

Artikel Penelitian (Teknik Mesin)

## Pemodelan dan Simulasi Temperatur pada Mesin Freezer Berbasis *Phase Change Material (PCM)*

Hadi Nurwahyudin<sup>\*</sup>, Boni Sena, Marno

Teknik, Teknik Mesin, Universitas Singaperbangsa Karawang, Karawang, Indonesia

### INFORMASI ARTIKEL

Diterima Redaksi: 09 Februari 2026  
Revisi Akhir: 21 April 2026  
Diterbitkan *Online*: 27 April 2026

### KATA KUNCI

Freezer  
Konduktivitas Termal  
Phase Change Material  
Simulasi Termal  
Stabilitas Suhu

### KORESPONDENSI<sup>(\*)</sup>

E-mail: [hadiwahyu623@gmail.com](mailto:hadiwahyu623@gmail.com)

### A B S T R A K

Fluktuasi suhu dalam mesin freezer dapat menurunkan kualitas produk dan meningkatkan konsumsi energi. Penelitian ini memodelkan dan mensimulasikan temperatur freezer berbasis Phase Change Material (PCM) menggunakan pendekatan matematis perpindahan kalor dan simulasi numerik dengan Python dan ANSYS. Berbagai jenis PCM seperti Dry Ice Gel, Liquid Komersial, Garam 20, Lilin, Minyak Sawit, Garam 36,4, dan Air diuji untuk menganalisis stabilitas suhu. Hasil menunjukkan Liquid Komersial menghasilkan beban pendingin terendah (22,959 W), namun simulasi temperatur dengan Python dan ANSYS menunjukkan bahwa Lilin dan Dry Ice Gel lebih optimal dalam mempertahankan suhu rendah. PCM secara umum mampu menstabilkan suhu dengan karakteristik yang berbeda. Analisis sensitivitas menunjukkan konduktivitas termal mempercepat pendinginan, sedangkan Cp dan kalor laten tinggi mempertahankan suhu stabil lebih lama.

## PENDAHULUAN

Fluktuasi temperatur pada mesin freezer masih menjadi permasalahan penting dalam sistem penyimpanan dingin karena dapat menurunkan mutu produk beku, mempercepat kerusakan bahan, serta meningkatkan konsumsi energi pada sistem refrigerasi. Ketidakstabilan suhu ini umumnya terjadi akibat siklus hidup kompresor, perpindahan panas dari lingkungan luar, pembukaan pintu freezer, maupun gangguan daya yang menyebabkan suhu di dalam ruang penyimpanan tidak dapat dipertahankan secara konstan [1]. Dalam rantai pendingin, kestabilan temperatur merupakan parameter krusial karena sangat memengaruhi kualitas produk, umur simpan, dan efisiensi operasional sistem pendingin secara keseluruhan [2]. Oleh sebab itu, diperlukan suatu pendekatan yang mampu menjaga suhu freezer tetap rendah dan stabil, terutama pada saat sistem refrigerasi tidak bekerja secara kontinu [3].

Salah satu metode yang berkembang untuk mengatasi permasalahan tersebut adalah penggunaan Phase Change Material (PCM) sebagai media penyimpanan energi termal. PCM memiliki kemampuan menyerap dan melepaskan panas laten pada temperatur tertentu selama proses perubahan fase, sehingga mampu meredam fluktuasi suhu dalam ruang freezer [4]. Penggunaan PCM pada sistem pendingin telah banyak diteliti karena terbukti dapat memperpanjang waktu pendinginan pasif, menurunkan frekuensi kerja kompresor, serta meningkatkan efisiensi energi [6]. Karakteristik termal PCM, seperti konduktivitas termal, kalor laten, densitas, dan kapasitas panas spesifik, sangat menentukan kemampuannya dalam mempertahankan suhu rendah [9]. Dengan demikian, pemilihan jenis PCM yang sesuai menjadi faktor penting dalam perancangan freezer yang efisien dan stabil secara termal.

Beberapa penelitian terdahulu telah menunjukkan potensi PCM dalam aplikasi freezer. Sena dkk. [4] melaporkan bahwa Dry Ice Gel mampu mempertahankan temperatur dinding freezer tetap rendah selama beberapa jam ketika daya listrik diputus. Suamir dkk. [5] menunjukkan bahwa bio-PCM berbasis minyak nabati dapat mengurangi fluktuasi suhu dan menurunkan siklus kerja kompresor pada chest freezer. Sementara itu, Dhahir dan Adham [6] menemukan bahwa penggunaan kombinasi multi-PCM dapat meningkatkan Coefficient of Performance (COP) serta menghemat energi pada sistem refrigerasi rumah tangga. Meskipun demikian, sebagian besar penelitian sebelumnya masih berfokus pada pengujian eksperimental terhadap satu atau dua jenis PCM saja, sehingga belum memberikan gambaran komparatif yang menyeluruh mengenai performa berbagai jenis PCM dalam satu sistem freezer dengan pendekatan simulasi numerik yang seragam.

Berdasarkan kondisi tersebut, penelitian ini dilakukan untuk memodelkan dan mensimulasikan distribusi temperatur pada mesin freezer berbasis PCM dengan membandingkan tujuh jenis PCM, yaitu Dry Ice Gel, Liquid Komersial, Garam 20, Lilin, Minyak Kelapa Sawit, Garam 36,4, dan Air. Berbeda dengan penelitian sebelumnya yang umumnya hanya menguji satu atau dua jenis PCM secara eksperimental, penelitian ini melakukan komparasi simulasi numerik secara simultan terhadap tujuh jenis PCM berbeda menggunakan pendekatan persamaan diferensial parsial dua dimensi transien serta Finite Element Analysis (FEA) melalui Python dan ANSYS. Kebaruan penelitian ini terletak pada integrasi analisis beban pendinginan, pemodelan matematis 2D transien, dan simulasi numerik multi-PCM dalam satu sistem freezer 100 liter, sehingga dapat memberikan evaluasi yang lebih komprehensif terhadap kemampuan masing-masing PCM dalam menurunkan beban pendinginan dan mempertahankan kestabilan temperatur rendah.

## TINJAUAN PUSTAKA

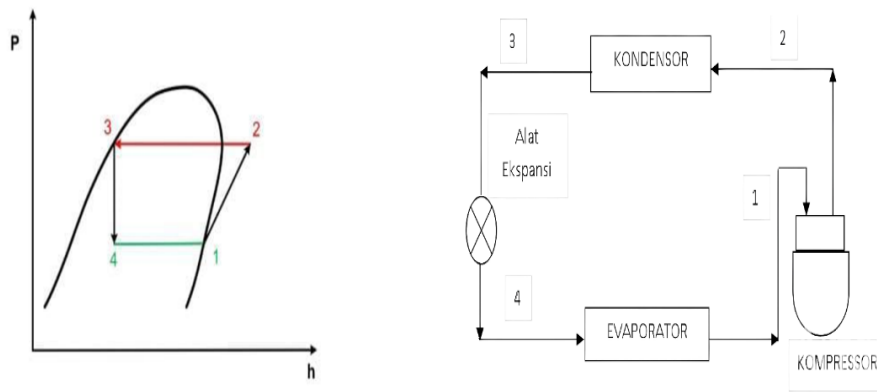
Sena dkk. [4] melakukan penelitian mengenai pemanfaatan Dry Ice Gel sebagai PCM dalam freezer rumah tangga. Hasilnya menunjukkan bahwa Dry Ice Gel mampu mempertahankan suhu dinding freezer tetap rendah, bahkan saat daya listrik diputus. Temperatur dinding dalam freezer tetap berada di bawah  $2^{\circ}\text{C}$  selama 6 jam tanpa sumber energi aktif. Penelitian ini menyoroti kemampuan PCM menyerap energi panas laten selama proses pelelehan, menjadikannya solusi penyimpanan energi pasif yang efektif

Suamir dkk. [5] melakukan studi yang menggunakan bio-PCM berbasis minyak nabati pada chest freezer menunjukkan bahwa integrasi PCM dapat mengurangi fluktuasi suhu secara signifikan. Temperatur udara dalam freezer tetap berada pada kisaran  $-18,5^{\circ}\text{C}$  hingga  $-27^{\circ}\text{C}$ , dan siklus hidup kompresor berkurang hingga 20%. Hal ini berarti penggunaan PCM dapat memperpanjang waktu operasi pasif freezer dan mengurangi konsumsi energi, karena kerja kompresor menjadi lebih efisien.

Dhahir dkk. [6] mengembangkan sistem freezer hybrid dengan kombinasi dua jenis PCM yang memiliki titik leleh berbeda. Penelitian ini menunjukkan bahwa konfigurasi multi-PCM mampu menyimpan energi dalam dua fase suhu berbeda, sehingga meningkatkan efisiensi perpindahan panas dan memperpanjang durasi stabil suhu. Hasilnya, sistem ini mengalami peningkatan Coefficient of Performance (COP) sebesar 5,43% dan penghematan energi hingga 29,65%. Hal ini membuktikan pentingnya pemilihan dan kombinasi PCM yang tepat dalam desain sistem pendingin.

### *Prinsip Kerja Freezer*

Refrigeran berfungsi sebagai media pemindah panas dalam sistem refrigerasi yang terdiri dari empat komponen utama, kompresor, kondensor, alat ekspansi, dan evaporator. Kompresor memompa refrigeran dan menciptakan perbedaan tekanan agar refrigeran dapat bersirkulasi. Kondensor mengubah refrigeran dari gas menjadi cair dengan melepaskan panas. Alat ekspansi menurunkan tekanan refrigeran sebelum masuk ke evaporator. Evaporator menyerap panas dari lingkungan, menurunkan suhu, dan mengubah refrigeran menjadi gas, yang kemudian ditarik kembali oleh kompresor untuk mengulangi siklus [7].



Gambar 1. Siklus Refrigerasi

Diagram tekanan-entalpi (P-h) merepresentasikan berbagai proses termodinamika seperti isothermal, isobarik, isentalpik, dan isentropik. Gambar 2.1 menunjukkan siklus ideal refrigerasi kompresi uap, yang terdiri dari empat tahap utama. Proses 1–2 adalah kompresi isentropik dalam kompresor, meskipun aktualnya sering menyimpang dengan efisiensi 50–70%. Energi yang dibutuhkan ditentukan oleh selisih entalpi antara titik 2 dan 1. Proses 2–3 merupakan kondensasi di kondensor, di mana refrigeran melepaskan panas dan berubah dari gas ke cair, ditandai oleh penurunan entalpi dan kecepatan aliran akibat peningkatan massa jenis. Proses 3–4 adalah ekspansi isentalpik melalui alat ekspansi (pipa kapiler atau katup), yang menyebabkan penurunan drastis tekanan dan suhu. Terakhir, proses 4–1 adalah penguapan di evaporator, di mana refrigeran menyerap panas dan berubah kembali menjadi uap, dengan selisih entalpi mencerminkan energi yang diserap dari lingkungan [8].

**Phase Change Material (PCM)**

PCM adalah material yang dapat menyerap atau melepas sejumlah besar energi dalam bentuk panas laten saat mengalami perubahan fasa pada suhu tertentu. Material ini mampu menyimpan energi termal selama proses pelelehan dan melepaskannya kembali selama proses pembekuan tanpa perubahan temperatur yang signifikan. Berdasarkan jenisnya, PCM diklasifikasikan menjadi tiga kelompok utama: organik (seperti parafin, lilin, dan minyak nabati), anorganik (garam terhidrasi), dan eutektik. Setiap jenis memiliki kelebihan dan kekurangan terkait kapasitas panas laten, konduktivitas termal, kestabilan kimia, dan harga [9].

**Konduksi Kalor**

Konduksi adalah perpindahan panas melalui kontak langsung antar permukaan, dipengaruhi oleh konduktivitas termal dan luas permukaan material. Laju perpindahan panas ini dihitung menggunakan Hukum Fourier [10].

$$q = -k A \frac{dT}{dx}$$

Atau

$$q = \frac{\Delta T}{R_{Total}}$$

Dimana:

- q = Laju perpindahan panas (Watt, W).
- k = Konduktivitas termal bahan (W/m·K).
- A = Luas penampang bahan yang dilalui panas (m<sup>2</sup>).
- $\frac{dT}{dx}$  = Gradien suhu, yaitu perubahan suhu per satuan panjang (K/m).
- R<sub>Total</sub> = Resistensi Total (K/W atau K/°C).

### ***Kalor Sensibel***

Panas sensibel adalah energi yang menyebabkan perubahan suhu suatu material tanpa mengubah fasenya. Dalam PCM, panas sensibel diserap atau dilepaskan saat terjadi perubahan suhu sebelum atau sesudah perubahan fase. Kemampuan ini menjadikan PCM efektif untuk penyimpanan panas dan pendinginan di berbagai aplikasi energi [11].

$$Q = m \cdot C_p \cdot \Delta T$$

Q = Energi kalor yang dilepas atau diterima oleh zat (J).

m = Massa zat yang mengalami perubahan temperatur (Kg).

$\Delta T$  = Perubahan temperatur yang terjadi (K).

### ***Kalor Laten***

Panas laten adalah energi yang diserap atau dilepaskan saat material mengalami perubahan fase tanpa perubahan suhu. Pada PCM, saat berubah dari padat ke cair atau sebaliknya, panas laten berpindah secara isothermal, menjaga suhu tetap stabil selama proses tersebut [11].

$$Q = m \cdot L$$

Q = Energi kalor yang dilepas atau diterima oleh suatu zat (J).

m = Massa zat yang mengalami perubahan temperatur (Kg).

L = Kalor laten spesifik (KJ/Kg).

### ***Software Desain***

#### ***Software Solidworks***

SolidWorks adalah perangkat lunak CAD 3D yang dikembangkan oleh Dassault Systèmes dan banyak digunakan dalam bidang teknik dan manufaktur untuk merancang dan menganalisis komponen serta sistem mekanik secara digital.

#### ***Software Simulasi***

1. Software CoolTools  
CoolTools adalah perangkat lunak dari Danfoss untuk simulasi dan perancangan sistem pendingin seperti freezer dan cold storage. Software ini memungkinkan pemodelan menyeluruh, mulai dari pemilihan komponen hingga analisis performa energi dan suhu dalam berbagai kondisi operasi.
2. Software Ansys  
Pada penelitian ini menggunakan perangkat lunak ANSYS untuk simulasi ANSYS (Finite Element Analysis) yang berfungsi untuk mensimulasikan pengaruh penggunaan berbagai jenis PCM terhadap distribusi temperatur pada mesin freezer. Melalui simulasi ini, perangkat lunak yang digunakan dapat menentukan pola distribusi temperatur pada mesin freezer berbasis PCM.
3. Python  
Pada penelitian ini menggunakan Python untuk mensimulasikan pengaruh penggunaan berbagai jenis PCM terhadap distribusi temperatur pada mesin freezer. Dengan Python, model fisik sistem freezer dapat direpresentasikan ke dalam bentuk matriks suhu yang diperbarui tiap interval waktu. Melalui pendekatan ini, pengaruh parameter seperti konduktivitas termal PCM, kapasitas panas, serta suhu awal terhadap distribusi suhu udara di dalam freezer dapat dianalisis secara mendalam.

## METODOLOGI

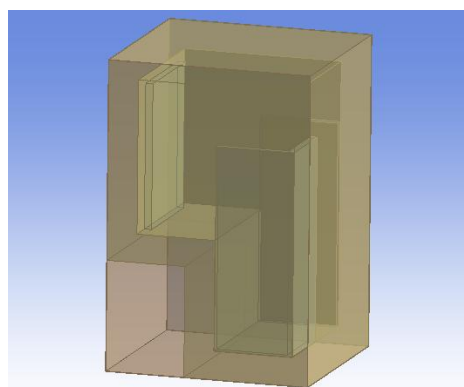
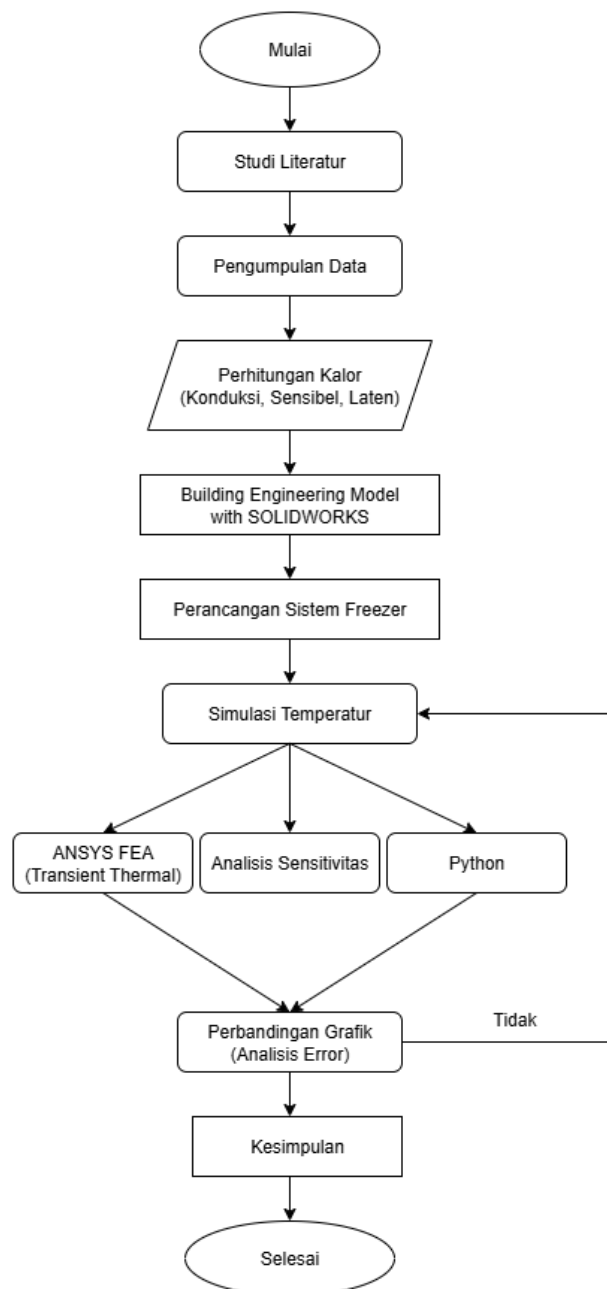
Pada penelitian ini, simulasi distribusi temperatur pada sistem freezer berbasis Phase Change Material (PCM) dilakukan menggunakan dua perangkat lunak utama, yaitu ANSYS dan Python. Pendekatan yang digunakan dalam simulasi adalah metode Elemen Hingga (Finite Element Analysis/FEA) untuk ANSYS dan metode Diferensial Parsial (Partial Differential Equation/PDE) untuk Python. Kedua metode ini memungkinkan pemodelan termal yang lebih mendalam dan akurat untuk menganalisis pengaruh berbagai jenis PCM terhadap kestabilan suhu dalam freezer.

### *Penggunaan ANSYS*

Dalam simulasi menggunakan ANSYS, sistem freezer dimodelkan dalam ruang dua dimensi (2D) untuk menggambarkan distribusi temperatur yang terjadi pada dinding dan area di dalam freezer. Untuk menghasilkan solusi numerik yang efisien, mesh yang digunakan di ANSYS memiliki ukuran elemen 2 mm x 2 mm pada area PCM dan 1 mm x 1 mm pada dinding freezer untuk meningkatkan akurasi pada area kritis. Kondisi batas pada simulasi ANSYS mencakup suhu konstan pada permukaan dinding freezer (misalnya,  $-18^{\circ}\text{C}$  pada sisi evaporator dan  $-7,4^{\circ}\text{C}$  pada sisi kabin), dengan nilai temperatur lingkungan (ambient) yang diasumsikan sebesar  $31^{\circ}\text{C}$ , mengingat kondisi tropis yang menjadi acuan. Penambahan PCM di dalam freezer disimulasikan dengan mengatur kondisi batas yang memungkinkan perubahan fase pada temperatur tertentu, sesuai dengan karakteristik masing-masing PCM.

### *Penggunaan Python*

Simulasi Python menggunakan pendekatan numerik berbasis metode beda hingga (Finite Difference Method/FDM), di mana model fisik sistem freezer diubah menjadi bentuk matriks suhu yang diperbarui setiap interval waktu. Pada simulasi Python, kondisi batas yang digunakan adalah nilai temperatur di dinding freezer dan di dalam kabin freezer yang tetap konstan sepanjang waktu simulasi, dengan suhu lingkungan eksternal juga diatur menjadi  $31^{\circ}\text{C}$ . Selain itu, pada model ini, asumsinya adalah distribusi temperatur awal (initial condition) di seluruh ruang freezer adalah  $25^{\circ}\text{C}$ , sesuai dengan kondisi awal saat sistem mulai beroperasi. Ukuran grid pada simulasi Python diatur agar sesuai dengan parameter geometris sistem freezer, dengan resolusi 0,01 m di sepanjang dimensi x dan y untuk memastikan kestabilan perhitungan.

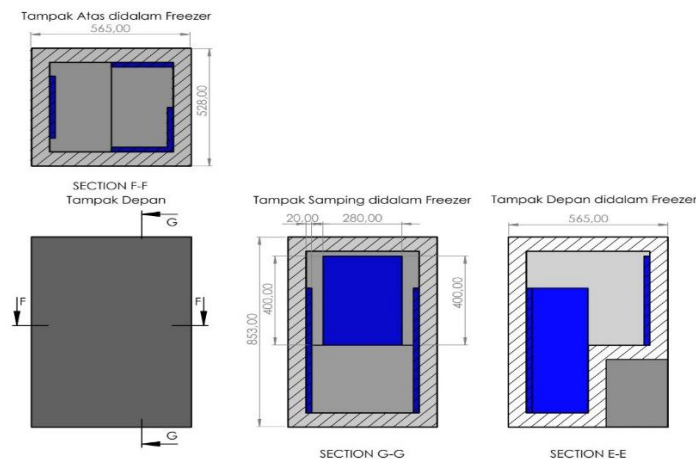


Gambar 2. Desain 3D Freezer

Gambar 2. menunjukkan rancangan tiga dimensi freezer yang digunakan sebagai dasar visualisasi sistem pada penelitian ini. Pada gambar tersebut ditunjukkan posisi ruang penyimpanan, susunan lapisan dinding, evaporator, serta lokasi penempatan PCM di bagian dinding dalam freezer yang berdekatan dengan evaporator. Penempatan PCM pada posisi ini bertujuan agar material mampu menyerap energi dingin selama siklus pendinginan berlangsung, kemudian

melepaskannya kembali secara bertahap ketika temperatur mulai naik. Dengan demikian, keberadaan PCM diharapkan dapat membantu menjaga kestabilan suhu di dalam ruang freezer dan mengurangi fluktuasi temperatur selama operasi sistem.

Selain berfungsi sebagai ilustrasi rancangan sistem, gambar ini juga menjadi acuan dalam penyusunan domain simulasi termal pada ANSYS dan Python. Setiap komponen yang tergambar memiliki fungsi spesifik dalam analisis, yaitu dinding sebagai jalur perpindahan panas dari lingkungan luar, evaporator sebagai sumber pendinginan utama, dan PCM sebagai media penyimpanan energi termal laten. Oleh karena itu, desain 3D ini penting untuk menjelaskan keterkaitan antara struktur fisik freezer dengan model matematis dan numerik yang digunakan pada penelitian.



Gambar 3. Teknik Freezer

Gambar 3. menampilkan gambar teknik freezer yang memuat dimensi utama sistem, seperti panjang, lebar, tinggi, serta ketebalan setiap lapisan material penyusun dinding freezer. Informasi geometris ini digunakan sebagai dasar dalam penentuan domain komputasi pada simulasi numerik. Dimensi freezer sangat berpengaruh terhadap luas penampang perpindahan panas, ketebalan resistansi termal, serta distribusi temperatur pada ruang pendingin. Oleh karena itu, gambar teknik ini tidak hanya berfungsi sebagai pelengkap visual, melainkan juga sebagai dasar perhitungan dalam model perpindahan panas yang digunakan.

Melalui gambar teknik ini, pembaca dapat memahami bagaimana konfigurasi geometris freezer diterjemahkan ke dalam model dua dimensi yang digunakan pada ANSYS dan Python. Penggunaan dimensi yang sama pada kedua platform simulasi bertujuan agar hasil yang diperoleh dapat dibandingkan secara konsisten. Dengan demikian, gambar teknik freezer menjadi elemen penting dalam memastikan bahwa proses simulasi dilakukan berdasarkan parameter geometris yang terukur dan dapat direplikasi oleh peneliti lain.

## HASIL DAN PEMBAHASAN

### *Perancangan Sistem Freezer*

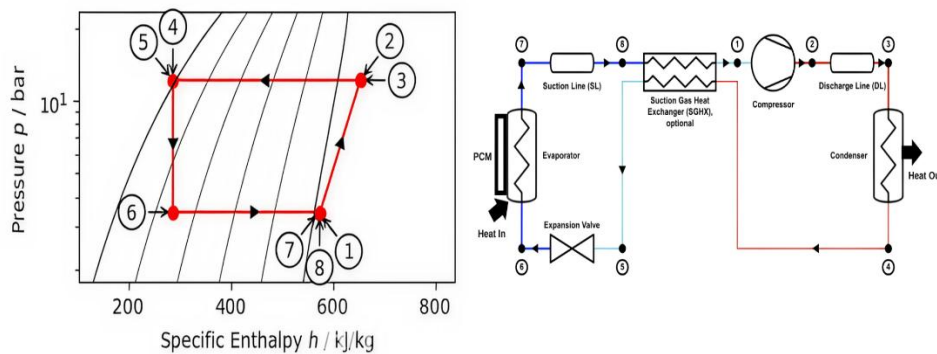
#### *Spesifikasi Sistem Freezer*

Tabel 1. menyajikan data input utama untuk perancangan sistem refrigerasi menggunakan CoolTools. Sistem menggunakan pendinginan langsung dengan evaporator di dalam kabin, pada suhu evaporasi  $-18^{\circ}\text{C}$  dan suhu kabin  $-7,4^{\circ}\text{C}$ . Suhu penyimpanan produk ditetapkan  $-2^{\circ}\text{C}$ , menunjukkan adanya kontrol sirkulasi udara untuk menjaga suhu stabil tanpa kontak langsung dengan evaporator. Suhu kondensasi  $40^{\circ}\text{C}$  mencerminkan kondisi tropis sebagai acuan tekanan kondensasi. Refrigeran R134a dipilih karena stabil, tidak korosif, dan memiliki karakteristik termodinamika yang sesuai. Data ini digunakan sebagai dasar dalam perhitungan siklus, pemilihan komponen, dan evaluasi performa sistem.

Tabel. 1 Data Input Rancangan Sistem Refrigerasi.

Data	Keterangan
Temperatur Kabin	-7,4°C
Temperatur Evaporasi	-18°C
Temperatur Kondensasi	40°C
Temperatur Penyimpanan Produk	-2°C
Refrigeran	R134a

State	T (°C)	p (bar)	h (KJ/Kg)	s (KJ/Kg.K)	ṁ (Kg/s)
State 1	-10	1,416	394,46	1,7670	0,0685
State 2	68,58	10,303	450,03	1,8037	0,0685
State 3	68,37	10,166	450,03	1,8047	0,0685
State 4	34	10,166	247,53	1,1618	0,0685
State 5	34	10,166	247,53	1,1618	0,0685
State 6	-18	1,446	247,53	1,1899	0,0685
State 7	-11	1,446	393,55	1,7618	0,0685
State 8	-10	1,416	394,46	1,7670	0,0685



Gambar 4. Perancangan Sistem Freezer

Pada gambar 4. menunjukkan perancangan sistem freezer berbasis Phase Change Material (PCM) yang dikombinasikan dengan siklus kompresi uap sebagai sistem pendingin utama. Sistem ini dirancang dengan delapan titik keadaan (state 1 hingga state 8) yang digambarkan dalam diagram tekanan-entalpi (p-h), serta memanfaatkan PCM sebagai media penyimpan energi termal laten. Penggunaan PCM ditempatkan strategis pada dinding bagian dalam freezer, berdekatan langsung dengan evaporator, sehingga memungkinkan proses serapan panas dari udara dingin secara efektif untuk menjaga kestabilan suhu ruang penyimpanan, terutama saat siklus refrigerasi berhenti sementara (off-cycle). Aliran massa refrigeran ditetapkan sebesar 0,0685 kg/s, dan menjadi dasar dalam perhitungan energi di setiap titik keadaan sistem.

Siklus dimulai dari state 1, yaitu kondisi refrigeran setelah keluar dari suction gas heat exchanger dengan suhu -10°C, tekanan 1,416 bar, entalpi 394,46 kJ/kg, dan berada dalam fase gas jenuh. Selanjutnya pada state 2, refrigeran dikompresi secara adiabatik di kompresor hingga mencapai suhu tinggi 68,58°C dan tekanan 10,303 bar, dengan entalpi meningkat menjadi 450,03 kJ/kg, menunjukkan kondisi superheated gas. Pada state 3, terjadi sedikit penurunan tekanan menjadi 10,166 bar karena kehilangan tekanan pada pipa discharge, namun nilai entalpi tetap, menandakan tidak adanya pertukaran panas.

Refrigeran kemudian memasuki kondensor, dan diubah menjadi cairan jenuh pada state 4 dengan suhu turun ke 34°C dan entalpi menurun drastis menjadi 247,53 kJ/kg. Kondisi ini tetap sama pada state 5, sebelum melewati katup ekspansi, tempat terjadi penurunan tekanan dan suhu secara drastis tanpa perubahan entalpi (proses isenthalpik), menuju state 6 dengan suhu -18°C dan tekanan 1,446 bar. Cairan dingin ini kemudian melewati evaporator, tempat utama proses pendinginan terjadi. Di sinilah PCM yang berada di sekitar evaporator menyerap panas dari udara dingin dan menyimpan energi dalam bentuk laten saat terjadi perubahan fase. Pada state 7, refrigeran kembali ke fase gas jenuh dengan suhu -11°C dan entalpi 393,55 kJ/kg, kemudian melewati suction line dan ditingkatkan suhunya sedikit melalui SGHX menjadi -10°C di state 8, sebelum kembali ke kompresor untuk memulai siklus baru.

Tabel 2. Menyajikan Hasil Perhitungan Termodinamika Sistem Refrigerasi

Data	Keterangan
h1	394,46 KJ/Kg
h2	450,03 KJ/Kg
h3/h4	247,53 KJ/Kg
COP <sub>Aktual</sub>	2,3646
COP <sub>Carnot</sub>	4,3991
Efisiensi	53,74%
Kerja Kompresi	3,807 kW
Efek Refrigerasi	10,07 kW
Efek Kondensasi	13,87 kW

Tabel 2. menyajikan hasil perhitungan termodinamika sistem refrigerasi. Enthalpi meningkat dari 394,46 kJ/kg ( $h_1$ ) menjadi 450,03 kJ/kg ( $h_2$ ) setelah kompresi, dan turun drastis menjadi 247,53 kJ/kg ( $h_3/h_4$ ) setelah kondensasi. Efek refrigerasi yang dihasilkan adalah 10,07 kW dengan kerja kompresor sebesar 3,807 kW. Nilai Coefficient of Performance (COP) aktual tercatat 2,36, atau sekitar 53,74% dari COP Carnot (4,40), menunjukkan efisiensi sistem lebih dari setengah idealnya. Efek kondensasi sebesar 13,87 kW menunjukkan pelepasan panas yang stabil ke lingkungan, dengan sistem bekerja cukup seimbang namun masih berpeluang ditingkatkan melalui optimasi.

$$\begin{aligned}
 W_{\text{Kompresor}} &= \dot{m} \times (h_2 - h_1) \\
 &= 0,0685 \times (450,03 - 394,46) \\
 &= 3,806545 \text{ kW} \\
 Q_{\text{Kondensor}} &= \dot{m} \times (h_2 - h_3) \\
 &= 0,0685 \times (450,03 - 247,53) \\
 &= 13,87125 \text{ kW} \\
 Q_{\text{Evaporator}} &= \dot{m} \times (h_1 - h_4) \\
 &= 0,0685 \times (394,46 - 247,53) \\
 &= 10,064705 \text{ kW} \\
 Q_{\text{Katup Ekspansi}} &= \dot{m} \times (h_4 - h_3) \\
 &= 0,0685 \times (247,53 - 247,53) \\
 &= 0 \text{ kW}
 \end{aligned}$$

Energi kompresi refrigeran tercatat sebesar 3,81 kW, sedangkan energi panas yang dilepaskan di kondensor mencapai 13,87 kW. Refrigeran menyerap panas dari ruang beku melalui evaporator sebesar 10,06 kW. Proses ekspansi berlangsung isenthalpik, sehingga tidak menghasilkan atau menyerap energi panas (0 kW). Data ini mencerminkan keseimbangan energi dalam sistem dan menunjukkan efisiensi kerja komponen utama siklus refrigerasi.

### **Perhitungan Beban Pendingin**

Beban pendingin terdiri dari beberapa komponen, yaitu beban infiltrasi, beban dinding dan PCM, serta beban produk yang disimpan dalam freezer [12].

**Beban Infiltrasi**

$$Q_{Infiltrasi} = \rho \cdot V \cdot C_p \cdot (T_{Luar} - T_{Dalam})$$

Q = Laju aliran panas infiltrasi (W)

$\rho$  = Massa jenis udara (Kg/m<sup>3</sup>)

V = Laju volume aliran udara yang masuk (m<sup>3</sup>/s)

C<sub>p</sub> = Kapasitas panas spesifik udara (J/Kg.K)

T<sub>Luar</sub> = Temperatur udara luar (°C atau K)

T<sub>Dalam</sub> = Temperatur udara dalam (°C atau K)

**Perhitungan Beban Infiltrasi pada Freezer dengan PCM Dry Ice Gel**

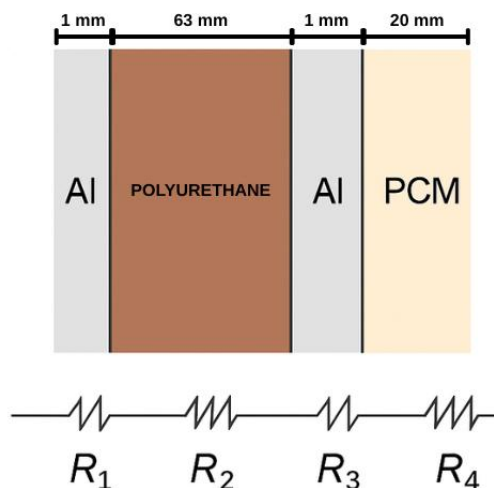
$$Q_{Infiltrasi} = 0 \text{ W}$$

Selama proses pengujian sistem refrigerasi, freezer dipastikan berada dalam kondisi tertutup sepenuhnya tanpa adanya pembukaan pintu maupun celah yang memungkinkan pertukaran udara dengan lingkungan luar. Dengan kondisi tersebut, tidak terjadi perpindahan massa berupa aliran udara dari luar ke dalam atau sebaliknya. Oleh karena itu, panas yang masuk ke dalam ruang freezer akibat infiltrasi udara dari lingkungan luar dapat dianggap nol. Nilai ini menunjukkan bahwa tidak terdapat kontribusi beban panas dari mekanisme infiltrasi, sehingga beban pendinginan total hanya ditentukan oleh faktor lain seperti konduksi panas melalui dinding freezer, dan beban internal. Asumsi ini penting dalam menyederhanakan model perhitungan dan memberikan hasil yang lebih terkontrol selama pengujian performa sistem pendingin.

**Beban Dinding+PCM**

Tabel 3. Data Lapisan Dinding Freezer

Keterangan	Material	Ketebalan (mm)
Al	Aluminium	1
POLYURETHANE	Polyurethane	63
PCM	Phase Change Material	20



Gambar 5. Lapisan Dinding Freezer

Beban panas yang masuk melalui dinding dihitung dengan rumus:

$$Q_{Dinding} + Q_{PCM} = \frac{(T_{Luar} - T_{Dalam})}{R_{Total}}$$

Q = Konduksi Kalor (W)

$\Delta T$  = Selisih Temperatur (K)

R<sub>Total</sub> = Resistensi Total (W)

Resistensi pada setiap lapisan dapat dihitung dengan rumus:

$$R = \frac{L}{k.A}$$

R = Resistensi (W)

L = Ketebalan (m)

K = Konduktivitas Termal Material (W/m.K)

A = Luas Penampang (m<sup>2</sup>)

**Perhitungan Resistensi Lapisan Freezer dengan PCM Dry Ice Gel**

$$R_{Aluminium} = \frac{0,001}{202,4 \times 1,5} = 0,000003296 \text{ W}$$

$$R_{Polyurethane} = \frac{0,063}{0,023 \times 1,5} = 1,826 \text{ W}$$

$$R_{Aluminium} = \frac{0,001}{202,4 \times 1,5} = 0,000003296 \text{ W}$$

$$R_{PCM} = \frac{0,02}{1,9 \times 0,024} = 0,047 \text{ W}$$

$$R_{Total} = 0,000003296 \text{ W} + 1,826 \text{ W} + 0,000003296 \text{ W} + 0,047 \text{ W}$$

$$= 1,873006592 \text{ W}$$

**Perhitungan Beban Dinding + PCM pada PCM Dry Ice Gel**

Keterangan:

TLuar = 31°C

TDalam = -7,4°C

RTotal = 1,873006592 W

$$Q_{Dinding} + Q_{PCM} = \frac{(31 - (-7,4))}{1,873006592} = 20,502 \text{ W}$$

Nilai Q sebesar 20,502 W merepresentasikan laju perpindahan panas melalui dinding freezer berlapis aluminium, polyurethane, dan PCM Dry Ice Gel. PCM menyerap sebagian panas melalui perubahan fasa, sehingga membantu menstabilkan suhu dalam freezer dan mengurangi beban langsung pada sistem pendingin. Tanpa PCM, panas akan lebih cepat meningkatkan suhu udara dan produk di dalam freezer.

**Beban Produk**

Tabel 4. Data Termofisika Produk.

Produk	Massa (Kg)	CpCair (Kj/Kg.C)	CpBeku (Kj/Kg.C)	Kalor Laten Fusi (Kj/Kg)	TBeku (C)
Ikan Lele	1	3,52	1,9	250	-1,5
Ayam	1	2,93	1,8	230	-1,8
Daging Sapi	1	3,05	1,9	245	-2
Udang	1	3,7	1,8	230	-1,5

Perhitungan Beban Produk pada PCM Dry Ice Gel

$$Q_{Produk} = \frac{m_{Produk} [CpCair (T_{Awal} - T_{Akhir}) + LF + CpBeku (T_{Beku} - T_{Akhir})]}{t}$$

Dry Ice Gel (Daging Sapi)

$$Q_{\text{Produk}} = \frac{1 [3,05 (25,1 - (-2)) + 245 + 1,9 (-2 - (-23,2))]}{43200} = \frac{367,94}{43200} = 0,00852 \text{ Kj/s}$$

$$= 8,52 \text{ J/s atau W}$$

Nilai  $Q_{\text{Produk}}$  sebesar 8,52 W menunjukkan energi yang dibutuhkan untuk menurunkan suhu daging sapi dari 25,1°C ke -23,2°C. Energi ini diserap oleh sistem pendingin dan PCM, di mana Dry Ice Gel membantu menyerap sebagian besar beban melalui perubahan fasa, sehingga meningkatkan stabilitas dan efisiensi kerja freezer.

### **Beban Total**

*Perhitungan Beban Total pada PCM Dry Ice Gel*

$$Q_{\text{Total}} = Q_{\text{Infiltrasi}} + (Q_{\text{Dinding}} + Q_{\text{PCM}}) + Q_{\text{Produk}}$$

$$\text{Dry Ice Gel} = 0 \text{ W} + 20,502 \text{ W} + 8,52 \text{ W} = 29,022 \text{ W}$$

Berdasarkan perhitungan, total beban panas ( $Q_{\text{Total}}$ ) pada sistem penyimpanan dengan PCM Dry Ice Gel adalah 29,022 W, terdiri dari beban dinding (30,75 W), beban produk (367,94 W), dan beban infiltrasi sebesar 0 W karena sistem tertutup rapat. Beban terbesar berasal dari produk, menunjukkan kontribusi dominan terhadap total beban termal. Penambahan Dry Ice Gel berperan dalam menyerap sebagian panas dari lingkungan, membantu menstabilkan suhu dalam ruang penyimpanan.

Tabel 5. Hasil Perhitungan Beban Pendinginan

Jenis PCM	$Q_{\text{Infiltrasi}}$ (W)	$Q_{\text{Dinding}} + Q_{\text{PCM}}$ (W)	$Q_{\text{Produk}}$ (W)	$Q_{\text{Total}}$ (W)
Dry Ice Gel	0	20,502	8,52	29,022
Liquid Komersial	0	16,499	6,46	22,959
Minyak Kelapa Sawit	0	24,104	5,18	29,284
Lilin	0	18,57	18,33	36,9
Garam 20	0	24,736	6,23	30,966
Garam 36,4	0	22,866	10,62	33,486
Air Biasa	0	16,913	6,46	23,373

Tabel 5. menunjukkan total beban panas ( $Q_{\text{Total}}$ ) sistem freezer dengan berbagai jenis PCM, yang terdiri dari beban dinding + PCM, beban produk, dan infiltrasi (diasumsikan nol). Lilin menghasilkan beban tertinggi (36,9 W) akibat beban produk yang besar, sedangkan liquid komersial menunjukkan performa terbaik dengan beban terendah (22,959 W), diikuti oleh air biasa (23,373 W). Dry Ice Gel dan minyak sawit memiliki beban sedang, sementara garam 20 dan garam 36,4 menunjukkan performa termal kurang optimal. Hasil ini menegaskan bahwa efisiensi PCM bergantung pada kombinasi konduktivitas termal, kapasitas panas laten, dan stabilitas suhu transisi, di mana liquid komersial dan air biasa paling efektif mereduksi beban pendinginan.

### **Kalor Konduksi**

Kalor yang masuk melalui dinding disebut kalor konduksi karena perpindahan panas melalui benda padat dan dapat dihitung dengan rumus [10]:

$$q = \frac{\Delta T}{R_{\text{Total}}}$$

$q$  = Konduksi Kalor (W)

$\Delta T$  = Selisih Temperatur (K)

$R_{\text{Total}}$  = Resistensi Total (W)

Resistensi pada setiap lapisan dapat dihitung dengan rumus:

$$R = \frac{L}{k.A}$$

R = Resistensi (W)

L = Ketebalan (m)

k = Konduktivitas Termal Material (W/m.K)

A = Luas Penampang Material (m<sup>2</sup>)

### ***Perhitungan Beban Dinding + PCM pada PCM Dry Ice Gel***

$$R_{\text{Aluminium}} = \frac{0,001}{202,4 \times 1,5} = 0,000003296 \text{ W}$$

$$R_{\text{Polyurethane}} = \frac{0,063}{0,023 \times 1,5} = 1,826 \text{ W}$$

$$R_{\text{Aluminium}} = \frac{0,001}{202,4 \times 1,5} = 0,000003296 \text{ W}$$

$$R_{\text{PCM}} = \frac{0,02}{1,9 \times 0,024} = 0,047 \text{ W}$$

$$R_{\text{Total}} = 0,000003296 \text{ W} + 1,826 \text{ W} + 0,000003296 \text{ W} + 0,047 \text{ W}$$

$$= 1,873006592 \text{ W}$$

Laju Perpindahan Panas:

Keterangan:

$$T_{\text{Luar}} = 31^{\circ}\text{C}$$

$$T_{\text{Dalam}} = -7,4^{\circ}\text{C}$$

$$R_{\text{Total}} = 1,873006592 \text{ W}$$

$$q = \frac{\Delta T}{R_{\text{total}}} = \frac{31 - (-7,4)}{1,873006592} = 20,502 \text{ W}$$

Laju perpindahan panas melalui dinding freezer sebesar 20,502 W, dihitung dari selisih suhu luar (31°C) dan dalam (-7,4°C) sebesar 38,4°C serta resistansi termal total dinding sebesar 1,873. Nilai ini mencerminkan beban panas konduksi yang signifikan dan menjadi komponen utama dalam analisis beban termal pada freezer berbasis PCM.

### ***Kalor Sensibel***

*Contoh Perhitungan Panas Sensibel pada PCM Dry Ice Gel*

$$Q_s \text{ Sebelum} = m \cdot C_p \text{ Cair} \cdot (T_{\text{Awal}} - T_{\text{Beku}})$$

$$Q_s \text{ Sebelum} = 1,12 \times 4024 \times (25,1 - (-5)) = 135.657,09 \text{ J/Kg.K}$$

$$Q_s \text{ Setelah} = m \cdot C_p \text{ Beku} \cdot (T_{\text{Beku}} - T_{\text{Akhir}})$$

$$Q_s \text{ Setelah} = 1,12 \times 1787 \times (-5 - (-23,2)) = 36.426,21 \text{ J/Kg.K}$$

Perhitungan panas sensibel PCM Dry Ice Gel menunjukkan energi sebesar 135.657,09 J dibutuhkan untuk menaikkan suhu dari -5°C ke 25,1°C (fase cair), dan 36.426,21 J dilepaskan saat suhu turun dari -5°C ke -23,2°C (fase beku). Energi ini mencerminkan kontribusi PCM di luar proses perubahan fase, penting dalam analisis termal sistem pendingin berbasis PCM.

**Kalor Laten**

$$Q = m \cdot L$$

$$Q = 1,064 \times 507952 = 540.460,93 \text{ J/Kg}$$

Perhitungan menunjukkan bahwa PCM dengan massa 1,064 kg dan kalor laten 507.952 J/kg menyerap energi laten sebesar 540.460,93 J selama perubahan fase dari cair ke padat. Energi ini diserap tanpa perubahan suhu dan berperan penting dalam menjaga kestabilan suhu freezer. Nilai kalor laten yang tinggi mencerminkan kapasitas penyimpanan energi PCM yang efektif untuk aplikasi penyimpanan termal.

Tabel 6. Hasil Perhitungan Kalor Konduksi, Sensibel, dan Laten.

Jenis PCM	Konduksi	Kalor Sensibel	Kalor Laten	Kalor Sensibel
	Kalor (W)	Sebelum (J/Kg.K)	(J/Kg)	Setelah (J/Kg.K)
<b>Dry Ice Gel</b>	20,502	135.657,09	540.460,93	36.426,21
<b>Liquid Komersial</b>	16,499	28.355,71	186.200	1.552,32
<b>Garam 20</b>	24,736	48.503,84	335.553,68	49.410,9
<b>Lilin</b>	18,57	7.637,76	178.752	81.124,68
<b>Minyak Kelapa Sawit</b>	24,104	-61.460,1	110.124	101.290,2
<b>Garam 36,4</b>	22,866	156.602,25	323.136,8	-4.564
<b>Air Biasa</b>	16,913	45.186,1	354.844	8.034

Tabel 6. menunjukkan karakteristik termal berbagai jenis PCM berdasarkan konduksi kalor, kalor sensibel, dan kalor laten. Dry Ice Gel memiliki performa terbaik dengan kalor laten tertinggi (540.460,93 J/kg) dan kalor sensibel signifikan sebelum dan sesudah fase. Liquid Komersial memiliki kapasitas termal terendah. Garam 20 menunjukkan keseimbangan performa dengan konduktivitas tertinggi (24,736 W) dan kalor laten sedang. Lilin dan Minyak Sawit memiliki kalor sensibel tinggi setelah fase, namun kalor laten rendah. Nilai negatif pada Minyak Sawit dan Garam 36,4 mengindikasikan kemungkinan anomali data atau pelepasan panas berlebih. Air Biasa menunjukkan performa moderat. Hasil ini menegaskan bahwa setiap PCM memiliki karakteristik unik sesuai kebutuhan sistem pendingin.

**Model Distribusi Temperatur Dua Dimensi (2D)**

Distribusi temperatur dalam sistem freezer dimodelkan menggunakan persamaan diferensial parsial (PDE) dua dimensi berikut [10]:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right)$$

Keterangan :

- T = suhu (°C)
- t = waktu (s)
- K = konduktivitas termal (W/m·K)
- $\rho$  = massa jenis (kg/m<sup>3</sup>)
- C<sub>p</sub> = kalor jenis (J/kg·K)
- T(x,y,z) = Suhu pada titik (x,y) dan waktu t.
- a, b = Panjang dan Lebar domain ruang
- J<sub>nm</sub> = Koefisien Fourier yang bergantung pada kondisi awal.
- $\mu$  = Konstanta yang menggabungkan difusivitas termal sistem.

Persamaan ini memungkinkan prediksi distribusi temperatur di setiap titik dalam sistem sebagai fungsi waktu dan posisi.

**Persamaan Umum Transfer Konduksi 2D Transien**

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right)$$

$$T(x,y,t) = A(x)B(y)C(t)$$

Substitusikan,

$$A(x)B(y)\frac{\partial C(t)}{\partial t} = \alpha \left( B(y)C(t)\frac{\partial^2 A}{\partial x^2} + A(x)C(t)\frac{\partial^2 B}{\partial y^2} \right)$$

Kedua sisi persamaan akan dibagi dengan A(x) B(y) C(t)

$$\frac{1}{C(t)} \frac{\partial C(t)}{\partial t} = \alpha \left( \frac{1}{A(x)} \frac{\partial^2 A}{\partial x^2} + \frac{1}{B(y)} \frac{\partial^2 B}{\partial y^2} \right) = -\mu^2$$

Dengan demikian, pengelompokkan variabel selesai. Setelah itu lakukan pemisahan variabel.

$$\frac{1}{C(t)} \frac{\partial C(t)}{\partial t} = -\mu^2$$

$$\alpha \left( \frac{1}{A(x)} \frac{\partial^2 A}{\partial x^2} + \frac{1}{B(y)} \frac{\partial^2 B}{\partial y^2} \right) = -\mu^2$$

Pemisahan variabel selesai.

Solusi umum C(t)

$$C(t) = De^{-\mu^2 t}$$

Solusi umum A(x) dan B(y)

$$\left( \frac{1}{A(x)} \frac{\partial^2 A}{\partial x^2} + \frac{1}{B(y)} \frac{\partial^2 B}{\partial y^2} \right) = \frac{-\mu^2}{\alpha}$$

Asumsikan variabel baru  $K_x$  dan  $K_y$

$$K_x^2 + K_y^2 = \frac{-\mu^2}{\alpha}$$

$$\frac{1}{A(x)} \frac{\partial^2 A}{\partial x^2} = K_x^2$$

$$A(x) = E \cos(K_x x) + F \sin(K_x x)$$

$$\frac{1}{B(y)} \frac{\partial^2 B}{\partial y^2} = K_y^2$$

$$B(y) = G \cos(K_y y) + H \sin(K_y y)$$

Kondisi batas

$$T(0,y,t) = T(a,y,t) = T(x,0,t) = T(x,b,t) = 0$$

$$T(0,y,t) = A(0) B(y) C(t)$$

$$A(0) = E \cos(0) + F \sin(0) = 0$$

$$E = 0$$

$$A(x) = F \sin(K_x x)$$

$$T(a, y, t) = A(a) B(y) C(t) = 0$$

$$A(a) = F \sin(K_x a) = 0$$

$$K_x = \frac{n\pi}{a}$$

Dimana  $n = 1, 2, 3, \dots$  (bilangan bulat)

$$T(x, 0, t) = A(x) B(0) C(t) = 0$$

$$B(0) = G \cos(0) + H \sin(0) = 0$$

$$G = 0$$

$$B(y) = H \sin(K_y y)$$

$$T(x, b, t) = A(x) B(b) C(t) = 0$$

$$B(b) = H \sin(K_y b) = 0$$

$$K_y = \frac{m\pi}{b}$$

Dimana  $m = 1, 2, 3, \dots$

$$T(x, y, t) = \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=1}^{\infty} J_{nm} \sin\left(\frac{n\pi}{a} x\right) \sin\left(\frac{m\pi}{b} y\right) e^{-\mu^2 t}$$

$$J_{nm} = D.F.H$$

$$\mu_{nm}^2 = \alpha \left( \left( \frac{n\pi}{a} \right)^2 + \left( \frac{m\pi}{b} \right)^2 \right)$$

Kondisi awal

$$T(x, y, 0) = F(x, y)$$

$$F(x, y) = \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=1}^{\infty} J_{nm} \sin\left(\frac{n\pi}{a} x\right) \sin\left(\frac{m\pi}{b} y\right)$$

Deret Fourier Ganda

$$J_{nm} = \frac{4}{ab} \int_0^a \int_0^b F(x, y) \sin\left(\frac{n\pi}{a} x\right) \sin\left(\frac{m\pi}{b} y\right) dx dy$$

Diketahui :

$$k = 1,9 \text{ W/m.K}$$

$$\rho = 1000 \text{ Kg/m}^3$$

$$C_p = 1787 \text{ J/Kg.K}$$

$$t = 48600 \text{ s}$$

$$a = 0,563 \text{ m}$$

$$b = 0,526 \text{ m}$$

$$F(x, y) = 25 \sin(\pi x) \sin(\pi y)$$

### ***Perhitungan Persamaan Diferensial Parsial 2D pada Domain Freezer Berbasis PCM Dry Ice Gel***

Diketahui:

$$k = 1,9 \text{ W/m.K}$$

$$\rho = 1000 \text{ Kg/m}^3$$

$$C_p = 1787 \text{ J/Kg}\cdot\text{K}$$

$$t = 48600 \text{ s}$$

$$a = 0,563 \text{ m}$$

$$b = 0,526 \text{ m}$$

$$F(x,y) = 25 \sin(\pi x) \sin(\pi y)$$

$$T(x,y,t) = \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=1}^{\infty} J_{nm} \sin\left(\frac{n\pi}{a}x\right) \sin\left(\frac{m\pi}{b}y\right) e^{-\mu^2 t}$$

$$\mu_{nm}^2 = \alpha \left( \left(\frac{n\pi}{a}\right)^2 + \left(\frac{m\pi}{b}\right)^2 \right)$$

$$\begin{aligned} \mu_{nm}^2 &= \frac{1,9}{1000 \times 1787} \left( \left(\frac{1\pi}{0,563}\right)^2 + \left(\frac{1\pi}{0,26}\right)^2 \right) \\ &= 1,063 \times 10^{-6} ((31,14) + (35,67)) \\ &= 1,063 \times 10^{-6} (66,81) \\ &= 0,00007106 \end{aligned}$$

$$J_{nm} = \frac{4}{ab} \int_0^a \int_0^b F(x,y) \sin\left(\frac{n\pi}{a}x\right) \sin\left(\frac{m\pi}{b}y\right) dx dy$$

$$J_{11} = \frac{4}{0,563 \times 0,526} \int_0^{0,563} \int_0^{0,526} \sin\left(\frac{\pi}{0,563}x\right) \sin\left(\frac{\pi}{0,526}y\right) \sin\left(\frac{\pi}{0,563}x\right) \sin\left(\frac{\pi}{0,526}y\right) dx dy = 25$$

$$\text{Jadi } T(x,y,t) = 25 \sin\left(\frac{\pi}{0,563}x\right) \sin\left(\frac{\pi}{0,526}y\right) e^{-0,00007106 \times t}$$

$$T(x,y,48600) = 25 \sin\left(\frac{\pi}{0,563}x\right) \sin\left(\frac{\pi}{0,526}y\right) e^{-0,00007106 \times 48600}$$

$$T(0,282, 0,263, 48600) = 25 \sin\left(\frac{\pi}{0,563}0,282\right) \sin\left(\frac{\pi}{0,526}0,263\right) e^{-0,00007106 \times 48600}$$

$$T(0,282, 0,263, 48600) = 25 \sin(1,574) \sin(1,553) e^{-3,453516}$$

$$\begin{aligned} T(0,282, 0,263, 48600) &= 25 \times 0,9999948 \times 0,99984 \times 0,03163 \\ &= 0,791 \text{ } ^\circ\text{C} \end{aligned}$$

Simulasi distribusi temperatur PCM Dry Ice Gel menggunakan persamaan diferensial parsial 2D transien menunjukkan penurunan suhu signifikan dalam 48.600 detik. Dengan parameter material:  $k = 1,9 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ ,  $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$ , dan  $C_p = 1787 \text{ J/kg}\cdot\text{K}$ , serta fungsi suhu awal  $f(x,y) = 25\sin(\pi x)\sin(\pi y)$ , diperoleh temperatur  $0,791 \text{ } ^\circ\text{C}$  pada titik tengah domain ( $x = 0,282 \text{ m}$ ,  $y = 0,263 \text{ m}$ ). Hasil ini mencerminkan efektivitas Dry Ice Gel dalam menyerap dan menyimpan energi melalui mekanisme konduksi panas 2D.

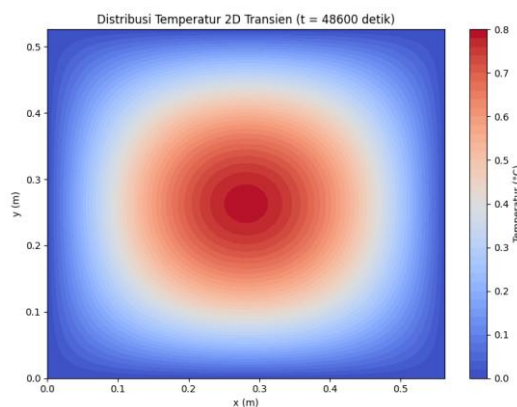
**Tabel 7.** Hasil Perhitungan Persamaan Diferensial Parsial 2D Transien

Jenis PCM (Produk)	T(x,y,z)
Dry Ice Gel	0,791
Liquid Komersial	5,62
Garam 20	22,7
Lilin	26,88
Minyak Kelapa Sawit	-4,52
Garam 36,4	6,82
Air Biasa	0,8

Tabel 7. menunjukkan hasil simulasi temperatur akhir T(x,y,z) untuk berbagai jenis PCM menggunakan penyelesaian numerik 2D transien. Dry Ice Gel dan air biasa menunjukkan performa terbaik dengan temperatur akhir mendekati 0,8°C. Liquid Komersial mencapai 5,62°C, sementara garam 20 dan garam 36,4 masing-masing 22,7°C dan 6,82°C. Lilin menunjukkan performa terburuk dengan 26,88°C. Sebaliknya, minyak kelapa sawit menunjukkan temperatur akhir -4,52°C, menandakan kemampuannya menjaga suhu sangat rendah. Hasil ini menegaskan pentingnya pemilihan PCM berdasarkan karakteristik termal yang sesuai kebutuhan sistem.

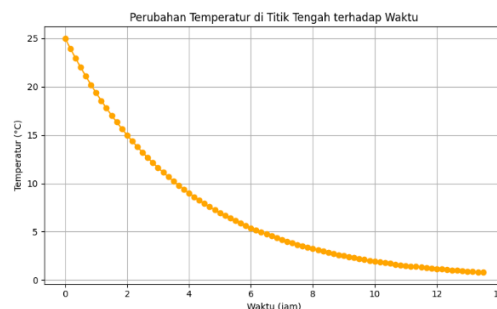
**Hasil Simulasi Python Persamaan Diferensial Parsial (PDE) 2D**

*Dry Ice Gel*



Gambar 6. Distribusi Temperatur Freezer 2D dengan PCM Dry Ice Gel

Gambar 6. menunjukkan simulasi distribusi temperatur 2D transien pada sistem freezer dengan PCM Dry Ice Gel setelah 48.600 detik (±13,5 jam). Suhu tertinggi (0,8 °C) terjadi di bagian tengah domain, sedangkan tepi lebih dingin karena kontak langsung dengan dinding freezer bersuhu tetap. Arah perpindahan panas dari tengah ke tepi menunjukkan karakteristik pendinginan transien. Dry Ice Gel menyerap panas secara laten, menjaga suhu tetap stabil dan mencegah lonjakan, sehingga setelah lebih dari 13 jam suhu masih di bawah 1 °C. Ini membuktikan efektivitasnya dalam mempertahankan suhu rendah dalam freezer.

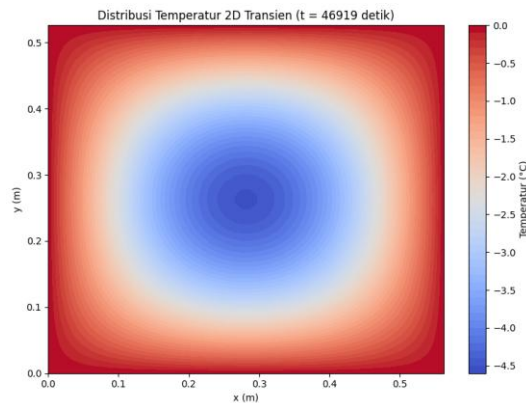


Gambar 7. Grafik Temperatur Freezer 2D dengan PCM Dry Ice Gel

Gambar 7. menunjukkan grafik simulasi penurunan temperatur di titik tengah domain freezer dengan PCM Dry Ice Gel selama 13,5 jam (48.600 detik). Suhu awal 25 °C menurun secara eksponensial hingga mendekati 1 °C. Penurunan cepat

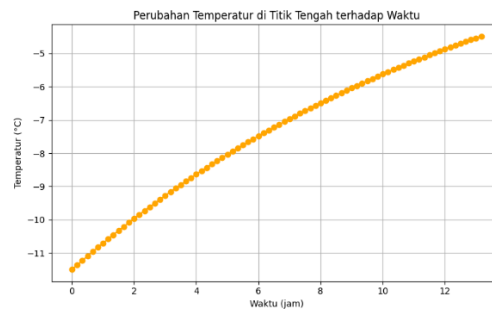
terjadi di awal karena gradien suhu tinggi, lalu melambat saat suhu pusat mendekati suhu sekitarnya. Pada 8 jam, suhu turun di bawah  $5^{\circ}\text{C}$ , dan setelah 10 jam mendekati kondisi tunak. Grafik ini menunjukkan efektivitas Dry Ice Gel dalam menyerap panas dan menjaga suhu freezer tetap stabil untuk mempertahankan kualitas produk sensitif suhu.

### *Minyak Kelapa Sawit*



Gambar 8. Distribusi Temperatur Freezer 2D dengan PCM Minyak Kelapa Sawit

Gambar 8. menunjukkan distribusi temperatur 2D freezer dengan PCM minyak kelapa sawit pada 46.919 detik. Suhu terendah tercatat di pusat domain ( $-4,5^{\circ}\text{C}$ ), sementara tepi mendekati  $0^{\circ}\text{C}$ . Pola ini menunjukkan pendinginan efektif, dengan panas mengalir dari pusat ke dinding. Distribusi suhu yang simetris mencerminkan konduktivitas termal yang merata, menandakan bahwa minyak kelapa sawit mampu menjaga kestabilan suhu dan berpotensi sebagai PCM alami yang efisien untuk sistem penyimpanan dingin.

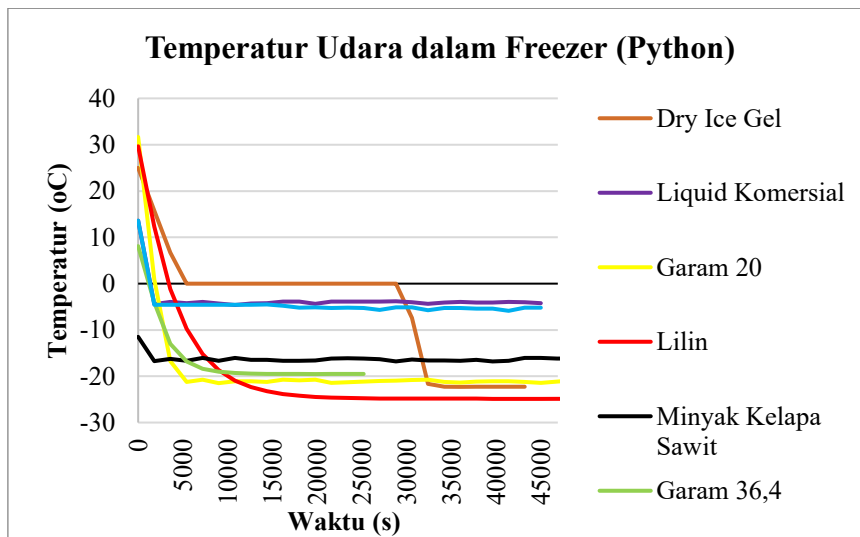


Gambar 9. Grafik Temperatur Freezer 2D dengan PCM Minyak Kelapa Sawit

Gambar 9. menunjukkan grafik simulasi temperatur titik tengah freezer dengan PCM minyak kelapa sawit selama  $\pm 13$  jam. Suhu awal  $-11,5^{\circ}\text{C}$  naik perlahan hingga  $-4,5^{\circ}\text{C}$ , dengan kurva melandai seiring waktu. Pola ini mencerminkan proses penyerapan panas laten yang stabil selama fase transisi, menandakan kemampuan minyak kelapa sawit dalam menjaga suhu rendah dalam durasi lama. Hasil ini menunjukkan potensi minyak kelapa sawit sebagai PCM alami yang efektif untuk sistem penyimpanan dingin.

### ***Simulasi Python dan Ansys***

#### *Metode Simulasi Python*

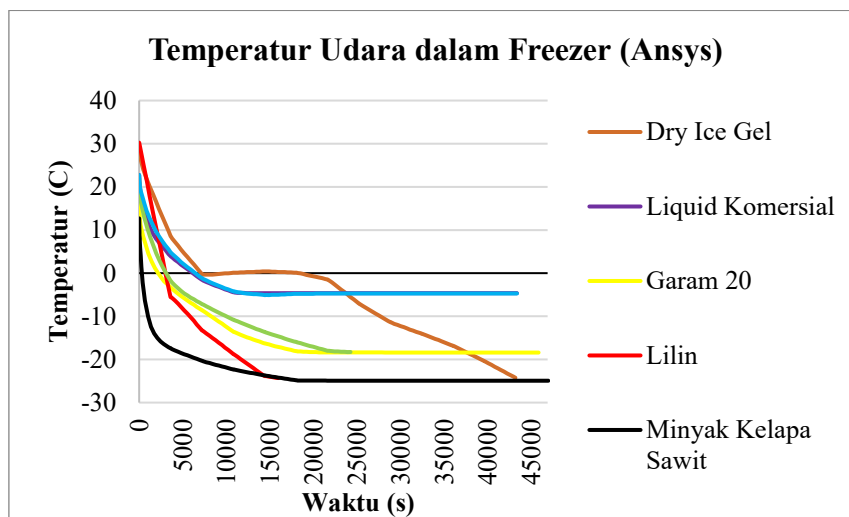


Gambar 10. Grafik Simulasi Python Temperatur Udara Freezer Berbasis PCM

Gambar 10. menunjukkan grafik simulasi Python temperatur udara terhadap waktu untuk berbagai PCM. Dry Ice Gel awalnya lambat menurun, namun setelah ~30.000 detik, suhu turun drastis hingga  $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$  karena pelepasan kalor laten besar, menunjukkan efektivitas tinggi. Liquid Komersial cepat turun ke  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ , lalu stagnan dan naik perlahan, menandakan efisiensi rendah dan hanya cocok untuk suhu mendekati  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Garam 20% menurun tajam lalu stabil di  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ , menunjukkan pelepasan panas bertahap dan performa stabil. Lilin langsung turun ke  $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$  dan stabil, menjadi PCM paling optimal dalam simulasi ini. Minyak Kelapa Sawit menurun lambat hingga  $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$  dengan fluktuasi kecil akibat termostat, cocok untuk suhu konstan jangka panjang. Garam 36,4% menurun lebih lambat dan hanya mencapai  $-13\text{ }^{\circ}\text{C}$ , dengan efisiensi pelepasan panas yang rendah. Air Biasa turun cepat ke  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  lalu datar, mencerminkan pelepasan kalor laten terbatas dan efektivitas paling rendah untuk suhu rendah.

Secara keseluruhan, Dry Ice Gel dan Lilin unggul dalam mempertahankan suhu sangat rendah, sementara air biasa dan Liquid Komersial kurang efektif untuk aplikasi freezer ekstrem.

**Metode Simulasi Ansys**



Gambar 11. Grafik Simulasi Ansys Temperatur Udara Freezer Berbasis PCM

Gambar 11. menunjukkan grafik simulasi ANSYS temperatur udara untuk berbagai jenis PCM dalam freezer. Dry Ice Gel awalnya menaikkan suhu hingga  $5\text{ }^{\circ}\text{C}$  sebelum turun drastis ke  $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$  setelah 30.000 detik, menandakan pelepasan kalor laten besar dan efektivitas tinggi. Liquid Komersial turun cepat ke  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  lalu stagnan, menunjukkan kapasitas penyerapan panas terbatas. Garam 20% turun stabil ke  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  dengan performa baik berkat depresi titik beku dan pelepasan kalor laten merata. Lilin menunjukkan penurunan tajam langsung ke  $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$  dan tetap stabil, membuktikan kinerjanya sebagai PCM paling efektif.

Minyak Kelapa Sawit juga mencapai  $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$  dan stabil tanpa fluktuasi, menunjukkan penyerapan energi baik dalam simulasi, meski performa praktis bisa dipengaruhi viskositas. Garam 36,4% hanya turun ke  $-12\text{ }^{\circ}\text{C}$  dan melandai, menandakan efisiensi termal rendah akibat kekentalan tinggi. Air Biasa turun cepat ke  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  lalu datar, mencerminkan pelepasan kalor laten terbatas dan kinerja rendah untuk aplikasi suhu rendah.

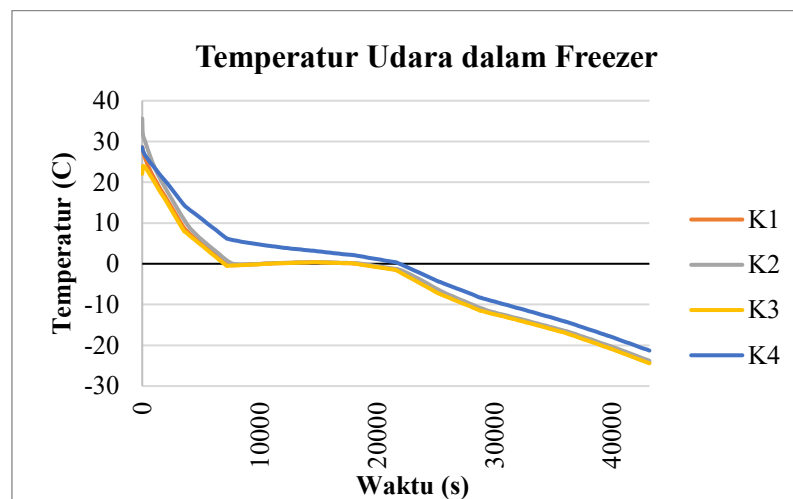
Secara keseluruhan, Dry Ice Gel dan Lilin tampil sebagai PCM paling efektif dalam menjaga suhu freezer tetap rendah dalam simulasi ANSYS.

### Analisis Sensitivitas Perbedaan Parameter

Tabel 8. Dry Ice Gel

Data	Konduktivitas Termal (W/m.K)	Densitas (Kg/m <sup>3</sup> )	Kapasitas Panas Spesifik (J/Kg.K)	Referensi
K1	1,9	1000	1787	[14]
K2	1,8	920	2000	[21]
K3	6,12	997,1	4072	[22]
K4	0,1	1511	849	[23]

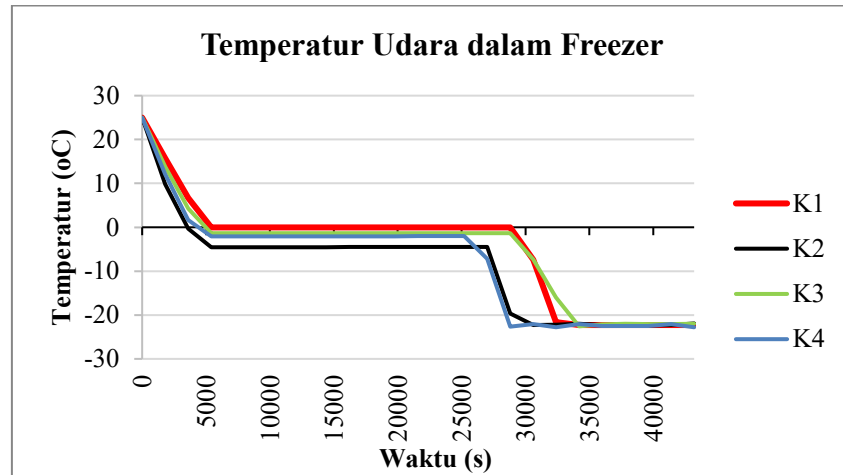
### Grafik Ansys



Gambar 12. Grafik Sensitivitas Ansys Temperatur Freezer dengan Dry Ice Gel.

Gambar 12 menunjukkan grafik simulasi ANSYS pengaruh parameter termal PCM terhadap pendinginan udara selama 43.200 detik. Kurva K3 menunjukkan penurunan suhu tercepat karena nilai konduktivitas ( $k$ ) dan kapasitas panas jenis ( $C_p$ ) tinggi. Sebaliknya, K4 menurun lebih lambat namun mempertahankan suhu dingin lebih stabil. K1 dan K2 berada di tengah, mencerminkan efek keseimbangan antarparameter. Grafik ini menegaskan bahwa kombinasi nilai  $k$ ,  $\rho$ , dan  $C_p$  sangat berpengaruh terhadap performa pendinginan, sehingga pemilihan parameter termal yang tepat penting dalam desain freezer berbasis PCM.

**Grafik Python**



Gambar 13. Grafik Sensitivitas Python Temperatur Freezer dengan Dry Ice Gel

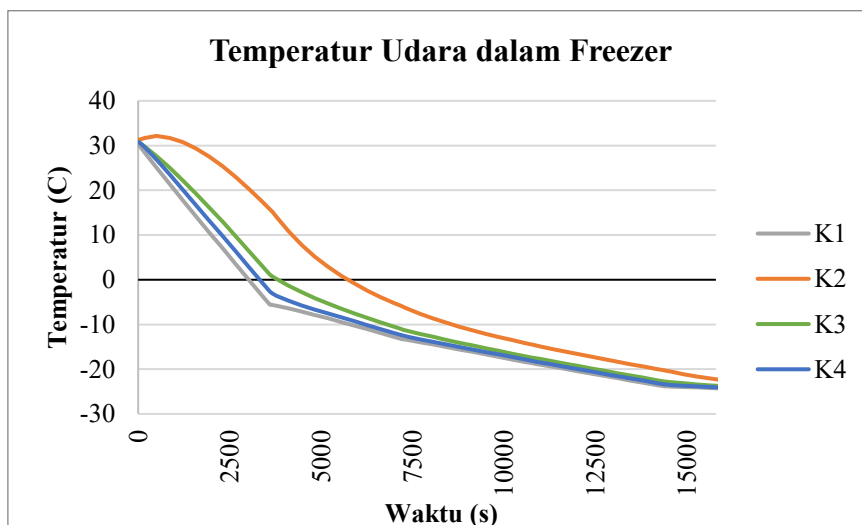
Gambar 13 menunjukkan grafik simulasi Python temperatur freezer terhadap waktu untuk empat konfigurasi PCM selama 43.200 detik. Semua kurva memiliki tiga fase: penurunan suhu awal, plateau di sekitar 0 °C (fase transisi), dan penurunan tajam ke -20 °C. K3 (k dan Cp tinggi) menunjukkan penurunan cepat dan plateau paling lama, menandakan kemampuan menyerap panas terbesar. K4 (k dan Cp rendah) turun cepat ke suhu beku, namun tidak mampu menahan panas lama. K1 dan K2 menunjukkan performa sedang, dengan K1 sedikit lebih stabil. Simulasi ini menegaskan bahwa konduktivitas termal (k) dan kapasitas panas jenis (Cp) tinggi berperan penting dalam menjaga suhu freezer tetap stabil lebih lama.

**Lilin**

Tabel 2. Karakteristik Termofisika Lilin

Data	Konduktivitas Termal (W/m.K)	Densitas (Kg/m <sup>3</sup> )	Kapasitas Panas Spesifik (J/Kg.K)	Referensi
K1	0,2	789	2700	[17]
K2	0,21	760	2510	[24]
K3	0,21	920	1890	[25]
K4	0,65	900	800	[26]

**Grafik Ansys**

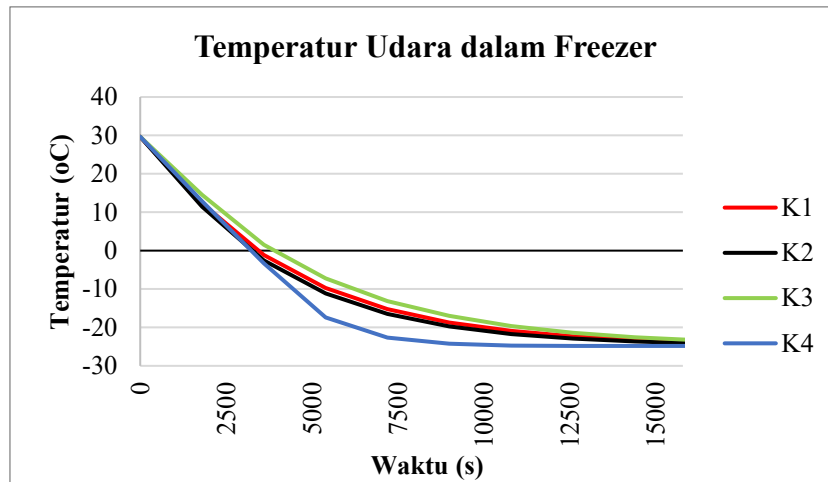


Gambar 14. Grafik Sensitivitas Ansys Temperatur Freezer dengan Lilin

Gambar 14. menunjukkan grafik simulasi Ansys untuk PCM lilin, di mana K2 mengalami penurunan suhu paling lambat akibat kapasitas panas tinggi dan konduktivitas rendah. Sebaliknya, K4 menurun paling cepat karena konduktivitas tinggi

meskipun kapasitas panasnya rendah. K1 dan K3 menunjukkan respons sedang. Grafik ini menegaskan bahwa konduktivitas mempercepat pendinginan, sementara kapasitas panas memperlambat penurunan suhu namun mempertahankan dingin lebih lama. Pemilihan parameter bergantung pada kebutuhan antara kecepatan respons atau ketahanan dingin.

**Grafik Python**



Gambar 15. Grafik Sensitivitas Python Temperatur Freezer dengan Lilin

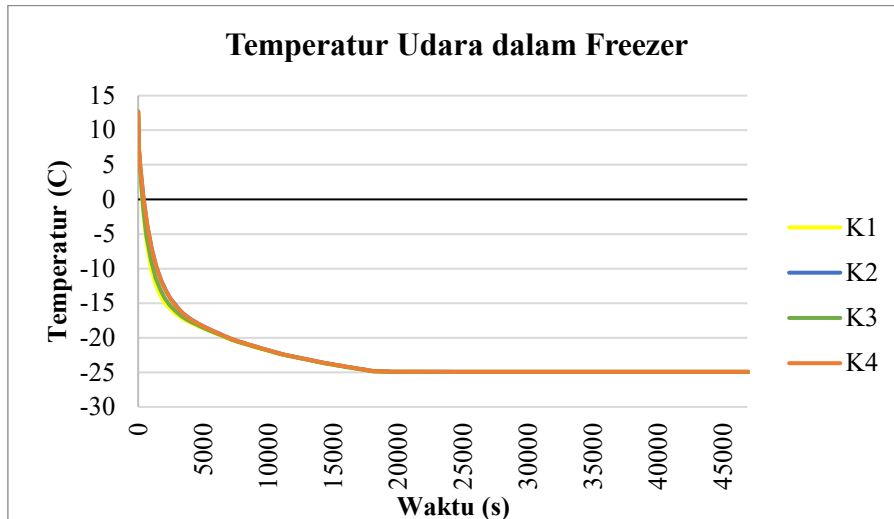
Gambar 15. menunjukkan grafik distribusi temperatur udara dalam freezer menggunakan PCM lilin untuk empat konfigurasi berbeda. Seluruh skenario mengalami penurunan suhu tajam pada 2000-4000 detik pertama, lalu melambat hingga mencapai steady state di bawah -20°C. Kurva K4 (biru) menunjukkan pendinginan tercepat, menandakan efisiensi tinggi dalam menyerap panas. Sebaliknya, K3 (hijau) paling lambat, kemungkinan akibat massa atau posisi PCM yang kurang optimal. K1 (merah) dan K2 (hitam) menunjukkan performa sedang dan hampir serupa. Grafik ini menegaskan bahwa konfigurasi PCM sangat memengaruhi efektivitas pendinginan dan kestabilan suhu dalam freezer.

**Minyak Kelapa Sawit**

Tabel 3. Karakteristik Termofisika Minyak Kelapa Sawit

Data	Konduktivitas Termal (W/m.K)	Densitas (Kg/m <sup>3</sup> )	Kapasitas Panas Spesifik (J/Kg.K)	Referensi
K1	0,6	916	2200	[18]
K2	0,181	925	1190	[27]
K3	0,0723	280	1200	[28]
K4	0,40	1100	2100	[29]

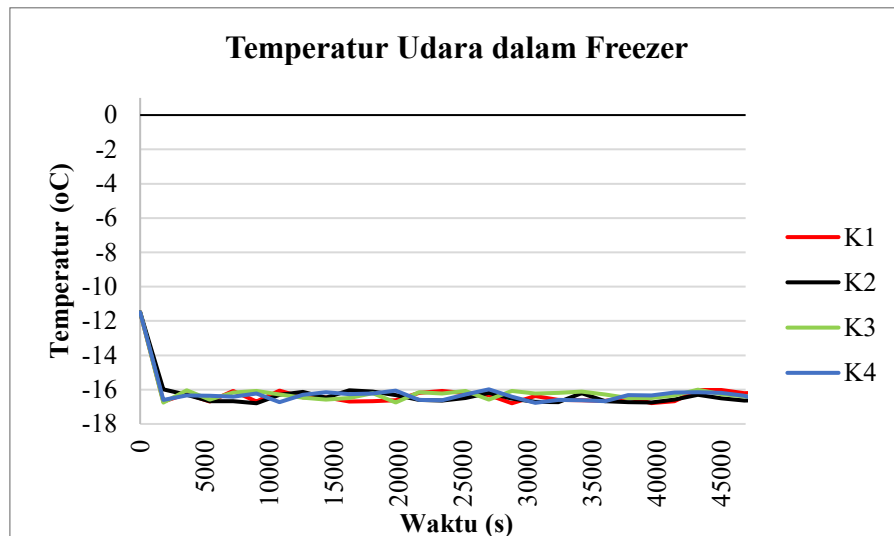
**Grafik Ansys**



Gambar 16. Grafik Sensitivitas Ansys Temperatur Freezer dengan Minyak Sawit

Gambar 16. menunjukkan grafik simulasi Ansys PCM minyak kelapa sawit, di mana seluruh konfigurasi K1–K4 mengalami penurunan suhu tajam di awal, lalu melambat hingga mendekati  $-25^{\circ}\text{C}$ . Meskipun terdapat perbedaan parameter termofisika, pola penurunan suhu hampir seragam, terutama setelah fase awal. Ini menunjukkan bahwa konduktivitas, densitas, dan kapasitas panas hanya berpengaruh kecil pada pendinginan jangka panjang. Secara umum, minyak kelapa sawit sebagai PCM menunjukkan performa stabil dan andal, meskipun efisiensinya masih dapat ditingkatkan melalui optimasi parameter termofisika.

**Grafik Python**



Gambar 17. Grafik Sensitivitas Python Temperatur Freezer dengan Minyak Sawit

Gambar 17 menunjukkan grafik simulasi Python PCM minyak kelapa sawit, di mana semua konfigurasi K1–K4 mengalami penurunan suhu cepat hingga  $-14^{\circ}\text{C}$  hingga  $-16^{\circ}\text{C}$ , lalu stabil hingga akhir simulasi. Perbedaan antar kurva sangat kecil, menandakan pengaruh parameter termofisika seperti konduktivitas, densitas, dan kapasitas panas tidak signifikan setelah suhu stabil. Seluruh konfigurasi menunjukkan kestabilan suhu yang baik, menjadikan PCM minyak kelapa sawit efektif dan andal untuk aplikasi pendinginan pasif pada freezer.

## KESIMPULAN DAN SARAN

### Kesimpulan

Fluktuasi temperatur pada freezer dapat menurunkan kualitas produk beku dan efisiensi energi. Penelitian ini bertujuan untuk memodelkan dan mensimulasikan sistem freezer berbasis Phase Change Material (PCM) guna meningkatkan kestabilan suhu. PCM memiliki kemampuan menyerap dan melepaskan panas laten pada suhu konstan, sehingga efektif meredam lonjakan suhu selama siklus refrigerasi. Pemodelan dilakukan pada freezer 100 liter menggunakan CoolTools, ANSYS (FEA), dan Python (FDM) untuk mengevaluasi kinerja berbagai jenis PCM.

Hasil menunjukkan COP aktual sebesar 2,36, dengan beban pendinginan terendah 22,959 W diperoleh dari liquid komersial. Penambahan PCM memperlambat perubahan suhu secara signifikan dibanding freezer tanpa PCM. Analisis sensitivitas mengungkapkan bahwa konduktivitas termal tinggi mempercepat pendinginan awal, sedangkan Cp dan kalor laten tinggi mempertahankan kestabilan suhu.

### Saran

Cakupan penelitian dapat diperluas dengan mempertimbangkan pengaruh faktor eksternal yang umum terjadi dalam kondisi operasional sebenarnya, seperti frekuensi buka tutup pintu freezer, sehingga model yang dihasilkan menjadi lebih representatif terhadap aplikasi di lapangan.

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] M. Calati, K. Hooman, and S. Mancin, "Thermal storage based on phase change materials (PCMs) for refrigerated transport and distribution applications along the cold chain: A review," *Int. J. Thermofluids*, vol. 16, no. October, p. 100224, 2022, doi: 10.1016/j.ijft.2022.100224.
- [2] M. F. S. R. A. Usna, and A. Astuti, "Potensi Material Berubah Fasa PEG-400 sebagai Sistem Cold Storage Sayur Selada," *J. Fis. Unand*, vol. 12, no. 3, pp. 507–511, 2023, doi: 10.25077/jfu.12.3.506-510.2023.
- [3] B. Sena, B. Suhendra, N. Amanah, R. Setiawan, and M. L. B. Alfakihuddin, "Effect of Dry Ice Gel PCM on Wall Freezer Temperatur Varians," *J. Ilmu Pengetah. dan Teknol.*, vol. 10, pp. 21–35, 2024.
- [4] B. Sena, N. Amanah, B. Suhendra, R. Setiawan, and M. L. B. Alfakihuddin, "The Statistic Analysis of Instruments and Temperature Measurement of Freezer Wall Attached by Dry Ice Gel," *E3S Web Conf.*, vol. 500, 2024, doi: 10.1051/e3sconf/202450003023.
- [5] J. T. Mesin and P. N. Bali, "Studi Eksperimental Kinerja Temperatur dan Energi Integrasi Bio-PCM Pada Chest Freezer I Nyoman Suamir, I Made Rasta," *J. Matrix*, vol. 9, no. 1, 2019, doi: 10.31940/matrix.v9i1.1046.
- [6] D. B. Dhahir and A. M. Adham, "Peningkatan Kinerja Kulkas Rumah Tangga Dengan Menggunakan Bahan Perubahan Fase Tunggal dan Ganda (PCM) Pada Evaporator : Studi Eksperimental," *J. Heat Mass Transf.*, vol. 33, pp. 135–154, 2023.
- [7] A. R. Insanul, W. F. Pambudi, and N. Akhmad, "Efek Bunga Es Terhadap Kerja Evaporator Refrigerator," *Maj. Ilm. Gema Marit.*, vol. 22, pp. 1–9, 2020.
- [8] K. Sumeru, *Subcooling pada Siklus Refrigerasi Kompresi Uap: Aplikasinya pada Mesin Pendingin & Pengkondisian Udara*. 2018.
- [9] T. Hai, A. S. El Shafay, J. M. Zain, M. A. El-Rahman, and M. Sharifpur, "The Effect of Triangular Phase Change Material Rods in the Air Conditioning Duct on the Amount of Energy Required for a Residential Building," *J. Build. Eng.*, vol. 52, 2022.
- [10] Y. A. Cengel and A. J. Ghajar, *Heat and Mass Transfer: Fundamental & Applications*. 2015.
- [11] H. Luntungan, "Perancangan Sistem Pendinginan Cold Storage Ikan Beku Dengan Kapasitas Penyimpanan 30 Ton Per Hari," *Semin. Nas. Tah. Tek. Mesin VII Novemb.*, vol. 9, no. 1, p. 19,1-1-19,1-9, 2008.
- [12] B. W. Ziliwu, "Perhitungan Beban Pendinginan Pada Sistem Refrigerasi Air Blast Freezer," *JTT (Jurnal Teknol. Ter.)*, vol. 6, no. 2, p. 163, 2020, doi: 10.31884/jtt.v6i2.291.
- [13] Purbatin Hari and Biantoro Agung Wahyudi, "Perencanaan perhitungan beban pendinginan ruang frozen dengan kapasitas 100 ton per Hari pada pergudangan penyimpanan berpendingin," *J. Tek. Mesin*, vol. 12, no. 1, pp. 68–72, 2023, [Online]. Available: <https://www.bing.com/ck/a?!&&p=b19c2303051523ccJmltdHM9MTcyNTU4MDgwMCZpZ3VpZD0zOTA5NzY2My01OTk5LTY3N2YtMDM5MS02NTkwNThjY2NWMmaW5zaWQ9NTIzMQ&ptn=3&ver=2&hsh=3>

- &fcid=39097663-5999-677f-0391-659058cf665c&psq=PERENCANAAN+PERHITUNGAN+BEBAN+PENDINGINAN+RUANG+
- [14] Calvin, Samar, and H. Ambarita, "Jurnal Dinamis STUDI EKSPERIMENTAL SOLAR COLD ENERGY STORAGE DENGAN PENAMBAHAN PCM DAN TANPA PCM," *J. Din.*, vol. 10, pp. 39–47, 2022.
- [15] D. Lager, "Evaluation of thermophysical properties for thermal energy storage materials-determining factors, prospects and limitations," no. September, 2018, [Online]. Available: [https://publik.tuwien.ac.at/files/publik\\_265149.pdf](https://publik.tuwien.ac.at/files/publik_265149.pdf)
- [16] Y. M. Choo and W. Wei, "Salt hydrates as phase change materials for photovoltaics thermal management," *Energy Sci. Eng.*, vol. 10, no. 5, pp. 1630–1642, 2022, doi: 10.1002/ese3.1007.
- [17] A. Zeshan, K. Shahzad, S. Jamal, and M. Ahmad, "Paraffin Wax As A Phase Change Material For Thermal Energy Storage : Tubes In Paraffin Wax As A Phase Change Material For Thermal Energy Storage : Tubes In Shell Type Heat Exchanger," vol. 1, no. 2, pp. 39–52, 2018.
- [18] I. M and Harmen, "Heat Transfer Characteristics of Coconut Oil as Phase Change Material to Room Cooling application," 2017.
- [19] B. Han, J. H. Choi, J. A. Dantzig, and J. C. Bischof, "A quantitative analysis on latent heat of an aqueous binary mixture," *Cryobiology*, vol. 52, no. 1, pp. 146–151, 2006, doi: 10.1016/j.cryobiol.2005.09.007.
- [20] M. R. Maulana, M. Tamjidillah, and M. N. Ramadhan, "PENGARUH TIPE ABSORBER TEMBAGA DAN SENG PADA SOLAR DISTILLATION TERHADAP PRODUKTIVITAS KONDENSAT AIR LAUT," vol. 4, pp. 25–40, 2022.
- [21] Z. Liu, D. Zhang, Q. Wang, Y. Chi, and L. Zhang, "Performance Study on Air-Cooled Household Refrigerator with Cold Storage Phase Change Material," pp. 130–142, 2017.
- [22] M. Ilchi-Ghazaani and P. Parvin, "Characterization of a dry ice heat exchanger," *Int. J. Refrig.*, vol. 34, no. 4, pp. 1085–1097, 2011, doi: 10.1016/j.ijrefrig.2011.02.015.
- [23] M. K. Gupta, M. Jamil, G. Hussain, M. Alkahtani, M. Haider Abidi, and G. M. Krolczyk, "Characterization of thermophysical properties of dry ice-based ethanol/ester oil and its influence on surface hardening of machined Ti-6Al-4V alloy," *J. Mol. Liq.*, vol. 388, no. August, p. 122786, 2023, doi: 10.1016/j.molliq.2023.122786.
- [24] S. Ali, S. P. Deshmukh, A. T. Mohamad, M. Warimani, and S. A. Khan, "Performance Evaluation of Paraffin Wax as Phase Change Material in a Horizontal Cylindrical Thermal Energy Storage Unit," *J. Adv. Res. Fluid Mech. Therm. Sci.*, vol. 130, no. 2, pp. 150–165, 2025, doi: 10.37934/arfmts.130.2.150165.
- [25] A. M. Nair and P. V. K. Naidu, "Analysis of Paraffin Wax as a Phase Change Material," *Int. J. Curr. Eng. Technol.*, vol. 8, no. 01, pp. 1–5, 2018, doi: 10.14741/ijcet.v8i01.10888.
- [26] R. Bharathiraja, T. Ramkumar, M. Selvakumar, and N. Radhika, "Thermal characteristics enhancement of Paraffin Wax Phase Change Material (PCM) for thermal storage applications," *Renew. Energy*, vol. 73, 2023, doi: 10.1016/j.renene.2024.119986.
- [27] S. Kahwaji and M. A. White, "Edible oils as practical phase change materials for thermal energy storage," *Appl. Sci.*, vol. 9, no. 8, 2019, doi: 10.3390/app9081627.
- [28] I. Mawardi, S. Aprilia, M. Faisal, and S. Rizal, "Investigation of thermal conductivity and physical properties of oil palm trunks/ramie fiber reinforced biopolymer hybrid composites as building bio-insulation," *Mater. Today Proc.*, vol. 60, pp. 373–377, 2022, doi: 10.1016/j.matpr.2022.01.249.
- [29] U. Johnson Alengaram, B. A. Al Muhit, M. Z. bin Jumaat, and M. L. Y. Jing, "A comparison of the thermal conductivity of oil palm shell foamed concrete with conventional materials," *Mater. Des.*, vol. 51, no. 2013, pp. 522–529, 2013, doi: 10.1016/j.matdes.2013.04.078.