar -20°C sampai dengan -25°C dan dilakukan penambahan zat aditif berupa stronsium klorida heksahidrat sebanyak 2% dan CMC yang berfungsi untuk mengurangi terjadinya fenomena supercooling pada larutan PCM.

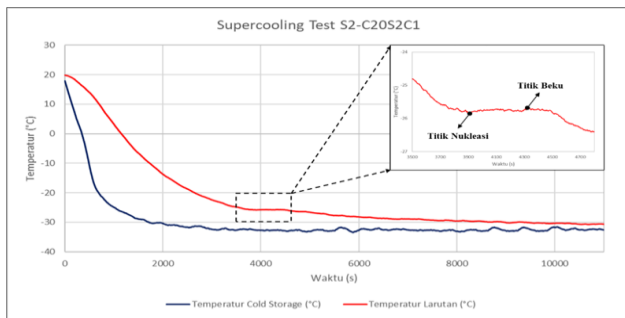
B. Kalibrasi Apparatus dan Validasi Larutan PCM

Standar dan prosedur percobaan akan digunakan untuk proses kalibrasi. Sebelum melakukan percobaan, larutan PCM harus divalidasi mengacu pada standar dan prosedur pencampuran larutan untuk memastikan kesesuaian komposisi larutan, homogenitas larutan, dan alat ukur yang akan digunakan harus di kalibrasi terlebih dahulu agar menghasilkan data yang akurat.

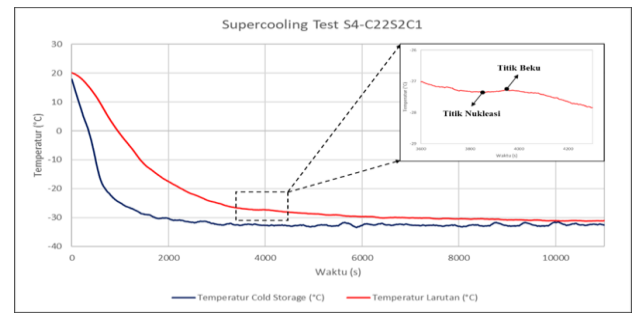
C. Pengujian Supercooling

Untuk pengujian Supercooling dilakukan di Laboratorium MMS, Departemen Teknik Sistem Perkapalan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember. Adapun langkah-langkah yang digunakan pada metode pengujian supercooling sebagai berikut:

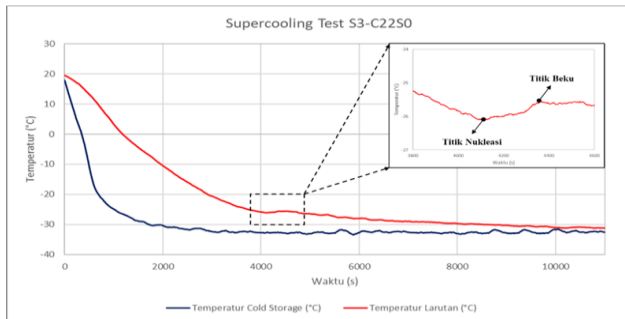
1. Siapkan larutan PCM yang akan diuji.
2. Siapkan dan rancang ruang pendingin, dan sistem refrigerasi kompresi uap seperti terlihat pada Gambar 2.
3. Tuangkan larutan PCM ke dalam gelas beaker dan masukkan ke dalam ruang pendingin.
4. Letakkan termokopel ke dalam masing-masing beaker glass dan di dalam ruang pendingin seperti yang ditunjukkan Gambar 3.
5. Tutup ruang pendingin sampai rapat.
6. Pastikan semua fitting kencang dan tidak ada kebocoran.
7. Nyalakan kompresor pendingin untuk mendinginkan ruang pendingin.
8. Perhatikan perubahan suhu dari laptop yang sudah



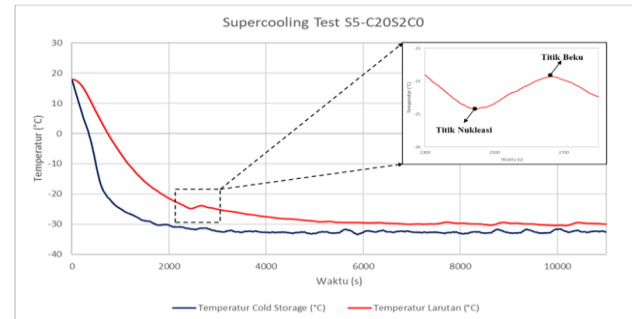
Gambar 6. Hasil *Supercooling Test* Sampel S2-C20S2C1.



Gambar 8. Hasil *Supercooling Test* Sampel S4-C22S2C1.



Gambar 7. Hasil *Supercooling Test* Sampel S3-C22S0.



Gambar 9. Hasil *Supercooling Test* Sampel S5-C20S2C0.

terhubung dengan data logger. Pengambilan data ditunjukkan oleh Gambar 4.

D. Pengujian DSC

Pada penelitian ini, pengujian DSC dilakukan oleh Laboratorium Penelitian dan Pengujian Terpadu Universitas Gadjah Mada (LPPT UGM) yang mengacu pada sistem manajemen mutu laboratorium ISO/IEC 17025:2017. Sejak tahun 2021 LPPT-UGM telah terbukti memiliki kompetensi pengujian yang telah terakreditasi oleh Komite Akreditasi Nasional (KAN). Parameter yang digunakan dalam pengujian DSC dimuat dalam Tabel 2.

E. Pengujian FTIR

Pada penelitian ini, pengujian FTIR dilakukan oleh Laboratorium Divisi Karakterisasi Departemen Teknik Material & Metalurgi Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

F. Analisis dan Pengolahan Data

Data yang diamati dan akan diperoleh adalah data perubahan suhu PCM dari *supercooling test*, hasil pengujian DSC, dan hasil pengujian FTIR. Data yang diambil berupa Data *Supercooling*, Freezing Point, Kalor Laten, dan Struktur Molekul Material.

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Supercooling Test

Supercooling atau *subcooling* adalah keadaan metastabil PCM di mana mereka tetap dalam fase cair ketika didinginkan di bawah suhu titik bekunya. Misalnya, pada tekanan atmosfer di laboratorium, air murni dapat didinginkan hingga -41°C tanpa melalui transisi fase padat [10].

Secara umum, derajat *supercooling* yang bernilai lebih rendah menyebabkan proses pematangan/solidifikasi yang lebih cepat dan temperatur pembekuan material yang lebih tinggi. Namun apabila derajat *supercooling* bernilai tinggi dapat berakibat negatif untuk fungsionalitas sistem *Thermal*

Energy Storage (TES) karena dapat menyebabkan pembekuan terjadi pada suhu yang lebih rendah dari yang diperkirakan, menghasilkan rentang suhu operasional yang lebih besar dan lebih sedikit energi yang dilepaskan.

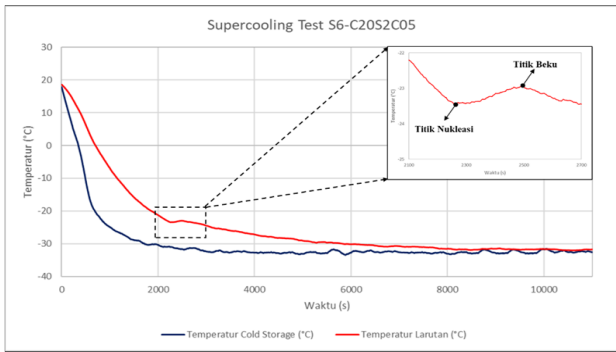
Pada Tabel 3 menampilkan data *phase change material* pada percobaan *supercooling test* bersama dengan parameter bahan dasar PCM, zat aditif, fenomena *supercooling*, temperatur titik beku, suhu titik nukleasi, dan derajat *supercooling*. Dari pengujian yang telah dilakukan, didapatkan sampel PCM yang terbaik dan sesuai dengan perencanaan yaitu PCM S1-C20S0 dan S6-C20S2C05 karena memiliki titik beku antara -20°C s.d. -25°C sesuai dengan temperatur kerja *reefer container* dan derajat *supercooling* yang rendah.

1) Analisis Supercooling Sampel S1-C20S0 (20% w.t. CaCl₂ - H₂O)

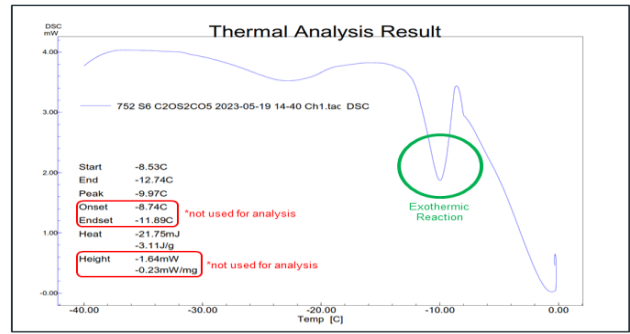
Gambar 5 menunjukkan hasil percobaan *supercooling test* yang dilakukan pada larutan 20% w.t. CaCl₂ - H₂O (tanpa zat aditif). Temperatur *cold storage* merupakan suhu ruangan di dalam *cold storage* tempat larutan PCM didinginkan. Dapat dilihat dari pengujian, larutan mengalami fenomena *supercooling*. Titik nukleasi pada percobaan *supercooling test* terjadi pada suhu -21.78°C dan titik beku pada suhu -21.33°C, sehingga derajat *supercooling* pada larutan sebesar 0.45°C.

2) Analisis Supercooling Sampel S2-C20S2C1 (20% w.t. CaCl₂ - H₂O + 2% w.t. SrCl₂ + 1% w.t. CMC)

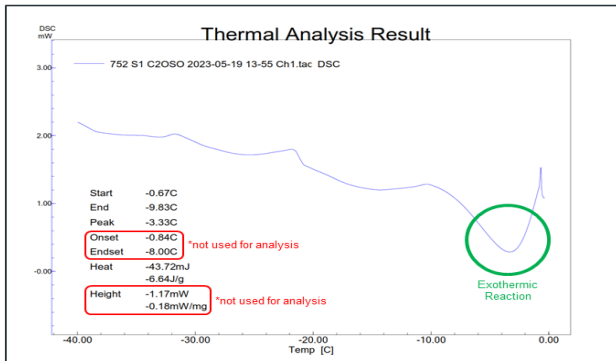
Gambar 6 menunjukkan hasil percobaan *supercooling test* yang dilakukan pada larutan 20% w.t. CaCl₂ - H₂O + 2% w.t. SrCl₂ + 1% w.t. CMC (dengan tambahan zat aditif). Temperatur *cold storage* merupakan suhu ruangan di dalam *cold storage* tempat larutan PCM didinginkan. Dapat dilihat dari pengujian, larutan mengalami fenomena *supercooling*, tetapi dengan penambahan zat aditif SrCl₂ dan CMC dapat sedikit mengurangi derajat *supercooling*. Titik nukleasi pada percobaan *supercooling test* terjadi pada suhu -25.84°C dan titik beku pada suhu -25.70°C, sehingga derajat *supercooling* pada larutan sebesar 0.14°C.



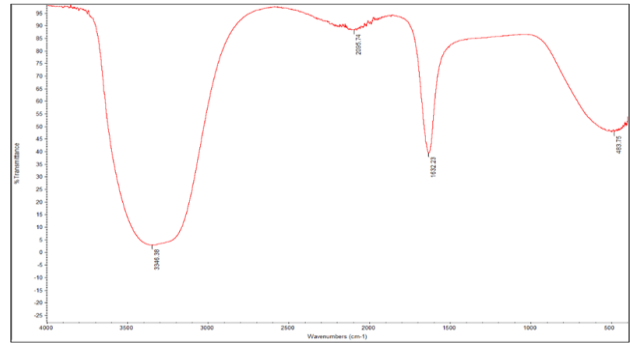
Gambar 10. Hasil Supercooling Test Sampel S6-C20S2C05.



Gambar 12. Hasil DSC Sampel S6-C20S2C05.



Gambar 11. Hasil DSC Sampel S1-C20S0.



Gambar 13. Spektrum FTIR Sampel S1-C20S0.

3) Analisis Supercooling Sampel S3-C22S0 (22% w.t. CaCl₂ - H₂O)

Gambar 7 menunjukkan hasil percobaan supercooling test yang dilakukan pada larutan 22% w.t. CaCl₂ - H₂O (tanpa zat aditif). Temperatur cold storage merupakan suhu ruangan di dalam cold storage tempat larutan PCM didinginkan. Dapat dilihat dari pengujian, larutan mengalami fenomena supercooling. Titik nukleasi pada percobaan supercooling test terjadi pada suhu -26.11°C dan titik beku pada suhu -24.49°C, sehingga derajat supercooling pada larutan sebesar 0.56°C.

4) Analisis Supercooling Sampel S4-C22S2C1 (22% w.t. CaCl₂ - H₂O + 2% w.t. SrCl₂ + 1% w.t. CMC)

Gambar 8 menunjukkan hasil percobaan supercooling test yang dilakukan pada larutan 22% w.t. CaCl₂ - H₂O + 2% w.t. SrCl₂ + 1% w.t. CMC. Temperatur cold storage merupakan suhu ruangan di dalam cold storage tempat larutan PCM didinginkan. Dapat dilihat dari pengujian, larutan mengalami fenomena supercooling, tetapi dengan penambahan zat aditif SrCl₂ dan CMC dapat sedikit mengurangi derajat supercooling. Titik nukleasi pada percobaan supercooling test terjadi pada suhu -27.36°C dan titik beku pada suhu -27.27°C, sehingga derajat supercooling pada larutan sebesar 0.09°C.

5) Analisis Supercooling Sampel S5-C20S2C0 (20% w.t. CaCl₂ - H₂O + 2% w.t. SrCl₂)

Gambar 9 menunjukkan hasil percobaan supercooling test yang dilakukan pada larutan 20% w.t. CaCl₂ - H₂O + 2% w.t. SrCl₂. Temperatur cold storage merupakan suhu ruangan di dalam cold storage tempat larutan PCM didinginkan. Dapat dilihat dari pengujian, larutan mengalami fenomena supercooling. Titik nukleasi pada percobaan supercooling test terjadi pada suhu -25.81°C dan titik beku pada suhu -25.54°C, sehingga derajat supercooling pada larutan sebesar 0.27°C.

6) Analisis Supercooling Sampel S6-C20S2C05 (20% w.t. CaCl₂ - H₂O + 2% w.t. SrCl₂ + 0.5% w.t. CMC)

Gambar 10 menunjukkan hasil percobaan supercooling test yang dilakukan pada larutan 22% w.t. CaCl₂ - H₂O + 2% w.t. SrCl₂ + 0.5% w.t. CMC. Temperatur cold storage merupakan suhu ruangan di dalam cold storage tempat larutan PCM didinginkan. Dapat dilihat dari pengujian, larutan mengalami fenomena supercooling. Titik nukleasi pada percobaan supercooling test terjadi pada suhu -24.54°C dan titik beku pada suhu -24.49°C, sehingga derajat supercooling pada larutan sebesar 0.05°C.

Derajat supercooling yang bernilai lebih rendah menyebabkan proses pematatan/solidifikasi yang lebih cepat dan temperatur pembekuan material yang lebih tinggi. Namun apabila derajat supercooling bernilai tinggi dapat berakibat negatif untuk fungsionalitas sistem Thermal Energy Storage (TES).

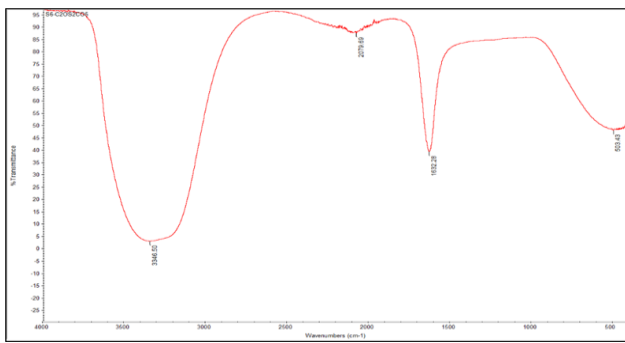
B. DSC Test

Pengujian DSC dilakukan untuk mengetahui sifat termofisika dari sampel PCM. Sampel PCM yang digunakan yaitu PCM S1-C20S0 (20% w.t. CaCl₂ - H₂O) dan PCM S6-C20S2C05 (20% w.t. CaCl₂ - H₂O + 2% w.t. SrCl₂ + 0.5% w.t. CMC). Sampel PCM tersebut merupakan sampel terbaik diantara semua sampel yang dibuat setelah dilakukan pengujian supercooling.

1) Analisis DSC Sampel S1-C20S0 (20% w.t. CaCl₂ - H₂O)

Gambar 11 menunjukkan kurva hasil uji DSC pada Sampel S1-C20S0 yang merupakan larutan PCM tanpa penambahan zat aditif. Pada kurva menunjukkan pada sampel ini, alat pengujian DSC mendeteksi terjadi sekali reaksi eksotermis tanpa ada reaksi endotermis.

Reaksi eksotermis ditunjukkan dengan kurva turun yang mengarah ke bawah dengan nilai kalor negatif dimulai dari suhu -0.67°C, berakhir pada suhu -9.83°C, dan memuncak pada suhu -3.33°C. Hasil kalor spesifik yang terekam pada reaksi eksotermis untuk sampel 6.58 mg tersebut adalah



Gambar 14. Spektrum FTIR Sampel S6-C20S2C05.

43.72 mJ dan kalor latennya sebesar 6.64 J/g.

2) Analisis DSC Sampel S6-C20S2C05 (20% w.t. $\text{CaCl}_2 - \text{H}_2\text{O} + 2\% \text{ w.t. SrCl}_2 + 0.5\% \text{ w.t. CMC}$)

Gambar 12 menunjukkan kurva hasil uji DSC pada Sampel S6-C20S2C05 yang merupakan larutan PCM dengan tambahan zat aditif SrCl_2 sebagai *nucleating agent* dan CMC sebagai zat pengental. Pada kurva menunjukkan pada sampel ini, alat pengujian DSC mendeteksi terjadi sekali reaksi eksotermis tanpa ada reaksi endotermis.

Reaksi eksotermis ditunjukkan dengan kurva turun yang mengarah ke bawah dengan nilai kalor negatif dimulai dari suhu -8.53°C , berakhir pada suhu -12.74°C , dan memuncak pada suhu -9.97°C . Hasil kalor spesifik yang terekam pada reaksi eksotermis untuk sampel 6.99 mg tersebut adalah 21.75 mJ dan kalor latennya sebesar 3.11 J/g.

3) Perbandingan Hasil DSC antara Larutan PCM Tanpa Zat Aditif dan Larutan PCM dengan Tambahan Zat Aditif

Berdasarkan hasil pengujian DSC pada sampel S1-C20S0 yang merupakan larutan PCM tanpa tambahan zat aditif dan sampel S6-C20S2C05 yang merupakan larutan PCM dengan tambahan zat aditif SrCl_2 sebagai *nucleating agent* dan CMC sebagai zat pengental. Dari kedua sampel yang diuji, alat pengujian DSC mendeteksi terjadi sekali reaksi eksotermis pada masing-masing sampel. Sampel S1-C20S0 menunjukkan reaksi eksotermis yang lebih landai dibanding sampel S6-C20S2C05. Selain itu, nilai kalor spesifik dan kalor laten dari sampel S1-C20S0 lebih besar dibandingkan sampel S6-C20S2C05, nilai kalor spesifik dan kalor laten sampel S1-C20S0 dengan massa 6.58 mg adalah 43.72 mJ dan 6.64 J/g, sedangkan nilai kalor spesifik dan kalor laten sampel S6-C20S2C05 dengan massa 6.99 mg adalah 21.75 mJ dan 3.11 J/g.

Kalor laten mempengaruhi perubahan fase, kalor spesifik, dan transfer energi selama proses pemanasan dan pendinginan. Jadi apabila ditinjau dari besar kalor latennya, pengaruh penambahan zat aditif seperti pada sampel S6-C20S2C05 membuat nilai kalor latennya lebih rendah dibandingkan sampel S1-C20S0. *Phase change material* yang memiliki nilai kalor laten rendah akan memiliki kapasitas penyimpanan energi yang sedikit dan berubah fase lebih cepat apabila digunakan sebagai *Thermal Energy Storage* (TES). Rendahnya nilai kalor laten ini dipengaruhi beberapa faktor seperti jenis zat, interaksi molekuler, struktur kristal, suhu, konsentrasi, ikatan kimia.

C. FTIR Test

Pada penelitian ini dilakukan uji kimia untuk mengetahui komposisi dan sifat kimia larutan PCM. Dari segi sifat

kimia, PCM organik harus memiliki sifat stabilitas molekul yang kompatibel dengan bahan konstruksi, tidak beracun, *food grade*, dan tidak memiliki sifat bahaya kebakaran untuk alasan keamanan. Pengujian FTIR dilakukan untuk mengetahui sifat termofisika dari sampel PCM. Sampel PCM yang digunakan yaitu PCM S1-C20S0 (20% w.t. $\text{CaCl}_2 - \text{H}_2\text{O}$) dan PCM S6-C20S2C05 (20% w.t. $\text{CaCl}_2 - \text{H}_2\text{O} + 2\% \text{ w.t. SrCl}_2 + 0.5\% \text{ w.t. CMC}$). Sampel PCM tersebut merupakan sampel terbaik diantara semua sampel yang dibuat setelah dilakukan pengujian *supercooling* untuk menentukan titik beku, titik nukleasi, dan derajat *supercooling* dari semua sampel PCM.

1) Analisis FTIR Sampel S1-C20S0 (20% w.t. $\text{CaCl}_2 - \text{H}_2\text{O}$)

Gambar 13 menunjukkan spektrum hasil uji FTIR pada Sampel S1-C20S0 yang merupakan larutan PCM tanpa penambahan zat aditif. Berdasarkan data grafik spektrum FTIR tersebut diketahui panjang gelombang sebagai berikut:

- Panjang gelombang 3346.38 cm^{-1} menunjukkan adanya gugus OH dari senyawa alkohol dan puncaknya melebar, maka termasuk ikatan hidrogen dan tergolong sebagai larutan hidrat. Umumnya rentang panjang gelombang sekitar $3200-3550 \text{ cm}^{-1}$ dan intensitasnya kuat.
- Panjang gelombang 2095.74 cm^{-1} menunjukkan adanya ikatan rangkap tiga (*triple bond*) $\text{C}\equiv\text{C}$ dari senyawa alkuna dan intensitasnya bervariasi.
- Panjang gelombang 1632.23 cm^{-1} menunjukkan adanya gugus $\text{C}=\text{O}$ pada amida dari senyawa asam karboksilat turunannya dan puncaknya tajam. Umumnya rentang panjang gelombang sekitar $1630-1695 \text{ cm}^{-1}$ dan intensitasnya kuat.
- Panjang gelombang 483.75 cm^{-1} menunjukkan adanya gugus ion Ca^{2+} dari daerah gelombang *finger print* dan intensitasnya sedang.

2) Analisis FTIR Sampel S6-C20S2C05 (20% w.t. $\text{CaCl}_2 - \text{H}_2\text{O} + 2\% \text{ w.t. SrCl}_2 + 0.5\% \text{ w.t. CMC}$)

Gambar 14 menunjukkan spektrum hasil uji FTIR pada Sampel S6-C20S2C05 yang merupakan larutan PCM dengan tambahan zat aditif SrCl_2 sebagai *nucleating agent* dan CMC sebagai zat pengental. Berdasarkan data grafik spektrum FTIR diketahui panjang gelombang sebagai berikut:

- Panjang gelombang 3346.50 cm^{-1} menunjukkan adanya gugus OH dari senyawa alkohol dan puncaknya melebar, maka termasuk ikatan hidrogen dan tergolong sebagai larutan hidrat. Umumnya rentang panjang gelombang sekitar $3200-3550 \text{ cm}^{-1}$ dan intensitasnya kuat.
- Panjang gelombang 2079.69 cm^{-1} menunjukkan adanya ikatan rangkap tiga (*triple bond*) $\text{C}\equiv\text{C}$ dari senyawa alkuna dan intensitasnya bervariasi.
- Panjang gelombang 1632.28 cm^{-1} menunjukkan adanya gugus $\text{C}=\text{O}$ pada amida dari senyawa asam karboksilat turunannya dan puncaknya tajam. Umumnya rentang panjang gelombang sekitar $1630-1695 \text{ cm}^{-1}$ dan intensitasnya kuat.
- Panjang gelombang 503.43 cm^{-1} menunjukkan adanya gugus ion Ca^{2+} dari daerah gelombang *finger print* dan intensitasnya sedang.

Spektrum panjang gelombang yang terbaca pada larutan PCM dengan tambahan zat aditif identik dengan larutan PCM tanpa zat aditif, hal ini karena kedua larutan ini

memiliki bahan dasar yang sama yaitu 20% w.t. $\text{CaCl}_2 - \text{H}_2\text{O}$ dan dengan tambahan zat aditif dengan persentase berat massa yang kurang dari 3%. Larutan PCM dengan tambahan zat aditif juga tergolong dalam kategori larutan hidrat, khususnya *salt hydrate*.

V. KESIMPULAN/RINGKASAN

Dari data analisis pengujian karakteristik dan sifat termofisika larutan PCM $\text{CaCl}_2 - \text{H}_2\text{O}$ dan dengan tambahan zat aditif berupa SrCl_2 sebagai *nucleating agent* dan CMC sebagai zat pengental, dengan metode *supercooling test*, *DSC test*, dan *FTIR test*, didapatkan kesimpulan sebagai berikut: (1) Secara keseluruhan, keenam sampel yang telah diuji mengalami fenomena *supercooling*. Dua di antaranya merupakan sampel terbaik karena memiliki titik beku antara -20°C hingga -25°C , yang sesuai dengan temperatur kerja *reefer container* serta memiliki derajat *supercooling* yang rendah. Berikut adalah kedua sampel tersebut: (a) Sampel PCM S1-C20S0 (20% w.t. $\text{CaCl}_2 - \text{H}_2\text{O}$) merupakan sampel PCM tanpa zat aditif memiliki titik beku -21.33°C , derajat *supercooling* rendah sebesar 0.45°C . Selain itu, PCM memiliki kalor laten sebesar 6.64 J/g . (b) Sampel PCM S6-C20S2C05 (20% w.t. $\text{CaCl}_2 - \text{H}_2\text{O} + 2\% \text{ w.t. SrCl}_2 + 0.5\% \text{ w.t. CMC}$) merupakan sampel PCM dengan tambahan zat aditif. Sampel ini memiliki titik beku -24.49°C , derajat *supercooling* sebesar 0.05°C yang lebih rendah dibanding PCM S1-C20S0. Selain itu, PCM memiliki kalor laten sebesar 3.11 J/g yang lebih rendah dibanding PCM S1-C20S0. (c) Kedua sampel larutan ini menunjukkan adanya gugus OH dan C=O. Hal tersebut menandakan bahwa larutan tergolong sebagai larutan hidrat, khususnya *salt hydrate*. Secara keseluruhan, karena konduktivitas termal yang moderat, kalor latennya yang tinggi, dan rentang suhu leleh yang luas, larutan *salt hydrate* dapat menjadi pilihan yang efektif untuk *Thermal Energy Storage (TES)*. (2) Pengaruh penambahan zat aditif berupa Stronsium Klorida Heksahidrat ($\text{SrCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) sebagai *nucleating agent* dan Carboxymethyl Cellulose (CMC) sebagai zat pengental adalah sebagai berikut: (a) Berdasarkan komposisi berat massa 20% Kalsium Klorida (CaCl_2), pada sampel larutan PCM S2, S5, S6, dan S1. Dimana PCM S1 merupakan PCM tanpa tambahan zat aditif. PCM S1 tersebut awalnya memiliki derajat *supercooling* sebesar 0.45°C . Apabila PCM S1 di tambahkan 2% $\text{SrCl}_2 + 1\% \text{ CMC}$ seperti pada sampel S2, derajat *supercooling* mengalami penurunan 69% menjadi 0.14°C . Apabila PCM S1 ditambahkan 2% SrCl_2 tanpa CMC seperti pada sampel S5, derajat *supercooling* mengalami penurunan 41% menjadi 0.27°C . Apabila PCM S1 ditambahkan 2% $\text{SrCl}_2 + 0.5\% \text{ CMC}$ seperti pada sampel

S6, derajat *supercooling* mengalami penurunan 89% menjadi 0.05°C . (b) Berdasarkan komposisi berat massa 22% Kalsium Klorida (CaCl_2), pada sampel larutan PCM S4 dan S3. Dimana PCM S3 merupakan PCM tanpa tambahan zat aditif. PCM S3 tersebut awalnya memiliki derajat *supercooling* sebesar 0.56°C . Apabila PCM S3 di tambahkan 2% $\text{SrCl}_2 + 1\% \text{ CMC}$ seperti pada sampel S4, derajat *supercooling* mengalami penurunan 85% menjadi 0.09°C . (c) Apabila dilihat dari percobaan DSC, untuk nilai kalor laten dari sampel S1-C20S0 (tanpa zat aditif) dibandingkan dengan sampel S6-C20S2C05 (dengan penambahan zat aditif). Kalor laten sampel S1-C20S0 lebih besar dibandingkan dengan sampel S6-C20S2C05, nilai kalor laten sampel S1-C20S0 adalah 6.64 J/g , sedangkan nilai kalor laten sampel S6-C20S2C05 adalah 3.11 J/g .

Sesuai standar, PCM yang baik adalah PCM yang memiliki nilai derajat *supercooling* rendah namun nilai kalor latennya besar. Berdasarkan hasil penelitian tersebut maka dapat dilihat bahwa penambahan zat aditif ini dapat mengurangi ataupun meningkatkan kualitas PCM.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] M. A. Budiyo and T. Shinoda, "Stack effect on power consumption of refrigerated containers in storage yards," *Int. J. Technol.*, vol. 8, no. 7, p. 1182, Dec. 2017, doi: 10.14716/ijtech.v8i7.771.
- [2] Y. S. Indartono, A. Suwono, and L. Laila, "Penggunaan Bahan Berubah Fasa pada Dinding Bangunan dalam Sistem Pengondisian Udara Pasif," *Pusat Penelitian Energi Baru dan Terbarukan ITB*, 2017.
- [3] T. Zou *et al.*, "Preparation and performance of modified calcium chloride hexahydrate composite phase change material for air-conditioning cold storage," *Int. J. Refrig.*, vol. 95, pp. 175–181, 2018, doi: 10.1016/j.ijrefrig.2018.08.001.
- [4] I. Dincer and M. A. Rosen, *Thermal Energy Storage Systems And Applications*, 2nd ed. Ontario: Wiley, 2011.
- [5] A. P. Tipler and G. Mosca, *Physics for Scientist and Engineers Extended Version*, 5th ed. California: W. H. Freeman, 1997.
- [6] H. Nazir *et al.*, "Recent developments in phase change materials for energy storage applications: A review," *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 129, pp. 491–523, 2019, doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.09.126.
- [7] X. Zhang, Q. Shi, L. Luo, Y. Fan, Q. Wang, and G. Jia, "Research progress on the phase change materials for cold thermal energy storage," *Energies*, vol. 14, no. 24, p. 8233, Dec. 2021, doi: 10.3390/en14248233.
- [8] Z. Oktari, "Pembuatan, Pengujian Penukar Panas Pipa Ganda, dan Prediksi Karakteristik Perpindahan Panas Larutan Kalsium Klorida Sebagai Media Pendingin Sekunder," Departemen Teknik Mesin, Institut Teknologi Bandung, Bandung, 2015.
- [9] Y. Guo, D. Gao, X. Yu, C. Ma, S. Chen, and T. Deng, "Thermal energy storage using calcium chloride hexahydrate," *Therm. Sci.*, vol. 22, no. 6, pp. 3035–3041, 2017, doi: 10.2298/TS170119135G.
- [10] A. Safari, R. Saidur, F. A. Sulaiman, Y. Xu, and J. Dong, "A review on supercooling of phase change materials in thermal energy storage systems," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 70, no. July, pp. 905–919, 2017, doi: 10.1016/j.rser.2016.11.272.