



**ANALISIS PERFORMANSI ALAT UJI THERMAL UNTUK
KARAKTERISASI BAHAN METERIAL PERUBAHAN FASE**

SKRIPSI

Diajukan Sebagai Salah Satu Syarat Dalam Rangka
Memenuhi Penyusunan Skripsi Jenjang S1
Program Studi Teknik Mesin

Oleh:

MOHAMAD SATRIO PRAMONO
NPM. 6419500018

FAKULTAS TEKNIK DAN ILMU KOMPUTER
UNIVERSITAS PANCASAKTI TEGAL
2024

LEMBAR PERSETUJUAN NASKAH SKRIPSI

Skripsi yang berjudul "ANALISIS PERFORMANSI ALAT UJI TERMAL
UNTUK KARAKTERISASI BAHAN *PHASA CHANGE MATERIAL*".

NAMA PENULIS : MOHAMAD SATRIO PRAMONO

NPM : 6419500018

Telah disetujui oleh dosen pembimbing untuk dipertahankan dihadapan sidang
dewan penguji skripsi Fakultas Teknik dan Ilmu Komputer Universitas Pancasakti
Tegal.

Hari : ..Jum'at...

Tanggal : ..19 Juli 2024

Pembimbing I 12/7-2024



(Irfan Santosa, ST., MT)
NIPY: 124521611980

Pembimbing II 5/7-2024



(Ir. Soebyakto, MT)
NIPY: 1946321960

HALAMAN PENGESAHAN

Telah di pertahankan dihadapan sidang Dewan Penguji Skripsi Fakultas Teknik dan Ilmu Komputer Universitas Pancasakti Tegal.

Pada hari : *Jum'at*

Tanggal : *19 Juli 2024*

Ketua Penguji :

Ahmad Farid, ST.MT.

NIPY: 191511101978

Penguji Utama :

Mustaqim, ST.MEng.

NIPY: 9050751970

Penguji 1

Irfan Santosa, ST.MT.

NIPY: 124521611980

Penguji 2

Ir. Soebyakto.MT.

NIPY: 1946321960

[Signature] 26/7 2024
(.....)

[Signature] 25/7 - 2024
(.....)

[Signature] 22/7 - 2024
(.....)

[Signature] 25/7 - 2024
(.....)

Disahkan,

Dekan Fakultas Teknik Mesin dan Ilmu Komputer Universitas Pancasakti Tegal



Dr. Agus Wibowo, ST., MT.)

NIPY. 126518101972

HALAMAN PERNYATAAN

Dalam penulisan skripsi ini saya tidak melakukan penjiplakan dengan ini, saya menyatakan bahwa skripsi ini yang berjudul “ANALISIS PERFORMANSI ALAT UJI THERMAL UNTUK KARAKTERISASI BAHAN PHASE CHANGE MATERIAL” ini dan seluruh isinya adalah benar – benar karya saya sendiri atau pengutipan dengan cara – cara yang tidak sesuai dengan etika yang berlaku dalam masyarakat keilmuan sebagaimana mestinya.

Demikian pernyataan ini untuk dijadikan sebagai pedoman bagi yang berkepentingan dan saya siap menanggung segala resiko dan sanksi yang diberikan kepada saya apabila dikemudian hari ditemukan adanya pelanggaran atas etika keilmuan dalam karya tulis ini, atau adanya klaim atas karya tulis ini.

Tegal, 15 Juli 2024



Mohamad Satrio Pramono

NPM. 6419500018

MOTTO DAN PERSEMBAHAN

MOTTO:

1. Hidup itu singkat lakukanlah hal yang membuat mu bahagia.
2. Fokuslah pada hal – hal apa yang ada di dalam kendali kita dan jangan pikirkan pada hal – hal yang di luar kendali kita.
3. Hidup tenang dan sederhana jauh lebih banyak membawa kebahagiaan dari pada mengejar kesuksesan yang penuh dengan kegelisahan terus menerus.
4. “Hidup gak usah dibuat sulit, gak usah ruwet: asal tidak maksiat, bisa menjadi pribadi yang menyenangkan dan bermanfaat bagi banyak orang, serta tidak mengusik hidup orang lain, itu sudah cukup” (Gus baha).
5. “Padahal gagal itu keharusan yang justru perlu dilaluikalaupun gak pernah gagal, gimana mau sukses. Mumpung masih muda, habisi kuota gagalnya sekarang jadi, nanti tinggal sisa kuota suksesnya jadi coba banyak hal, selalu bilang iya pada setiap kesempatan” (Najwa shihab).

PERSEMBAHAN

Dalam penulisan laporan skripsi ini, penulis ingin mengucapkan terima kasih yang sebesar – besarnya kepada:

1. Keluarga tercinta, ayah dan ibu saya, atas doa dan dukungan tanpa henti selama penulisan skripsi ini.
2. Kepada bapak dan ibu dosen khususnya dosen pembimbing satu dan dua, atas bimbingannya, arahan dan kesabaran dalam memberikan masukan yang berharga kepada saya.
3. Teman – teman seperjuangan yang selalu memberikan semangat dan dukungan moral.
4. Semua pihak yang telah membantu dalam penelitian ini, baik secara langsung maupun tidak langsung.

PRAKATA

Dengan memanjatkan puja dan puji syukur ke hadirat Allah SWT yang telah memberi petunjuk, taufik dan hidayah-Nya, sehingga penulis dapat menyelesaikan proposal ini dengan judul “Analisis Performansi Alat Uji Termal Dengan Karakterisasi Bahan *Phasa Change Material*”. Penyusunan proposal ini dimaksudkan untuk memenuhi salah satu syarat dalam rangka menyelesaikan studi stasa Program Studi Teknik Mesin.

Dalam penyusunan dan penulisan proposal ini tidak lepas dari bantuan dan bimbingan berbagai pihak. Dalam kesempatan ini penulis mengucapkan terimakasih yang sebesar-besarnya kepada:

1. Bapak Dr. Agus Wibowo, ST. MT. selaku Dekan Fakultas Teknik dan Ilmu Komputer Universitas Pancasakti Tegal.
2. Bapak Hadi Wibowo, ST., MT. selaku Kaprodi.
3. Bapak Irfan Santosa, ST., MT. selaku Dosen Pembimbing I.
4. Bapak Ir. Soebyakto, MT. selaku Dosen Pembimbing II.
5. Segenap Dosen dan Staf Fakultas Teknik dan ilmu Komputer Universitas Pancasakti Tegal.
6. Bapak dan Ibuku serta keluarga yang telah mendoakanku.
7. Teman-teman baik yang di lingkungan kampus dan di lingkungan pekerjaan yang telah memberikan dukungan dalam penyusunan proposal ini.
8. Semua pihak yang telah membantu hingga laporan ini selesai, semoga bantuan dan bimbingan yang telah diberikan mendapat balasa yang sesuai dari Allah SWT.

Penulis telah mencoba membuat laporan sesempurna mungkin semampu kemampuan penulis, namun demikian mungkin ada yang kekurangan yang tidak terlihat oleh penulis untuk itu mohon masukan untuk kebaikan dan pemaafannya. Harapan penulis, semoga proposal ini dapat bermanfaat bagi kita semua. Aminn

Tegal, Juli 2024

Mohamad Satrio Pramono

NPM. 6419500018

ABSTRAK

Mohamad Satrio Pramono, 2024 “ANALISIS PERFORMASI ALAT UJI THERMAL UNTUK KARAKTERISASI BAHAN PHASE CHANGE MATERIAL”. Laporan skripsi Teknik Mesin Fakultas Teknik dan Ilmu Komputer Universitas Pancasakti Tegal.

Alat ini digunakan untuk menganalisa proses *melting* (mencair) dan *solidification* (pemadatan) dengan menggunakan *paraffin wax* dan *stearic acid* sebagai *phase change material* yang akan di ujikan. Dalam studi ini, digunakan sebuah alat/wadah yang memiliki bentuk persegi panjang dengan dimensi panjang 280 mm, lebar 180 mm, tinggi 200 mm yang terbuat dari kaca dengan tebal 10 mm dan disekat dengan plat aluminium dengan tebal plat 2 mm, serta untuk media pemanas terbuat dari keramik yang ditempatkan di bagian bawah alat. Proses pelelehan dan pemadatan PCM dilakukan pencatatan waktu dan pemantauan suhu. Pelelehan PCM dilakukan sampai meleleh sepenuhnya.

Suhu meningkat secara bertahap dengan kenaikan yang lebih signifikan pada titik-titik yang dekat dengan sumber panas (T7, T8, T9). Efisiensi dari *paraffin* lebih efisien dibandingkan dengan *stearic acid* karena besar nilai *input* (*heater*) yang sama tetapi menghasilkan nilai *output* (*paraffin/stearic acid*) yang lebih besar. Dengan demikian nilai hasil perhitungan dari efisiensi masing – masing bahan, *paraffin* memiliki nilai 7.978% yang lebih kecil dari nilai *stearic acid* dengan nilai 9.566%, hal ini dikarenakan nilai dari output *paraffin* lebih besar dari pada *stearic acid*. Untuk nilai kapasitas kalor pada saat pelelehan *paraffin* memiliki nilai yang tinggi dari *stearic acid* kemudian pada saat pemadatan nilai *stearic acid* lebih tinggi dari *paraffin*. Dengan mempertimbangkan nilai kapasitas kalor dan efisiensinya maka *paraffin* lebih baik dalam kemampuan untuk menyerap dan melepaskan panas.

Kata Kunci: Pelelehan, Pemadatan, *Paraffin Wax*, *Stearic Acid*.

ABSTRACT

Mohamad Satrio Pramono, 2024 "*PERFORMANCE ANALYSIS OF THERMAL TEST EQUIPMENT FOR CHARACTERIZATION OF PHASE CHANGE MATERIALS*". Mechanical Engineering thesis report, Faculty of Engineering and Computer Science, Pancasila University, Tegal.

This tool is used to analyze the melting (melting) and solidification (solidification) processes using paraffin wax and stearic acid as test materials. In this study, a tool/container which has a rectangular shape with dimensions of length 280 mm, width 180 mm, height 200 mm is used, made of glass with a thickness of 10 mm and insulated with an aluminum plate with a plate thickness of 2 mm. as well as a heating medium made of ceramic which is placed at the bottom of the tool. The melting and solidification process of PCM is carried out by recording time and monitoring temperature. Melting of PCM is carried out until it melts completely.

The temperature increases gradually with more significant increases at points close to the heat source (T7, T8, T9). The efficiency of paraffin is more efficient than stearic acid because the input value (heater) is the same but produces a greater output value (paraffin/stearic acid). Thus, the calculated value of the efficiency of each material, paraffin has a value of 7.978% which is smaller than the value of stearic acid with a value of 9.566%, this is because the output value of paraffin is greater than stearic acid. The heat capacity value when melting paraffin has a higher value than stearic acid, then when solidifying the value of stearic acid is higher than paraffin. By considering the heat capacity and efficiency values, paraffin is better in its ability to absorb and release heat.

Keywords: Melting, Solidification, Paraffin Wax, Stearic Acid.

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
HALAMAN PERSETUJUAN NASKAH SKRIPSI	ii
HALAMAN PENGESAHAN	iii
HALAMAN PERNYATAAN.....	iv
MOTTO DAN PERSEMBAHAN.....	v
PRAKATA	vi
ABSTRAK	vii
<i>ABSCTRACT</i>	viii
DAFTAR ISI.....	ix
DAFTAR GAMBAR.....	xii
DAFTAR TABEL.....	xiii
DAFTAR GRAFIK	xiv
BAB I	1
PENDAHULUAN.....	1
A. Latar Belakang Masalah	1
B. Batasan Masalah	3
C. Rumusan Masalah.....	4
D. Tujuan dan Manfaat	4
E. Sistematika Penulisan	6
BAB II.....	9
LANDASAN TEORI DAN TINJAUAN PUSTAKA.....	9
A. Landasan Teori	9
1. <i>Phase Change Material</i> (PCM).....	9
2. Perpindahan panas	12
3. Konduktivitas termal	16

4. Panas Laten dan Panas Sensibel Pada PCM	19
5. Alat ukur suhu.....	22
6. Elemen pemanas	25
B. Tinjauan pustaka.....	28
BAB III.....	51
METODE PENELITIAN	51
A. Metode Penelitian	51
B. Waktu Dan Tempat Penelitian	52
C. Instrumen Penelitian	52
1. Bahan Penelitian	52
2. Alat Penelitian.....	55
D. Desain Alat Uji Thermal	58
E. Variabel Penelitian	59
1. Variabel Bebas	59
2. Variabel Terikat	60
F. Prosedur Penelitian	60
1. Persiapan Penelitian.....	60
2. Pengujian proses peleburan dan pembekuan PCM.....	61
G. Analisis Data.....	62
H. Diagram Alur Penelitian	64
BAB IV	65
HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN	65
A. Hasil penelitian	65
B. Proses kerja alat uji termal.....	66
1. Persiapan pengujian	66
2. Pengujian proses pelelehan bahan	66
3. Pengujian proses pemadatan bahan	67

C.	Proses performansi alat uji termal	67
1.	Proses pelelehan.....	67
2.	Proses pemadatan.....	73
D.	Visualisasi pengujian bahan <i>Phasa Change Material</i> (PCM)	75
1.	Gambar proses pelelehan <i>paraffin</i>	75
2.	Gambar proses pelelehan <i>stearic acid</i>	77
3.	Gambar proses pemadatan <i>paraffin</i>	78
4.	Gambar proses pemadatan <i>stearic acid</i>	79
E.	Pembahasan	81
1.	Percobaan pengujian pertama menggunakan bahan <i>paraffin</i>	81
2.	Proses pelelehan pengujian Ke dua menggunakan bahan <i>paraffin</i>	82
3.	Proses pelelehan pengujian Ketiga menggunakan bahan <i>stearic acid</i>	87
4.	Proses Pemadatan Pada Pengujian kedua bahan <i>paraffin</i>	91
5.	Proses Pemadatan Pada Pengujian Ketiga bahan <i>stearic acid</i>	93
BAB V		96
KESIMPULAN DAN SARAN		96
A.	Kesimpulan	96
1.	Desain dan Cara Kerja Alat Uji Thermal	96
2.	Performansi Alat Uji <i>Thermal</i> pada PCM (<i>Paraffin</i> dan <i>Stearic Acid</i>):	96
B.	Saran	98
DAFTAR PUSTAKA		100
LAMPIRAN		103

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Balok logam dilalui panas	13
Gambar 2.2 Perpindahan panas dengan konveksi	14
Gambar 2.3 Perpindahan panas dengan radiasi.....	15
Gambar 2.4 Penyimpanan panas laten untuk padat ke cair	22
Gambar 2.5 Keramik heater	27
Gambar 3.1 <i>Paraffin wax</i>	55
Gambar 3.2 <i>Stearic acid</i>	56
Gambar 3.3 Keramik heater	58
Gambar 3.4 Termometer digital	59
Gambar 3.5 Gambar alat pengontrol temperatur	59
Gambar 3.6 Gambar alat ukur waktu	60
Gambar 3.7 Desain alat uji termal	61
Gambar 3.8 Alat uji termal	61
Gambar 3.9 Gambar titik penempatan termometer	63
Gambar 3.10 Gambar alur penelitian	66
Gambar 4.1 gambar pelelehan <i>Paraffin</i>	76
Gambar 4.2 gambar pelelehan <i>Stearic Acid</i>	78
Gambar 4.3 gambar pemadatan <i>Stearic Acid</i>	79
Gambar 4.4 gambar pemadatan <i>Stearic Acid</i>	80

DAFTAR TABEL

Tabel 3.1 Kelender penelitian.....	54
Tabel 3.2 Sifat termo fisik bahan perubahan fasa.....	57
Tabel 3.3 Tabel titik koordinat termometer digital	63
Tabel 3.4 Pengolahan data pengujian	65
Tabel 4.1 data hasil percobaan pertama menggunakan bahan <i>paraffin</i> berbentuk serbuk	66
Tabel 4.2 data hasil percobaan kedua menggunakan bahan <i>paraffin</i> berbentuk serbuk.	67
Tabel 4.3 data hasil percobaan ketiga menggunakan bahan <i>stearic acid</i>	69
Tabel 4.4 data hasil percobaan kedua menggunakan bahan <i>paraffin</i> berbentuk serbuk	71
Tabel 4.5 data hasil percobaan ketiga menggunakan bahan <i>stearic acid</i>	72
Tabel 4.6 data hasil percobaan pertama menggunakan bahan <i>paraffin</i> berbentuk serbuk	75
Tabel 4.7 data hasil percobaan kedua menggunakan bahan <i>paraffin</i> berbentuk serbuk.	82
Tabel 4.8 Fase <i>sensibel</i> dan kapasitas kalor pelelehan <i>paraffin</i>	84
Tabel 4.9 data hasil percobaan ketiga menggunakan bahan <i>stearic acid</i>	87
Tabel 4.10 Fase <i>sensibel</i> dan kapasitas kalor pelelehan <i>stearic acid</i>	89
Tabel 4.11 data hasil percobaan kedua menggunakan bahan <i>paraffin</i> berbentuk serbuk	91
Tabel 4.12 Fase <i>sensibel</i> dan kapasitas kalor pepadatan <i>paraffin</i>	92
Tabel 4.13 data hasil percobaan ketiga menggunakan bahan <i>stearic acid</i>	93
Tabel 4.14 Fase <i>sensibel</i> dan kapasitas kalor pepadatan <i>stearic acid</i>	94
Tabel 5.1 Perbandingan efisiensi dan kapasitas kalor	97

DAFTAR GRAFIK

Grafik 4.1 Pelelehan <i>paraffin</i> terhadap kalor yang diserap dan temperatur di titik T5	86
Grafik 4.2 Pelelehan <i>stearic acid</i> terhadap kalor yang diserap dan temperatur di titik T5.....	91
Grafik 4.3 Pemadatan <i>paraffin</i> terhadap kalor yang diserap dan temperatur di titik T5	93
Grafik 4.4 Pemadatan <i>stearic acid</i> terhadap kalor yang diserap dan temperatur di titik T5.....	95

BAB I

PENDAHULUAN

A. Latar Belakang Masalah

Energi panas dari matahari selalu hadir sepanjang waktu, dan ini merupakan sumber energi terbarukan yang sangat penting untuk kehidupan manusia dan makhluk lain di bumi. Tingginya ketersediaan energi matahari telah mendorong perkembangan terus menerus dalam teknologi pemanfaatannya. Salah satu contoh pemanfaatan yang signifikan adalah *Solar Water Heater* (SWH), meskipun masih memiliki tantangan dalam hal efisiensi ekonomis.

Untuk mengatasi masalah ini, solusi yang tepat adalah menambahkan *Thermal Energy Storage* (TES) ke dalam sistem SWH. *Thermal Energy Storage* (TES) adalah cara untuk menyimpan sementara energi panas atau dingin dengan tujuan menghemat energi yang dihasilkan oleh *Solar Water Heater* sehingga dapat digunakan saat dibutuhkan. *Phase Change Material* (PCM) digunakan sebagai media penyimpanan termal, dan ini juga dapat memperpanjang waktu penggunaan sistem SWH yang menggunakan energi terbarukan, terutama ketika PCM mengalami perubahan fasa yang menyebabkan penyerapan atau pelepasan panas. (Prianto et al., 2021).

Material yang digunakan untuk menyimpan kalor laten, atau yang dikenal sebagai *Phase Change Material* (PCM), adalah bahan yang ketika menyerap kalor, mengalami perubahan fase, biasanya dari fase padat ke fase cair. Perubahan fase ini terjadi pada suhu yang relatif tetap. Penggunaan

metode penyimpanan kalor dalam bentuk kalor laten ini umum karena memiliki kapasitas penyimpanan yang jauh lebih besar daripada penyimpanan kalor dalam bentuk kalor sensibel.

PCM yang ideal untuk digunakan dalam sistem penyimpanan kalor harus memiliki sifat termal yang baik. Ini mencakup memiliki suhu perubahan fase yang sesuai dengan aplikasi yang dimaksud, memiliki kapasitas kalor laten yang tinggi, dan kemampuan transfer panas yang efisien. Oleh karena itu, saat memilih PCM untuk penggunaan tertentu, perlu mempertimbangkan apakah suhu pemanasan dan pendinginan sesuai dengan suhu perubahan fase PCM yang akan digunakan. (Korawan, 2019b).

PCM padat ke cair memiliki kesetimbangan fase yang baik, kepadatan tinggi, perubahan volume kecil, dan tekanan uap rendah pada suhu operasi selama transisi fase. Selain itu, PCM padat ke cair juga menunjukkan sedikit atau tidak ada subpendinginan selama pembekuan, peleburan/pembekuan pada suhu dan pemisahan fasa yang sama, dan laju kristalisasi yang memadai. Ada banyak faktor yang mempengaruhi efektivitas dan penerapan PCM padat ke cair antara lain kapasitas panas, konduktivitas termal, panas laten, suhu transisi fasa, dan sebagainya. Dalam kasus PCM padat ke padat, panas transisi fasenya jauh lebih kecil dibandingkan PCM padat ke cair (Peng et al., 2020).

Berdasarkan uraian diatas penulis akan menganalisa kinerja dari sebuah alat uji termal dengan elemen pemanas keramik heater. Alat ini digunakan untuk menganalisa proses *melting* (mencair) dan *solidification* (membeku)

dengan menggunakan *paraffin wax* dan *stearic acid* sebagai bahan pengujian. Dengan menggunakan PCM sebagai bahan pengujian, alat uji termal dapat digunakan untuk menguji material atau produk yang memiliki karakteristik termal yang berbeda-beda. PCM yang berbeda dapat dipilih untuk mensimulasikan berbagai kondisi termal yang beragam.

B. Batasan Masalah

Penelitian ini juga memberikan pembatasan masalah yakni pengujian dilakukan dengan rencana data awal yang ditetapkan sebagai berikut:

1. Jenis PCM yang akan di uji adalah *Paraffin Wax* dan *stearic Acid*.
2. Dalam studi ini, digunakan sebuah wadah yang memiliki bentuk persegi panjang dengan dimensi panjang sekitar 280 mm, lebar 180 mm, tinggi 200 mm yang terbuat dari bahan kaca dengan tebal kaca 10 mm dan disekat dengan plat aluminium dengan tebal plat 2 mm.
3. Media pemanas menggunakan keramik heater 220V/230V 500W yang di tempatkan di bagian bawah alat.
4. Pengamatan percobaan atau pengujian proses peleburan PCM dengan temperatur keramik heater mencapai 100°C.
5. Dalam proses peleburan PCM, dilakukan pencatatan waktu dan pemantauan suhu PCM hingga PCM melebur sepenuhnya.
6. Saat mengalami proses pembekuan PCM, waktu dan suhu PCM terus dicatat hingga PCM sepenuhnya membeku.
7. Pembekuan PCM terjadi secara alami tanpa adanya pemberian sumber panas tambahan.

8. Alat ukur suhu yang digunakan sebanyak sebelas unit dengan jenis termometer digital.

C. Rumusan Masalah

Dalam pembuatan alat ini ada beberapa rumusan masalah yang saya buat yaitu:

1. Bagaimana desain dan cara kerja alat uji *thermal*?
2. Performansi alat uji thermal (*melting* dan *solidification*) pada PCM (*paraffin* dan *Stearic Acid*)?

D. Tujuan dan Manfaat

1. Tujuan

Tujuan dari pengujian performansi alat uji termal PCM sebagai bahan penguji adalah sebagai berikut:

- a. Menganalisis dan mengevaluasi pengaruh penggunaan PCM sebagai bahan penguji pada performansi alat uji termal. Tujuan ini adalah untuk memahami bagaimana PCM dapat mempengaruhi karakteristik termal alat uji dan mengidentifikasi keuntungan atau kerugian penggunaannya.
- b. Mempelajari karakteristik termal dari PCM yang digunakan dalam alat uji termal, seperti suhu transisi fase, kapasitas kalor, laju perubahan fase, dan stabilitas termal. Hal ini membantu dalam pemilihan PCM yang sesuai untuk aplikasi tertentu dalam alat uji termal.

- c. Mengidentifikasi performansi alat uji termal dengan menggunakan PCM. Tujuannya adalah untuk mencari solusi atau perubahan desain yang dapat mengoptimalkan efisiensi dan akurasi alat uji termal ketika menggunakan PCM sebagai bahan penguji.
- d. Mengetahui batasan atau kendala dalam penggunaan PCM pada alat uji termal. Hal ini membantu dalam menyadari keterbatasan teknis atau praktis yang mungkin mempengaruhi implementasi PCM dalam alat uji termal.
- e. Penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi pada pemahaman tentang penggunaan PCM dalam alat uji termal serta memberikan wawasan bagi penelitian lebih lanjut di bidang ini. Selain itu, informasi yang diperoleh dari penelitian ini dapat diaplikasikan oleh industri yang menggunakan alat uji termal untuk pengujian material dan produk.

2. Manfaat

Pengujian performansi alat uji termal PCM sebagai bahan penguji memberikan sejumlah manfaat yang penting, antara lain:

- a. Dengan menggunakan PCM sebagai bahan penguji, alat uji termal dapat digunakan untuk menguji material atau produk yang memiliki karakteristik termal yang berbeda-beda. PCM yang berbeda dapat dipilih untuk mensimulasikan berbagai kondisi termal yang beragam.

- b. PCM dapat membantu dalam mencapai stabilitas suhu yang lebih baik selama pengujian, yang berarti pengujian dapat dilakukan dengan tingkat akurasi yang lebih tinggi. Hal ini penting dalam pengujian material atau produk yang sangat sensitif terhadap perubahan suhu.
- c. Pengujian performansi alat uji termal PCM memastikan bahwa alat tersebut dapat menghasilkan data yang akurat dan konsisten tentang konduktivitas termal bahan PCM. Hal ini penting untuk menghindari kesalahan pengukuran yang dapat mempengaruhi interpretasi dan pengambilan keputusan yang berkaitan dengan sifat termal PCM.
- d. Dengan menggunakan PCM sebagai bahan penguji, alat uji termal dapat digunakan untuk menguji material atau produk yang memiliki karakteristik termal yang berbeda-beda. PCM yang berbeda dapat dipilih untuk mensimulasikan berbagai kondisi termal yang beragam.
- e. Penelitian tentang penggunaan PCM dalam alat uji termal juga dapat mendorong pengembangan teknologi lanjutan terkait PCM dan aplikasinya, yang dapat memberikan dampak positif dalam berbagai bidang seperti energi, material, dan lingkungan.

E. Sistematika Penulisan

Dalam merancang laporan skripsi ini, diterapkan struktur penulisan dengan langkah-langkah berikut:

BAB I Pendahuluan

Bagian ini meliputi latar belakang, perumusan masalah, pembatasan masalah, tujuan dan kegunaan, serta tata cara penyusunan. Ini adalah bagian inti dari laporan skripsi karena berisi semua yang diharapkan dari hasil laporan tersebut.

BAB II Landasan Teori dan Tinjauan Pustaka

Bab ini mencakup penjelasan mengenai dasar teoritis dan landasan pengetahuan yang mendukung pendekatan dalam menyelesaikan masalah. Teori ini diperoleh dari berbagai sumber literatur yang relevan dengan topik yang akan dibahas, dengan tujuan untuk membantu dalam analisis masalah serta merumuskan kesimpulan awal.

BAB III Metode Penelitian

Pada Bab ini menerangkan tempat dan waktu penelitian, bahan dan alat penelitian, jenis dan variabel penelitian, cara pengumpulan data serta cara analisis data.

BAB IV Hasil Penelitian dan Pembahasan

Pada bab ini akan membahas tentang metodologi penelitian yang digunakan pada penulisan skripsi. Bab ini berisi hasil penelitian dan pembahasan.

BAB V Simpulan dan Saran

Bab ini merupakan bab terakhir penulisan skripsi yang harus memuat kesimpulan dan saran. Bab ini menyimpulkan hasil penelitian dan memberikan rekomendasi berupa saran-saran.

Daftar Pustaka

Lampiran

BAB II

LANDASAN TEORI DAN TINJAUAN PUSTAKA

A. Landasan Teori

1. *Phase Change Material* (PCM)

Material perubahan fase (PCM) adalah substansi yang memiliki kemampuan untuk menampung dan melepaskan sejumlah besar energi termal ketika mengalami perubahan wujudnya. Pada fase padat, PCM memiliki konduktivitas termal yang relatif tinggi, serupa dengan konduktivitas termal bahan padat lainnya. Beberapa contoh PCM padat yang umum digunakan adalah *paraffin*, asam stearat, atau garam tertentu. Namun, saat PCM mengalami fase menjadi cair atau dari cair ke padat, konduktivitas termalnya cenderung menurun. Hal ini dikarenakan selama perubahan fase, energi termal digunakan untuk merombak struktur molekul dalam bahan, sehingga transfer panas melalui konduksi menjadi terhambat. Perubahan fase PCM ini memungkinkan penyimpanan dan pelepasan energi termal yang efisien pada suhu tertentu.

Perubahan fase terjadi saat sebuah materi mengalami transformasi dalam keadaan fisiknya, seperti perubahan dari keadaan padat ke keadaan cair atau dari keadaan cair ke keadaan gas. Dalam proses perubahan fase ini, energi panas ditransfer untuk mengubah tata letak atau keadaan molekul dalam bahan. Selama perubahan fase dari padat menjadi cair, konduktivitas termal bahan akan meningkat. Hal ini terjadi

karena pada fase padat, molekul-molekul saling berdekatan dengan erat dan terikat secara kuat, sehingga konduktivitas termalnya relatif rendah. Namun, ketika sudah meleleh, molekul-molekul tersebut memiliki kebebasan gerak yang lebih besar dan dapat saling bergerak dengan lebih mudah. Ini menghasilkan jalur-jalur yang lebih efisien untuk transfer panas melalui bahan, sehingga konduktivitas termalnya meningkat.

Selain itu, perubahan fase juga dapat terjadi pada saat mengalami perubahan dari cair ke padat, yang disebut titik bekunya (*solid*). Pada fase cair, konduktivitas termal relatif tinggi karena molekul-molekulnya dapat bergerak dengan leluasa. Namun, saat pendinginan dan pembekuan terjadi, molekul-molekul akan kembali ke tata letak yang lebih teratur dan terikat secara lebih kuat, sehingga konduktivitas termalnya kembali menurun. Dengan demikian, pengaruh perubahan fase terhadap konduktivitas termal dapat dijelaskan dengan perubahan struktur molekul dan keadaan fisik bahan selama perubahan fase tersebut terjadi.

Itulah sebabnya, ketika memilih material perubahan fase (PCM) untuk aplikasi tertentu, sangat penting untuk mempertimbangkan temperatur pemanasan dan pendinginan yang sesuai dengan temperatur perubahan fase PCM tersebut. Jika PCM memiliki kapasitas kalor yang tinggi, ini dapat mengakibatkan penurunan ukuran fisik dari wadah penyimpanan.

Karakteristik fisik dari material perubahan fase (PCM) mencakup keseimbangan fase, densitas tinggi, perubahan volume yang minim, serta tekanan penguapan yang rendah. Keseimbangan fase selama proses peleburan dan pembekuan bermanfaat dalam mengatur suhu penyimpanan panas, sementara densitas tinggi akan mengurangi ukuran wadah penyimpanan. Perubahan volume yang kecil dan tekanan penguapan yang rendah juga akan mengurangi masalah dalam hal penampungan.

Aspek kimia juga harus dipertimbangkan dalam pemilihan material perubahan fase (PCM), termasuk stabilitas jangka panjang, kompatibilitas dengan bahan konstruksi, sifat non-toksik, dan ketahanan terhadap bahaya kebakaran. PCM dapat mengalami degradasi akibat berbagai faktor seperti hilangnya air selama proses hidrasi, dekomposisi kimia, atau ketidakcocokan dengan material konstruksi. Selain itu, PCM harus memiliki sifat non-toksik, tidak mudah terbakar, dan tahan terhadap potensi bahaya ledakan untuk menjaga keselamatan. Di samping pertimbangan tersebut, aspek ekonomi juga penting, yaitu ketersediaan yang mencukupi dan efisiensi penggunaan yang baik.

Paraffin sebagai salah satu material perubahan fase (PCM) menarik perhatian karena memiliki sifat-sifat yang menguntungkan, termasuk ketahanan terhadap korosi, stabilitas, dan keamanan. Selain itu, *paraffin* memiliki karakteristik termal yang baik dan tidak cenderung berinteraksi dengan wadah penyimpanan yang digunakan. Harga

paraffin terjangkau, dan ketersediaannya melimpah dan mudah diakses di alam. Semua ini menjadi faktor pertimbangan yang sangat penting dalam memilih *paraffin* sebagai bahan penyimpanan panas. (Korawan, 2019b).

2. Perpindahan panas

Perpindahan panas adalah proses di mana energi berpindah akibat perbedaan suhu antara dua lokasi yang berbeda. Ini melibatkan masuk dan keluarnya panas. Faktor penentu utama dalam perpindahan panas adalah adanya perbedaan suhu. Arus perpindahan panas selalu bermula dari daerah dengan suhu lebih tinggi menuju ke daerah dengan suhu yang lebih rendah. Perpindahan panas bisa terjadi dalam bentuk proses tunggal atau dalam bentuk proses ganda.

Alat pengujian termal juga bergantung pada prinsip perpindahan panas antara objek yang diuji dan lingkungan sekitarnya. Perpindahan panas dapat terjadi melalui konduksi (transfer panas melalui kontak langsung), konveksi (transfer panas melalui aliran fluida), atau radiasi (transfer panas melalui gelombang elektromagnetik).

a). Perpindahan kalor secara konduksi

Konduksi adalah perpindahan energi yang terjadi ketika dua objek berada dalam kontak fisik dan memiliki perbedaan suhu. Dalam kondisi seperti itu, panas mengalir dari objek yang memiliki suhu lebih tinggi ke objek yang memiliki suhu lebih rendah,

sehingga keduanya mencapai suhu yang sama pada suatu titik kesetimbangan termal.

$$W = Q = m \cdot c \cdot \Delta T$$

$$m_{air} = \rho_{air} \cdot V_{air} \dots\dots\dots (2.1)$$

Keterangan:

- W : usaha (Joule)
 s : perpindahan (m)
 m : massa (kg)
 c : kalor jenis ($J/kg \text{ } ^\circ K$)
 ΔT : selisih suhu akhir dan suhu awal ($^\circ K$)

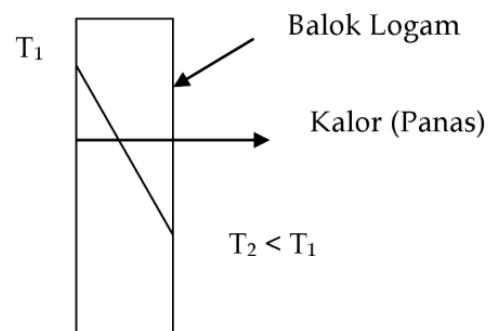
Sedangkan:

$$\dot{q} = \frac{dq}{dt} = -kA \frac{\Delta T}{z} \dots\dots\dots (2.2)$$

- \dot{q} : laju perpindahan panas (J/s)
 k : konduktivitas termal ($W/m \cdot ^\circ K$)
 A : laju penampang yang terletak pada aliran panas (m^2)
 t : waktu (s)
 T : suhu ($^\circ K$)

Konduksi steady state adalah jenis perpindahan panas melalui konduksi di mana perbedaan suhu yang mendorong perpindahan panas adalah konstan dan setelah mencapai keseimbangan, distribusi suhu di dalam objek yang mengalami konduksi tidak mengalami perubahan. Dalam kondisi steady state, jumlah panas yang masuk ke suatu area atau titik dalam objek sama dengan jumlah panas yang keluar dari area atau titik tersebut.

Konduksi transient terjadi ketika suhu objek mengalami perubahan seiring berjalannya waktu. Analisis sistem dalam keadaan transient ini lebih kompleks dan seringkali memerlukan metode analisis numerik menggunakan komputer untuk aplikasi yang lebih tepat.



Gambar 2.1 Balok logam dilalui panas

Sumber: (Iskandar & MT, 2015)

b). Perpindahan kalor secara konveksi

Perpindahan panas konveksi adalah suatu proses di mana panas berpindah dari satu tempat ke tempat lain karena adanya pergerakan fluida. Proses ini umumnya terjadi pada cairan dan gas. Konveksi bisa terjadi akibat perbedaan suhu yang mengakibatkan perubahan densitas fluida dan menghasilkan aliran panas bersamaan dengan aliran massa fluida. Selain itu, konveksi juga bisa terjadi ketika fluida dipaksa bergerak melalui penggunaan pompa atau gaya lainnya. Hal ini terjadi dalam berbagai situasi, seperti ketika panas berpindah antara permukaan solid dan permukaan fluida dalam kontak.

$$Q_{konv} = hA_s(T_s - T_\infty) \dots \dots \dots (2.3)$$

Keterangan:

H : Koefisien Konveksi ($W/m^2 \cdot ^\circ C$)

A_s : Luas permukaan kolektor surya (m^2)

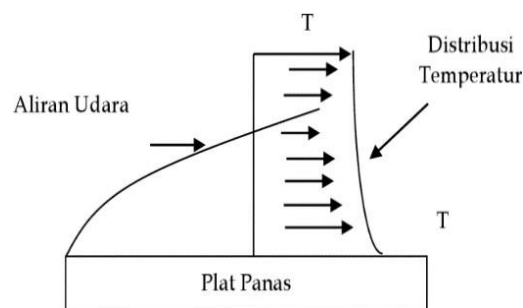
T_s : Temperatur permukaan ($^\circ C$)

T_∞ : Temperatur fluida ($^\circ C$)

Q_{konv} : Laju perpindahan panas (watt)

Koefisien konveksi adalah nilai yang dapat diestimasi menggunakan persamaan berikut:

$$h = \frac{Nu k}{L}$$



Gambar 2.2 Perpindahan Panas dengan Konveksi

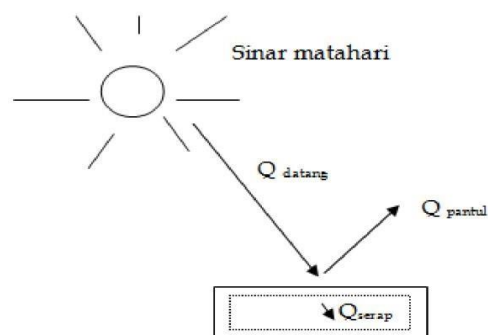
Sumber: (Iskandar & MT, 2015)

c). Perpindahan kalor secara radiasi

Radiasi termal adalah proses pelepasan energi oleh sebuah benda dalam bentuk gelombang elektromagnetik sebagai akibat dari energi termal yang tersimpan di dalamnya. Proses perpindahan panas melalui radiasi terjadi pada semua benda yang memiliki suhu di atas nol mutlak. Radiasi termal dapat terjadi bahkan dalam ruang hampa

udara, tanpa adanya media perantara. Ini memungkinkan panas untuk dipindahkan dari benda yang memiliki suhu relatif tinggi ke benda lain yang memiliki suhu lebih rendah dengan melewati ruang di antara keduanya. Yang menarik adalah bahwa perpindahan panas melalui radiasi tidak memerlukan adanya kontak molekuler antara benda-benda tersebut. Jumlah energi panas yang dipindahkan melalui radiasi ditentukan oleh selisih suhu antara kedua benda dan sifat permukaan dari masing-masing benda tersebut.

$$q = \tau A T^4$$



Gambar 2.3 Perpindahan Panas dengan Radiasi

Sumber: (Iskandar & MT, 2015)

3. Konduktivitas termal

Konduktivitas termal adalah kemampuan suatu materi untuk mengalirkan panas atau energi termal melalui proses konduksi, yang merupakan perpindahan panas melalui kontak langsung antara partikel-partikel dalam bahan tersebut. Ini merupakan parameter yang menggambarkan kemampuan bahan untuk menghantarkan panas.

Setiap bahan memiliki nilai konduktivitas termal yang berbeda-beda. Ada keterkaitan langsung antara nilai konduktivitas termal dan kemampuan materi tersebut dalam mengalirkan panas, dengan semakin tinggi nilai konduktivitas termal, maka kemampuan materi dalam menghantarkan panas juga semakin besar. (Alim et al., 2017).

Bahan-bahan dengan konduktivitas termal tinggi memiliki kemampuan yang baik untuk menghantarkan panas, sedangkan bahan-bahan dengan konduktivitas termal rendah memiliki kemampuan yang buruk untuk menghantar panas. Misalnya, logam seperti tembaga dan aluminium memiliki konduktivitas termal yang tinggi, sehingga mereka efisien dalam menghantar panas. Di sisi lain, bahan isolator termal memiliki konduktivitas termal yang rendah, sehingga mereka cenderung menjadi isolator termal yang baik. Konduktivitas termal suatu bahan dapat dipengaruhi oleh beberapa faktor, termasuk struktur kristal bahan, keberadaan impuritas, dan suhu. Pada umumnya, konduktivitas termal logam meningkat dengan suhu, sementara pada isolator termal, konduktivitas termal biasanya menurun seiring dengan peningkatan suhu.

Dalam proses konduksi panas, energi panas mengalir dari tempat dengan suhu lebih tinggi menuju tempat dengan suhu yang lebih rendah. Semakin besar selisih suhu antara kedua tempat tersebut, semakin besar pula laju perpindahan panas yang terjadi. Konduktivitas termal menggambarkan kemampuan medium untuk menghantarkan panas, di

mana material dengan konduktivitas termal yang tinggi dapat mengalir panas dengan lebih baik. Hukum Fourier menyatakan bahwa tingkat perpindahan panas melalui suatu materi bergantung pada sejauh mana perbedaan suhu antara dua titik di materi tersebut, serta pada luas permukaan kontak di antara dua titik tersebut. Selain itu, hukum ini juga memperhitungkan sudut antara gradien suhu dan arah perpindahan panas dalam materi. Semakin besar perbedaan suhu, luas kontak, dan semakin sejajar gradien suhu dengan arah aliran panas, semakin cepat panas akan mengalir melalui materi tersebut. Hukum Fourier pada konduksi panas sangat penting dalam berbagai aplikasi termal, seperti desain sistem pemanasan dan pendinginan, analisis termal pada material dan struktur, serta perhitungan suhu dalam sistem termal kompleks.

Konduktivitas termal adalah kemampuan suatu bahan untuk menghantarkan panas. Untuk mengukur konduktivitas termal, terdapat beberapa metode yang sering digunakan, salah satunya:

- a). Metode Komparatif: Metode ini melibatkan perbandingan konduktivitas termal suatu bahan dengan konduktivitas termal bahan referensi yang diketahui. Dalam metode ini, panas diaplikasikan pada dua ujung bahan yang akan diuji, dan suhu diukur pada kedua ujung tersebut. Perbedaan suhu dan panas yang ditransmisikan melalui bahan digunakan untuk menghitung konduktivitas termalnya.

- b). Metode Inkremental: Metode ini melibatkan pengukuran laju transfer panas melalui bahan selama periode waktu tertentu. Metode ini memerlukan perlakuan panas yang diketahui dan pengukuran suhu pada titik-titik tertentu di sepanjang bahan. Dengan menggunakan hukum Fourier untuk transfer panas, konduktivitas termal bahan dapat dihitung.
 - c). Metode Langsung: Metode ini melibatkan pengukuran suhu dan laju transfer panas secara simultan pada bahan yang sedang diuji. Beberapa metode langsung yang umum digunakan termasuk metode plat panas (hot plate method), metode busi panas (hot wire method), dan metode probe termal (thermal probe method).
 - d). Metode Non-Kontak: Metode ini digunakan untuk mengukur konduktivitas termal bahan tanpa harus memasukkan sensor ke dalam bahan itu sendiri. Misalnya, metode inframerah termografi dapat digunakan untuk mengukur distribusi suhu pada permukaan bahan, dan dari situ konduktivitas termalnya dapat diestimasi.
 - e). Metode Numerik: Metode ini menggunakan simulasi komputer atau model matematika untuk memprediksi konduktivitas termal bahan. Metode numerik ini memanfaatkan sifat fisik dan parameter bahan untuk menghitung konduktivitas termal secara teoritis.
4. Panas Laten dan Panas Sensibel Pada PCM
- a). Panas sensibel

Penyimpanan panas sensibel adalah metode penyimpanan energi panas dengan menaikkan suhu bahan padat atau cair. Panas yang tersimpan dapat dilepaskan ketika suhu menurun dan diperlukan. Bahan yang digunakan dalam penyimpanan panas sensibel harus mempunyai kapasitas panas yang tinggi dan titik didih atau titik leleh yang tinggi.

Dalam penyimpanan panas sensible (SHS), energi panas disimpan dengan meningkatkan suhu pada material padat atau cair. Oleh karena itu, jumlah panas sensible yang dapat disimpan bergantung pada nilai panas jenis material, perubahan suhu selama proses penyerapan dan pelepasan panas pada material tersebut. Dalam konteks ini, kuantitas panas yang dapat disimpan melalui panas sensibel dapat dihitung menggunakan suatu rumus atau persamaan.

$$Q = \int_{T_i}^{T_f} m C_p dT = m C_p (T_f - T_i) \dots\dots\dots(2.4)$$

b). Panas Laten

Panas laten adalah bagian dari perubahan suhu yang terjadi secara adiabatik yang dilepaskan atau diserap dari lingkungan akibat perubahan fase air. Sebagai contoh, saat air berubah dari fase gas ke fase cair, panas laten kondensasi dilepaskan, memiliki nilai sekitar 600 kalor. Sebaliknya, saat air berubah dari fase cair ke fase gas, panas laten evaporasi diserap. Ini menjadi fokus utama dalam

penelitian ini, terutama dalam konteks eksplorasi energi alternatif yang ramah lingkungan. (Adikusumah & Suryantoro, 2015).

Bahan berubah fase (PCM) yang mengalami perubahan dari bentuk padat ke cair adalah substansi yang sesuai untuk penyimpanan panas dan dingin, dan bisa menjadi solusi yang berpotensi untuk meningkatkan pengendalian suhu pada bangunan. Hal ini karena PCM mampu menyimpan lebih banyak energi dalam bentuk latent daripada energi sensibel yang dapat disimpan oleh bahan bangunan biasa. Penyimpanan panas laten adalah metode yang paling umum (ΔQ).

$$\Delta Q = C \cdot \Delta T = mc \cdot \Delta T \dots\dots\dots(2.5)$$

Keterangan:

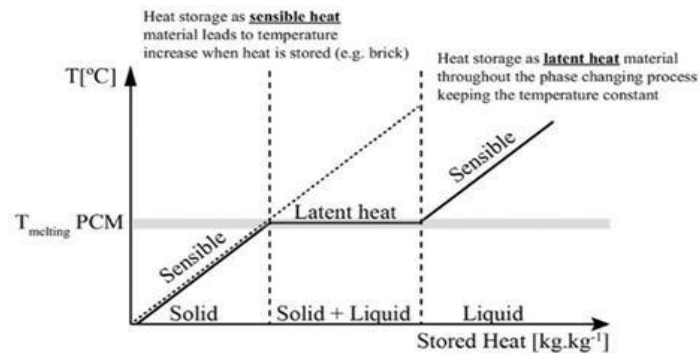
C : kapasitas kalor (Joule)

m : massa bahan (kg)

c : kalor jenis bahan ($J/kg \text{ } ^\circ K$)

ΔT : selisih suhu akhir dan suhu awal ($^\circ K$)

Bahan yang berbeda memiliki kapasitas panas C yang berbeda, yang menyebabkan panas masuk akan dipengaruhi oleh sifat bahan dan suhu aplikasi. Kontrol suhu pada PCM dapat menyerap dan melepaskan energi panas tanpa perubahan suhu yang signifikan, yang menunjukkan bahwa PCM dapat digunakan untuk menjaga stabilitas suhu dan perubahan suhu selama penyimpanan dan penyediaan energi kecil.



Gambar 2.4 Penyimpanan panas laten untuk padat ke cair

Sumber: (Yang et al., 2019)

5. Alat ukur suhu

Alat pengukur merujuk kepada perangkat yang digunakan untuk menilai atau mengukur objek atau peristiwa tertentu. Semua alat pengukur bisa mengalami ketidakakuratan yang bervariasi. Secara umum, ada dua jenis alat pengukur yang umum digunakan, yaitu alat pengukur absolut dan alat pengukur sekunder. Alat pengukur absolut sering digunakan sebagai standar pengukuran di laboratorium karena memiliki tingkat ketelitian yang sangat tinggi. Termometer, yang sering disebut sebagai instrumen pengukur suhu, adalah alat yang digunakan untuk mengukur suhu. Pemilihan tipe termometer yang paling sesuai untuk digunakan pada suatu waktu tertentu bergantung pada sejumlah faktor, seperti rentang suhu yang perlu diukur, tingkat akurasi yang diinginkan, dan sifat fisik dari bahan yang sedang diuji. (Hersandi et al., 2021)

Terdapat beberapa jenis termometer yang berbeda, yang masing-masing dirancang untuk mengukur suhu dalam berbagai situasi. Terdapat berbagai jenis termometer yang dibedakan berdasarkan cara operasinya:

a). Termometer raksa

Termometer raksa adalah jenis termometer yang sering digunakan untuk mengukur suhu tubuh. Cara penggunaannya melibatkan memasukkan termometer ini ke dalam area tubuh tertentu. pada umumnya mulut atau ketiak. Ketika berinteraksi dengan obyek yang diukur, akan terjadi perpindahan panas yang menyebabkan peningkatan atau penurunan suhu. Perubahan ini akan mempengaruhi raksa dalam tabung termometer.(Perdana et al., 2023)

Meskipun mudah dalam penggunaannya, termometer raksa saat ini sudah tidak digunakan secara umum lagi untuk mengukur suhu tubuh, karena tabung kaca termometer yang rentan pecah, sehingga dapat mengakibatkan raksa terkena kulit tubuh dan menyebabkan iritasi (Perdana et al., 2023).

b). Termometer digital

Termometer digital memiliki komponen pengukur suhu yang sangat akurat. Selain akurasinya yang tinggi, termometer digital juga memiliki harga yang terjangkau untuk masyarakat umum (Perdana et al., 2023).

Termometer digital memiliki kemampuan untuk mendeteksi suhu dengan bantuan sensor. Ketika digunakan untuk mengukur suhu suatu objek, tegangan pada output sensor termometer akan berubah. Perubahan tersebut kemudian diubah menjadi angka yang menunjukkan nilai suhu yang diukur. (Perdana et al., 2023).

c). Termometer inframerah

Termometer inframerah memiliki perbedaan yang mendasar dengan jenis termometer raksa maupun termometer digital. Perbedaannya adalah, pada termometer inframerah tidak memakai prinsip perambatan panas secara konduksi, melainkan melalui radiasi. Radiasi inilah yang kemudian akan ditangkap oleh termometer inframerah dan ditunjukkan pada layar sebagai nilai suhu suatu obyek yang diukur (Perdana et al., 2023)

d). Termokopel

Termokopel dapat mengukur suhu dalam rentang suhu yang luas dengan tingkat kesalahan pengukuran kurang dari 1°C. Termokopel terdiri dari dua kawat logam konduktor yang digabungkan pada ujungnya untuk membentuk ujung pengukuran. Konduktor-konduktor ini akan mengalami perubahan suhu, dan perbedaan suhu antara ujung pengukuran dengan ujung kedua dari kawat logam konduktor yang terpisah akan menghasilkan tegangan listrik. (Rahmat, 2015).

Termokopel adalah sensor suhu yang sering digunakan dalam berbagai aplikasi, seperti dalam pengaturan suhu pada boiler. Dalam penggunaannya, termokopel biasanya diintegrasikan atau dihubungkan dengan pengendali suhu (temperature controller) yang bertindak sebagai pembaca dan pengatur suhu boiler tersebut. (Rahmat, 2015).

6. Elemen pemanas

Elemen pemanas adalah perangkat atau bagian dalam suatu sistem yang dirancang untuk menghasilkan panas. Elemen ini menggunakan energi listrik untuk menghasilkan panas dan mempertahankan suhu yang diinginkan dalam suatu sistem. Elemen pemanas, terutama elemen pemanas listrik, memiliki beberapa sifat yang mendasari fungsinya dalam menghasilkan panas. Beberapa sifat ini melibatkan prinsip-prinsip fisika dan listrik. Fungsi elemen pemanas sangat bervariasi dan bergantung pada kebutuhan spesifik aplikasi.

Penggunaan elemen pemanas untuk mengubah energi biasanya melibatkan penggunaan kawat nikelin yang dibentuk menjadi lilitan. Nikelin dipilih karena kemampuannya dalam menghantarkan panas dan memiliki resistivitas tinggi, sehingga dianggap sebagai penghantar yang ideal. Elemen pemanas pada kalorimeter biasanya berbentuk spiral untuk memastikan distribusi panas yang merata. Namun, bentuk-bentuk lain pada elemen pemanas juga dapat dijelajahi untuk penelitian lebih lanjut. (Hersandi et al., 2021).

Selain komponen pemanas, perangkat pemanas juga terdiri dari elemen terminasi, timah, lapisan insulasi, selubung, dan elemen segel. Ragam bentuk dan konfigurasi pemanas ini disesuaikan dengan kebutuhan aplikasi tertentu. Terdapat beberapa jenis elemen pemanas yang digunakan dalam berbagai aplikasi. Beberapa jenis umum termasuk:

a). Pemanas keramik

Pemanas ini menggunakan keramik sebagai bahan, yang memiliki titik lebur tinggi, stabilitas termal yang tinggi, ketahanan pada suhu tinggi, ketahanan kimia yang tinggi, dan kapasitas panas yang rendah. Dikarenakan kemampuan konduktivitas panas yang baik, bahan ini digunakan untuk mengalirkan dan menyebarkan panas dari elemen pemanas. Pemanas keramik masuk ke dalam kategori elemen pemanas listrik. Pemanas ini menggunakan elemen pemanas yang terbuat dari bahan keramik, seperti oksida aluminium atau karbida silikon. Elemen pemanas keramik ini sering digunakan dalam berbagai aplikasi, termasuk pemanas ruangan, pemanas udara, dan peralatan pemanas lainnya.



Gambar 2.5 Keramik heater

Sumber: (Hakim et al., 2017)

b). Band heater

Alat pemanas ini dirancang khusus untuk melingkupi permukaan atau wadah logam berbentuk silinder, seperti pipa, tong, drum, ekstruder, dan sejenisnya. Dilengkapi dengan pengunci berupa tab yang terpasang dengan baut untuk mengamankan penjepitan pada permukaan wadah, pemanas ini memiliki konstruksi yang cermat. Dalam rancangan struktur pemanas ini, terdapat kawat atau pita resistansi yang tipis dan biasanya diisolasi oleh lapisan mika. Lapisan pelindungnya terbuat dari bahan tahan karat atau kuningan. Keuntungan dari penggunaan pemanas ini meliputi kemampuannya untuk memanaskan secara tidak langsung cairan di dalam wadah. Hal ini disebabkan karena pemanas tidak langsung terpapar oleh fluida proses, sehingga risiko reaksi kimia yang dapat merusak pemanas dapat diminimalkan. Keuntungan lainnya adalah pencegahan kemungkinan penyalaan saat digunakan untuk layanan oli dan pelumas. Dengan demikian, pemanas ini menawarkan solusi

yang aman dan efisien untuk aplikasi pemanasan pada berbagai jenis wadah logam berbentuk silinder.

c). Elemen pemanas air

Alat pemanas tipe ini difungsikan untuk menghangatkan aliran air yang mengalir. Bagian inti dari pemanas air ini terdiri dari tabung atau pipa yang diberi panas, dengan satu ujungnya berperan sebagai tempat masuknya udara dingin, sementara ujung lainnya berfungsi sebagai tempat keluarnya udara yang telah dipanaskan. Di sepanjang permukaan luar pipa tersebut, terdapat elemen pemanas yang tergulung dan diisolasi dengan lapisan keramik serta gasket yang tidak konduktif terhadap panas. Umumnya, pemanas ini digunakan pada kondisi di mana aliran air memiliki tingkat kecepatan tinggi dan tekanan yang relatif rendah.

B. Tinjauan pustaka

1. Jafaryar & Sheikholeslami, (2023) pada penelitian yang berjudul "Simulasi peleburan parafin dengan nanopartikel graphene dalam sistem penyimpanan energi panas matahari" Dari penelitian ini dapat disimpulkan sebagai berikut:

Penerapan struktur baru dan pemuatan nanopartikel Graphene telah dianggap sebagai teknik yang menjanjikan untuk meningkatkan sistem penyimpanan termal. Konsentrasi graphene adalah 0,03 yang merupakan kisaran logis untuk mempertimbangkan teknik fase tunggal untuk menurunkan sifat NEPCM. Domain dua dimensi telah

dipertimbangkan dan istilah sumber pencairan dan daya apung telah dimasukkan. Teknik volume terbatas yang melibatkan metode implisit telah dipilih untuk simulasi. Prosedur numerik diverifikasi dengan membandingkan hasil dengan pekerjaan sebelumnya dan deviasi data yang rendah menggambarkan akomodasi yang baik.

Dalam penelitian ini, desain baru untuk zona parafin telah diperkenalkan dengan mempertimbangkan tabung tripleks. Tiga konfigurasi wadah telah dilibatkan dan volume parafin konstan dalam semua kasus. Untuk mengkompensasi kelemahan parafin murni dalam menyerap panas, bubuk nano graphene dimasukkan ke dalam parafin. Lapisan dalam zona parafin terbuat dari aluminium dan suhu leleh parafin adalah 319,55 °K. Zona parafin terletak di bagian tengah tabung tripleks dan suhu panas seragam (335 °K) untuk kedua dinding annulus telah diterapkan. Tiga geometri wadah diterapkan dengan mengubah sudut sirip ($\alpha = 7,5^\circ, 15^\circ$ dan 30°). Konsentrasi aditif yang seragam diasumsikan melibatkan model homogen untuk memprediksi sifat. Hasil menunjukkan bahwa pemuatan nanopartikel Graphene menyebabkan waktu leleh berkurang sekitar 4,98% ketika $\alpha = 7,5^\circ$ dan dampaknya ϕ meningkat sekitar 5,2% dengan pengurangan sudut dari 30° menjadi $7,5^\circ$. Selain itu, seiring dengan penurunan sudut, periode leleh berkurang sekitar 76,47% yang berhubungan dengan penambahan gaya penggerak (konduksi) pada geometri dengan α yang lebih rendah.

2. Rashid et al., (2022) pada penelitian yang berjudul “Terobosan dan peningkatan terkini dalam pelelehan material perubahan fase dalam unit penyimpanan termal tiga tabung”. Dalam penelitian ini dapat disimpulkan sebagai berikut:

Cara meningkatkan perpindahan panas antara fluida dan material perubahan fasa telah dipelajari. Tingkatkan luas permukaan perpindahan panas, gunakan tabung bersirip atau penukar panas multi-tabung, tambahkan matriks logam ke bahan pengubah fasa, atau gunakan bahan berpori jenuh. Artikel ini menganalisis pengaturan penyimpanan energi panas tabung tripleks (TTTES) dan kemajuan saat ini. Desain dan penyiapan TTTES, serta cara meningkatkan peleburan bahan transisi fase termasuk sirip, nanopartikel, dan keduanya.

Teknik PCM nano sirip memanjang mengurangi waktu leleh sebesar 12% dibandingkan dengan PCM saja, sehingga PCM dapat meleleh dengan cepat (218 menit). Durasi leleh empat sirip unik berkurang 80,35, 77,62, 77,33, dan 80,65 persen. 3%, 6%, dan 9% Al_2O_3 nanopartikel menurunkan waktu leleh PCM masing-masing sebesar 13,1%, 15,6%, dan 18,8%. Untuk TTHX dengan sirip memanjang (12%) dan segitiga (22%), PCM nanopartikel 10% menurunkan waktu leleh dibandingkan Parafin murni. Sirip yang lebih sedikit dan lebih pendek menyempurnakan bagian atas unit. Tergantung pada struktur busa dan konsentrasi nanopartikel, distribusinya nanopartikel dalam busa logam dapat menurunkan waktu leleh hingga

90%. Waktu leleh dalam tabung tripleks tanpa sirip berkurang sebesar 43,3% bila menggunakan penukar panas bersirip internaleksternal. Dibandingkan dengan sirip memanjang, sirip segitiga dalam, dalam – luar dan berbentuk segitiga mengalami peningkatan sebesar 11%, 12%, dan 15%. Meningkatkan laju aliran massa turbulen HTF dan suhu masuk dapat meningkatkan kinerja termal TTHX yang diteliti. Pengaturan media berpori dan eksentrik meminimalkan waktu leleh masing-masing sebesar 81% dan 25%. Dibandingkan dengan sirip horizontal, sirip berundak lebih cepat meleleh. Penggunaan sirip yang mengarah ke bawah ($b/c=0,4$) sebagai pengganti sirip horizontal dapat mempercepat pencairan sebesar 56,3% dalam 800 detik dan 65,5% dalam 3600 detik.

3. Prianto et al., (2021) pada penelitian yang berjudul “Analisis pemanfaatan *paraffin* di *thermal energy storage* pada *solar water heater*”. Dari penelitian ini dapat disimpulkan sebagai berikut:

Dalam penelitian ini, data diambil dengan cara melakukan pengambilan sampel parafin setelah mencapai titik lelehnya, yang berkisar antara 45 hingga 65 °C. Parameter yang menjadi fokus adalah saat terjadi penurunan suhu dari 37 hingga 35 °C. Setelah mengumpulkan semua variasi parameter yang dibutuhkan, dilakukan perhitungan efisiensi dengan menggunakan rumus tertentu.

Pada *Solar Water Heater* (SWH) yang ditingkatkan dengan *Thermal Energy Storage* (TES) berupa parafin sebagai *Phase Change Material* (PCM), waktu penyimpanan panas air dapat diperpanjang lebih lama

daripada SWH tanpa TES. Waktu penyimpanan panas tertinggi yang dicapai dengan penambahan TES adalah 58 menit, sedangkan sistem tanpa TES hanya mampu mencapai waktu penyimpanan panas tertinggi sebesar 50 menit. Perbedaan ini disebabkan oleh fakta bahwa dengan adanya PCM, lebih banyak panas yang dihasilkan oleh sinar matahari dapat disimpan. Panas tersebut kemudian akan dialirkan ke air melalui pipa tembaga melalui konveksi, sehingga sistem dapat menjaga suhu lebih lama.

Penggunaan *Phase Change Material* (PCM) dalam sistem tidak menghasilkan peningkatan efisiensi yang signifikan. Ini disebabkan oleh fakta bahwa PCM memiliki kapasitas penyimpanan energi panas yang jauh lebih kecil daripada jumlah energi yang diperlukan untuk menjaga suhu air dalam tangki saat sistem tidak menerima pasokan energi matahari. Selain itu, semakin banyak eksperimen yang dilakukan dalam penelitian ini, semakin tinggi tingkat ketidakpastian alat ukur. Pada sistem tanpa *Thermal Energy Storage* (TES), semakin tinggi intensitas cahaya matahari yang diterima oleh sistem, semakin rendah efisiensi sistem tersebut. Pada tingkat intensitas sebesar $796,44 \text{ W/m}^2$, efisiensi yang diperoleh adalah sekitar 35,23%, sedangkan pada intensitas $695,66 \text{ W/m}^2$, efisiensi meningkat menjadi sekitar 51,97%. Ini menunjukkan bahwa sistem dengan penambahan *Thermal Energy Storage* (TES) merespons positif terhadap peningkatan intensitas cahaya matahari. Dalam kontras dengan sistem tanpa TES, sistem dengan TES

menunjukkan bahwa semakin tinggi intensitas matahari yang diterimanya, semakin tinggi pula efisiensinya. Pada tingkat intensitas tertinggi, yaitu 809 W/m^2 , efisiensi mencapai sekitar 29,15%, sementara pada tingkat intensitas terendah, yaitu 706 W/m^2 , efisiensi terendah adalah sekitar 14,18%.

Namun, dalam percobaan yang melibatkan penggunaan parafin, efisiensi yang dicapai lebih rendah dibandingkan dengan sistem tanpa penggunaan parafin. Ini disebabkan oleh fakta bahwa jumlah material parafin yang digunakan tidak cukup besar untuk menampung energi yang dikeluarkan. Selain itu, panas yang dihasilkan oleh parafin tidak didistribusikan secara merata dan tidak efisien ditransfer ke pipa tembaga.

4. Xiao et al., (2021) pada penelitian yang berjudul “Studi eksperimental pengaruh titik leleh bahan perubahan fasa terhadap sifat kontrol termal TG/PCM”. Dari penelitian ini dapat disimpulkan sebagai berikut:

Tiga bahan perubahan fasa komposit (PCM) dengan titik leleh puncak 42°C , 50°C dan 58°C dibuat menggunakan fraksi massa asam stearat (SA) dan laurat yang berbeda asam (LA). Struktur model kontrol termal pembangkitan termoelektrik/PCM (TG/PCM) dirancang menggunakan PCM, dan dianalisis mekanisme konversi, transmisi, dan penyimpanan termal internalnya. tiga prototipe eksperimental sistem pembangkit termoelektrik TG/PCM dirancang, dan karakteristik suhu dan daya keluaran dari setiap bagian diuji. Hasilnya menunjukkan

bahwa unit kontrol termal PCM berperan penting dalam menstabilkan perbedaan suhu antara ujung panas dan dingin TG. Pada saat yang sama, titik leleh PCM secara langsung mempengaruhi karakteristik perbedaan suhu ujung dingin dan panas TG. Semakin rendah titik leleh PCM, semakin baik karakteristik perbedaan suhunya. Selain itu, daya keluaran sistem TG/PCM sangat dipengaruhi oleh titik leleh PCM. Ketika titik leleh PCM 42°C, 50°C dan 58°C, total energi keluaran sistem uji TG/PCM masing-masing 73,9 J, 52,4 J, dan 18,9 J, untuk daya keluaran lebih besar dari 6mW. Hasil penelitian memberikan landasan teoritis dan eksperimental untuk desain TG/PCM.

5. Umar, (2020) pada penelitian yang berjudul “Penggunaan material berubah fasa sebagai penyimpan energi termal pada bangunan gedung”. Dari penelitian ini dapat disimpulkan sebagai berikut:

Menggunakan material perubahan fasa sebagai media penyimpanan energi termal dalam bangunan dapat mengurangi konsumsi energi total dalam bangunan tersebut. Sebagai contoh, Phase Change Materials (PCM), dapat diintegrasikan langsung ke dalam beton atau dalam bentuk partikel mikroskopis. Sebagai hasil uji coba, beton yang diperkaya dengan bahan seperti lilin lebah sebagai PCM, mungkin mengalami penurunan kekuatan, tetapi pada saat yang sama, mampu menyerap dan menyimpan energi panas. Analisis awal tentang potensi penggunaan PCM dalam aplikasi bangunan menunjukkan bahwa hal ini dapat mengurangi beban pendinginan dalam ruangan. Namun,

penelitian lebih lanjut dan pengujian lapangan diperlukan untuk memvalidasi manfaat penggunaan PCM dalam konteks bangunan gedung.

6. Peng et al., (2020) pada penelitian yang berjudul “Mikrokapsul bahan perubahan fasa (PCM) untuk penyimpanan energi termal”. Dari penelitian ini dapat disimpulkan sebagai berikut:

Teknologi mikroenkapsulasi digunakan untuk membuat mikrokapsul PCM, sebagai bahan polimer/komposit jenis baru untuk penyimpanan energi panas. Phase Change Materials (PCM) dapat dikelompokkan ke dalam tiga jenis, yaitu bahan organik, bahan anorganik, dan bahan eutektik. Sementara itu, bahan pelindung atau cangkang juga dapat dibagi menjadi tiga kategori, yaitu bahan organik, bahan anorganik, dan bahan hibrida yang terdiri dari unsur organik dan anorganik. Teknik mikroenkapsulasi yang tersedia untuk PCM ditinjau dan diklasifikasikan ke dalam tiga kategori, seperti proses fisik, kimia, dan fisik-kimia. Pemilihan teknik mikrokapsul yang paling sesuai terutama bergantung pada spesifikasi mikrokapsul PCM, termasuk bahan inti/cangkang, ukuran mikrokapsul, ketebalan cangkang, perilaku mekanik, dan sifat termal. Selain itu, makalah tinjauan komprehensif ini meneliti teknologi yang digunakan untuk mengkarakterisasi mikrokapsul PCM. Misalnya, DSC digunakan untuk menganalisis sifat termal, FTIR digunakan untuk mengkarakterisasi struktur dan komposisi kimia, dan AFM digunakan untuk mengukur sifat mekanik.

Sifat termal, fisik, kimia, dan mekanik mikrokapsul PCM sangat bergantung pada bahan baku dan proses sintesis selama mikroenkapsulasi.

Terakhir, penerapan mikrokapsul PCM dalam tekstil, slurry, bangunan, dan busa disajikan dan dijelaskan secara rinci. Mikrokapsul PCM masih memiliki aplikasi potensial lainnya seperti penyimpanan energi matahari menjadi panas, penyimpanan energi listrik menjadi panas, dan biomedis. Hasilnya cukup menjanjikan untuk pemanfaatannya di masa depan dalam praktik. Bahan penyimpanan, masih banyak yang harus dieksplorasi dan ditingkatkan dalam fabrikasi, karakterisasi, dan pemanfaatan komersial. Misalnya, efisiensi enkapsulasi tidak memuaskan, kandungan bahan harus ditingkatkan, ukuran partikel harus diperkecil, dan waktu pengikatan silang terlalu lama. Mengenai metode karakterisasi, diperlukan metode karakterisasi mekanis standar untuk mikrokapsul PCM karena sebagian besar mikrokapsul PCM tidak diuji kebocorannya. Yang terakhir, kendala utama penerapan mikrokapsul PCM di industri adalah pendinginan super yang harus diatasi di masa depan.

7. Yuan et al., (2020) pada penelitian yang berjudul “Rekayasa konduktivitas termal fungsional bahan perubahan fasa untuk konversi energi panas, penyimpanan, dan pemanfaatan”. Dari penelitian ini dapat disimpulkan sebagai berikut:

Berkenaan dengan penyesuaian konduktivitas termal komposit perubahan fasa, ada dua pendekatan utama: menggabungkan nanopartikel konduktif termal tinggi dan merangkumnya ke dalam matriks berpori dengan konduktivitas termal tinggi/rendah. Selama proses konversi dan penyimpanan energi, kemampuan pemanenan energi yang efektif dan konduksi termal yang tinggi dalam PCM secara sinergis memainkan peran penting dalam menentukan kinerja. Komposit perubahan fasa berbasis struktur nano karbon dianggap sebagai struktur yang menjanjikan dalam hal penyimpanan energi panas matahari, sementara nanopartikel magnetik perlu didoping untuk penyimpanan energi magnetotermal. Dengan meningkatkan konduktivitas termal komposit perubahan fasa, kinerja manajemen termal jelas dapat ditingkatkan. Namun, ada ambang batas untuk efek menguntungkan ini pada TMS pasif. Oleh karena itu, TMS hibrid aktif-pasif telah dikembangkan dengan kinerja manajemen termal yang lebih baik dibandingkan TMS pasif. Dioda termal adalah perangkat yang mengontrol arah konduksi termal

Terlepas dari kemajuan terbaru PCM di bidang penelitian terapan, PCM terus menimbulkan tantangan bagi penelitian fundamental yang sangat mendasar. Meskipun ada banyak penelitian tentang peningkatan konduktivitas termal, sebagian besar penelitian masih kurang dalam eksplorasi mekanisme. Mekanisme penelitian konduktif untuk memandu sintesis dan modifikasi PCM serta pengembangan ilmu terapan dasar.

Oleh karena itu, penelitian lebih lanjut tentang mekanisme ini perlu ditelusuri.

8. Okzama & Arwizet, (2019) pada penelitian yang berjudul “Pembuatan dan pengujian alat uji konduktivitas termal bahan”. Dari penelitian ini dapat disimpulkan sebagai berikut:

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk menciptakan sebuah alat uji yang dapat mengukur konduktivitas termal bahan dan melakukan pengujian terhadapnya. Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah eksperimental, di mana kita membuat sebuah prototipe alat uji untuk mengukur konduktivitas termal bahan dengan menggunakan rumus persamaan konduktivitas termal. Bahan yang diuji meliputi kayu, bata, komposit serat ijuk, komposit serabut kelapa, dan campuran serat ijuk dan kelapa. Alat uji memiliki diameter 38,5 mm dan ketebalan 15 mm. Hasil dari penelitian ini mencakup prototipe alat uji konduktivitas termal bahan dan data hasil pengujian. Hasil rata-rata kenaikan suhu T_2 untuk beberapa bahan adalah sebagai berikut: kayu $0,075 - 1,225^{\circ}\text{C}$, bata $0,125 - 0,6^{\circ}\text{C}$, komposit serat ijuk $0,125 - 0,2^{\circ}\text{C}$, komposit serabut kelapa $0,075 - 0,25^{\circ}\text{C}$, dan campuran komposit serat ijuk dan serabut kelapa $0,025 - 0,225^{\circ}\text{C}$. Perlu dicatat bahwa kenaikan suhu terbesar terjadi pada kayu. Hasil nilai konduktivitas termal (K) dari spesimen yang diuji adalah sebagai berikut: kayu $3,93 \text{ w m }^{\circ}\text{C}$, bata $4,01 \text{ w m }^{\circ}\text{C}$, komposit serat ijuk $3,7434 \text{ w m }^{\circ}\text{C}$, komposit serabut kelapa $3,7593 \text{ w m }^{\circ}\text{C}$.

m °C, dan campuran komposit serat ijuk dan serabut kelapa 3,77769 w m °C.

Hasil pengujian yang telah dilakukan terhadap sejumlah spesimen pengujian menunjukkan bahwa alat uji konduktivitas termal bahan yang dibuat telah memberikan hasil pengujian yang sesuai dengan nilai konduktivitas termal bahan yang seharusnya. Nilai hasil pengujian untuk spesimen bahan yang mengandung unsur organik, terutama unsur batu dan kayu, berkisar antara 0,038 hingga 4,15 W/m.°C. Namun, dalam implementasinya, alat ini memiliki beberapa kelemahan, salah satunya adalah ketidakstabilan suhu yang disebabkan oleh fluktuasi daya listrik yang disuplai ke alat, yang tergantung pada sumber daya listrik yang tersedia.

9. Korawan, (2019) pada penelitian yang berjudul “Evolusi peleburan paraffin sebagai material penyimpan kalor (studi kasus pada model *tube-and-shell* versus model *cone-and-shell*)”. Pada penelitian ini dapat disimpulkan sebagai berikut:

Dalam penelitian ini, dilakukan perbandingan eksperimental antara dua jenis penyimpanan panas, yaitu tipe *tube-and-shell* dan tipe *cone-and-shell*. Tujuan penelitian ini adalah untuk mengamati proses peleburan mulai dari awal hingga akhirnya. Tube dan cone dibuat dari bahan tembaga, sementara shell dibuat dari pipa akrilik, dan bagian atas serta bagian bawahnya terbuat dari plastik. Parafin ditempatkan dalam ruang di antara *tube dan shell*. Parafin kemudian dilelehkan dan

dituangkan, kemudian diacuhkan hingga mencapai suhu kamar dan berubah dari wujud cair menjadi padat. Dalam eksperimen ini, digunakan bak air berisi air panas dengan suhu 68°C. Untuk menjaga suhu air tetap konstan, dipasang pemanas yang akan dihidupkan ketika suhu air turun di bawah 68°C, dan dimatikan ketika suhu air kembali mencapai 68°C. Air panas disirkulasikan melalui *tube-and-shell* dan *cone-and-shell* menggunakan sebuah pompa air.

Penelitian ini dilakukan secara simultan, dengan tujuan agar kedua model menerima kondisi yang identik, termasuk temperatur air yang sama. Pompa air yang digunakan dalam kedua model juga sama, baik merek maupun debitnya. Peleburan parafin pada model *tube-and-shell* tampaknya terjadi lebih awal daripada pada model *cone-and-shell*. Selain itu, proses peleburan parafin pada model *cone-and-shell* tampaknya selesai dengan lebih cepat dibandingkan dengan model *tube-and-shell*.

10. Marausna & Waluyo, (2019) pada penelitian yang berjudul “Studi pelelehan PCM di dalam tabung penyimpanan kalor pada *solar water heater* sistem aktif”. Dari penelitian ini dapat disimpulkan sebagai berikut:

Sejumlah peneliti menggunakan bahan *Phase Change Materials* (PCM) dalam aplikasi pada sistem *Solar Water Heater* (SWH) dengan berbagai tujuan, salah satunya adalah sebagai penyimpan energi untuk meningkatkan stabilitas flat plate collector. Dalam penelitian ini,

Paraffin wax yang terdiri dari rangkaian alkali $\text{CH}_3\text{-CH}_2\text{-CH}_3$ digunakan sebagai salah satu jenis PCM yang dapat diaplikasikan dalam sistem SWH. Pertimbangan utama adalah bahwa sifat kalor peleburan, titik lebur, dan kalor laten yang dilepaskan saat kristalisasi dari rantai CH_3 akan meningkat seiring dengan peningkatan panjang rantai pada *Paraffin wax*.

Dalam studi ini, parameter pelelehan *Paraffin wax* tipe RT52 diprediksi menggunakan model simulasi pada sistem *Solar Water Heater* aktif dengan menggunakan metode *enthalpy-porosity*. Pengamatan dilakukan selama proses pengisian (*charging*) pada sistem SWH aktif, dengan asumsi bahwa kehilangan panas (*heat loss*) pada sistem SWH diabaikan, serta fluks panas diasumsikan merata sepanjang pipa kolektor surya berbahan tembaga, dan konduktivitas termal PCM diasumsikan sebagai konstan.

Dalam skema SWH (*Solar Water Heating*) yang disebutkan, sistem terintegrasi dengan PCM (*Phase Change Material*). *Solar collector* berfungsi menerima radiasi matahari dan meningkatkan suhu air sebagai media perantara panas (HTF) di dalamnya. Air kemudian dipompa menuju tangki penyimpanan kalor yang berisolasi. Tangki ini memiliki diameter 250 mm dan panjang 1220 mm, di dalamnya terdapat PCM dalam kapsul berdiameter 25,4 mm dan panjang 1000 mm.

Pada sistem ini, energi panas yang diterima oleh HTF di dalam *solar collector* dimodelkan dengan memberikan fluks kalor konstan pada

dinding pipa tembaga sebesar 1000 W/m^2 . Laju aliran HTF di dalam sistem SWH dijaga konstan dengan variasi laju aliran sebesar 2 liter per menit (lpm), 3 lpm, dan 4 lpm. Temperatur awal HTF dan PCM diatur pada suhu $321,9 \text{ K}$ ($48,75 \text{ }^\circ\text{C}$), yang mendekati suhu pelelehan PCM, yaitu $322\text{-}326 \text{ K}$ ($49\text{-}50 \text{ }^\circ\text{C}$).

Dari hasil penelitian karakteristik pelelehan PCM, dapat disarikan bahwa mengurangi laju aliran HTF dari 4 liter per menit (lpm) menjadi 2 lpm menyebabkan peningkatan suhu HTF yang mengalir ke tangki penyimpanan panas. Namun, hal ini juga mengakibatkan peningkatan waktu pelelehan PCM dari 87 menit menjadi 96 menit, dengan perbedaan yang relatif kecil sekitar 10,3%. Selain itu, perbedaan suhu antara HTF dan PCM di dalam tangki penyimpanan panas sebesar $7,5 \text{ K}$ mencapai titik puncaknya ketika fluks kalor permukaan mencapai $433,7 \text{ W/m}^2$ selama proses perpindahan panas dari HTF ke PCM pada tahap pengisian (charging).

11. Syukri & Arwizet, (2019) pada penelitian yang berjudul “Perencanaan alat uji konduktivitas termal bahan”. Dari penelitian ini dapat disimpulkan sebagai berikut:

Peneliti menggunakan spesimen yang terbuat dari bahan-bahan organik dengan nilai rata-rata konduktivitas termal di bawah $10 \text{ W/m}\cdot^\circ\text{C}$. Materi yang diuji mencakup kayu, batu bata, komposit serat ijuk, komposit serat sabut kelapa, dan campuran komposit sabut kelapa dengan ijuk. Bahan spesimen dengan konduktivitas termal tertinggi

adalah kayu, dengan nilai sekitar 4,14 W/m.^oC, diikuti oleh batu bata sekitar 3,91 W/m.^oC, komposit serat ijuk dan sabut kelapa sekitar 3,77 W/m.^oC, komposit serat sabut kelapa sekitar 3,75 W/m.^oC, dan komposit serat ijuk sekitar 3,74 W/m.^oC. Hasil data ini menunjukkan bahwa kayu memiliki kemampuan yang lebih baik dalam menghantarkan panas dibandingkan dengan spesimen lainnya.

Pengujian yang dilakukan pada berbagai spesimen juga mengkonfirmasi bahwa alat uji konduktivitas termal telah memberikan hasil yang sesuai dengan nilai konduktivitas termal yang diharapkan untuk bahan-bahan tersebut. Hasil pengujian menunjukkan bahwa nilai konduktivitas termal spesimen dengan komposisi serupa berkisar antara 0,038 W/m.^oC hingga 4,15 W/m.^oC.

12. Siregar et al., (2018) pada penelitian yang berjudul “Kajian peleburan dan pembekuan material berubah fasa pada *thermal storage*”. Dari penelitian ini dapat disimpulkan sebagai berikut:

Dalam pengujian pada suhu 90^oC, Paraffin Wax memiliki suhu rata-rata sekitar 65,655^oC, sementara Stearic Acid mencapai sekitar 62,82^oC. Pada suhu 85^oC, Paraffin Wax menunjukkan suhu rata-rata sekitar 64,24^oC, sedangkan Stearic Acid mencapai sekitar 62,29^oC. Ketika pengujian dilakukan pada suhu 80^oC, Paraffin Wax memiliki suhu rata-rata sekitar 62,54^oC, sementara Stearic Acid hanya mencapai sekitar 57,10^oC. Berdasarkan hasil percobaan ini, dapat disimpulkan bahwa Paraffin Wax lebih efektif dalam menyerap panas daripada Stearic Acid.

Temuan ini juga sejalan dengan fakta bahwa Paraffin Wax mencapai suhu tertinggi dalam pengukuran.

Selain itu, *Paraffin Wax* juga memiliki kemampuan yang lebih baik dalam menyimpan panas dibandingkan dengan *Stearic Acid*. Oleh karena itu, kami merekomendasikan penggunaan *Paraffin Wax* sebagai bahan penyimpan panas yang lebih baik daripada *Stearic Acid*. Selama proses peleburan dan pembekuan, keduanya memiliki kesamaan dalam pola perilaku, yaitu dimulai dari sumber panas dan mengalir ke bagian atas saat peleburan, dan dimulai dari bagian bawah dan bergerak ke atas saat pembekuan.

13. Korawan et al., (2016) pada penelitian yang berjudul “Distribusi temperatur peleburan parafin sebagai penyimpan kalor (studi kasus pada tipe *tube-and-shell* dan *cone-and-shell*)”. Dari penelitian ini dapat disimpulkan sebagai berikut:

Berdasarkan berbagai penelitian yang telah dilakukan, diketahui bahwa penyimpanan energi yang paling efisien adalah dalam bentuk kalor laten. Kalor laten ini digunakan untuk mengubah fase dari padat ke cair. Penyimpanan energi dalam bentuk kalor laten memiliki kapasitas yang lebih besar, yaitu sekitar 5 hingga 14 kali lebih banyak dibandingkan jika energi disimpan dalam bentuk kalor sensibel. Selain itu, metode ini menghasilkan perbedaan suhu yang lebih kecil antara proses penyimpanan dan pelepasan panas.

Untuk meningkatkan transfer panas dalam penyimpanan kalor tipe *tube-and-shell*, ada beberapa metode yang dapat digunakan. Salah satunya adalah dengan memasang sirip internal, baik berbentuk plat maupun dengan konfigurasi tertentu. Selain itu, dapat dilakukan pemasangan sirip longitudinal dan radial, serta sirip horizontal. Dengan menggunakan berbagai metode ini, perpindahan panas dalam penyimpanan kalor jenis ini dapat ditingkatkan. Untuk mengetahui karakteristik perpindahan panas selama proses peleburan paraffin dalam penyimpanan kalor tipe *tube-and-shell*, perlu dilakukan pengamatan terhadap distribusi suhu selama proses peleburan. Hal yang serupa berlaku juga untuk penyimpanan kalor tipe *cone-and-shell*.

Penelitian dilakukan secara simultan pada kedua modul uji, yakni *Cone-and-shell* dan *Tube-and-shell*. Pada awalnya, air dalam bak dipanaskan hingga mencapai suhu yang diinginkan. Untuk memastikan suhu yang seragam, pengadukan air dilakukan menggunakan mixer. Setelah mencapai suhu yang ditargetkan, air dialirkan menuju kedua modul uji selama 3 jam. Selama proses ini, data suhu diambil setiap 10 detik. Variasi suhu di dalam bak air meliputi 65°C, 70°C, 75°C, 80°C, dan 85°C. Laju aliran air diatur pada tingkat 103 liter per jam.

Hasil penelitian menunjukkan adanya perbedaan dalam distribusi suhu selama proses peleburan paraffin antara kedua jenis penyimpanan kalor. Pada tahap awal pemanasan, terdapat perbedaan suhu yang signifikan di berbagai titik pengukuran pada modul *Cone-and-shell*.

Sementara pada modul Tube-and-shell, kenaikan suhu di berbagai titik pengukuran berlangsung secara merata. Proses peleburan *paraffin wax* pada kedua jenis dimulai dari titik pengukuran tertinggi dan berlanjut secara berurutan ke titik-titik pengukuran di bawahnya, hingga mencapai titik terendah.

Perlu dicatat bahwa terdapat perbedaan dalam durasi waktu peleburan antara kedua jenis modul, di mana modul *Cone-and-shell* lebih cepat dibandingkan dengan modul *Tube-and-shell*. Variasi suhu masukan air tidak memengaruhi profil suhu secara signifikan, namun memengaruhi kecepatan proses peleburan. Semakin tinggi suhu masukan, semakin cepat proses peleburan terjadi. Pada modul *Cone-and-shell*, terjadi konduksi kuat di bagian bawah, sehingga terdapat perbedaan suhu yang tajam antara bagian bawah dan bagian atas. Perbedaan suhu ini mendorong pergerakan paraffin cair dari bawah ke atas, menghasilkan aliran konveksi alami yang lebih kuat dan memperpendek waktu peleburan.

14. Kamkari et al., (2014) pada penelitian yang berjudul “Investigasi eksperimental tentang pengaruh sudut kemiringan pada peleburan material perubahan fasa yang digerakkan oleh konveksi dalam selungkup persegi panjang”. Dari penelitian ini dapat disimpulkan sebagai berikut:

Investigasi eksperimental dilakukan untuk menguji pengaruh sudut kemiringan pada karakteristik termal dari proses peleburan dalam

selungkup persegi panjang yang dipanaskan dari satu sisi. PCM (asam laurat) dengan bilangan Prandtl yang tinggi digunakan. Meleleh percobaan dilakukan untuk suhu dinding yang berbeda yaitu 55, 60 dan 70°C sesuai dengan bilangan Rayleigh dalam kisaran dari $3,6 \times 10^8$ hingga $8,3 \times 10^8$ dan sudut kemiringan yang berbeda dari 0°, 45° dan 90°. Struktur aliran yang bergantung pada waktu kualitatif disimpulkan secara tidak langsung dari bentuk sesaat dari antarmuka padat-cair yang dikonfirmasi oleh hasil suhu kuantitatif.

Penurunan sudut kemiringan dari posisi vertikal ke horizontal menghasilkan bentuk antarmuka yang tidak beraturan dan meningkatkan kekuatan struktur aliran vortikal pada PCM cair yang cenderung menimbulkan arus kacau tiga dimensi untuk selungkup horizontal. Bentuk antarmuka padat-cair selama pemanasan dalam wadah horizontal menunjukkan pembentukan sel konveksi Benard dan perkembangan struktur seluler dalam PCM cair seiring dengan berlangsungnya peleburan.

Untuk semua sudut kemiringan yang di pertimbangkan, setelah periode awal peleburan, laju peleburan terutama dikendalikan oleh arus konveksi induksi dalam PCM cair yang menunjukkan perpindahan panas kuasi-stabil. Laju peleburan pada wadah miring 45° dan 90° menurun seiring dengan berkurangnya ketinggian PCM padat, sedangkan laju peleburan pada wadah horizontal hampir konstan hingga akhir proses peleburan. Ditemukan bahwa laju perpindahan panas dari

PCM bilangan Prandtl tinggi yang dicairkan dari bawah hampir tidak dipengaruhi oleh ketebalan lapisan cairan.

Untuk kisaran suhu yang dipertimbangkan, total waktu leleh untuk wadah miring 45° dan 0° , rata-rata, masing-masing 35% dan 53% lebih pendek dibandingkan wadah vertikal. Rasio peningkatan bilangan Nusselt, yang didefinisikan sebagai rasio rata-rata waktu bilangan Nusselt di selungkup miring dengan selungkup vertikal, ditemukan masing-masing sebesar 1,7 dan 2,1 untuk selungkup miring 45° dan 0° . Rasio peningkatan yang signifikan ini disebabkan oleh pembentukan struktur aliran multi seluler yang kacau yang muncul dengan penurunan sudut kemiringan yang mengakibatkan lebih banyak perpindahan panas dari dinding panas ke antarmuka padat-cair. Terlepas dari kemiringan sudutnya, angka *Nusselt* rata-rata waktu menunjukkan peningkatan 11% dan 35% ketika suhu dinding ditingkatkan masing-masing dari 55°C menjadi 60°C dan 70°C .

15. Syuhada, (2013) pada penelitian yang berjudul “Kaji eksperimental perpindahan panas peleburan parafin sebagai material penyimpan panas pada alat penukar kalor bersirip”. Dari penelitian ini dapat disimpulkan sebagai berikut:

Bahan yang dimanfaatkan untuk menyimpan panas laten dikenal sebagai bahan perubahan fasa (PCM). PCM umumnya terbagi menjadi tiga kategori utama: organik, senyawa anorganik, dan eutektik. PCM dengan suhu rendah, yaitu kurang dari 200 derajat Celsius, biasanya

digunakan dalam aplikasi seperti sistem penggunaan ulang limbah panas dan bangunan. Di sisi lain, PCM dengan suhu tinggi, yaitu di atas 200 derajat Celsius, yang bersifat anorganik, digunakan dalam aplikasi seperti pembangkit listrik tenaga surya dan aplikasi temperatur tinggi lainnya. Terdapat beberapa metode yang dapat diterapkan untuk meningkatkan laju transfer panas dalam sistem penyimpanan panas laten. Lacroix, misalnya, telah melakukan penelitian eksperimental dan teoritis untuk memprediksi karakteristik transien pada unit pengujian pipa dan tabung.

Dalam penelitian ini, dilakukan pengukuran teknis terhadap dua hal, yaitu bahan perubahan fasa dan fluida kerja. Pengukuran dilakukan pada tiga titik berbeda untuk menentukan suhu leleh perubahan fasa bahan. Selain itu, suhu fluida kerja (yaitu air) diukur pada titik masuk (inlet) dan titik keluar (outlet), serta diukur juga laju aliran massa fluida selama periode pengujian. Bahan penyimpan panas yang digunakan dalam penelitian ini adalah parafin murni ($C_{18}H_{38}$), yang merupakan senyawa hidrokarbon organik dengan n-alkana sebagai komponen utama, dan memiliki perilaku termofisika yang penting dalam konteks ini.

Pada tahap awal eksperimen, bahan penyimpanan termal dipanaskan dalam tungku anil pada suhu leleh, yaitu $46.70\text{ }^{\circ}\text{C}$, selama 60 menit. Selama proses pemanasan ini, suhu tungku annealing tetap konstan agar proses peleburan berjalan lancar dan merata. Hasil eksperimen dari penelitian ini mencakup pengukuran suhu bahan penyimpanan panas

mulai dari suhu awal pemanasan, yaitu 29 °C, hingga suhu leleh yang beberapa derajat di atas setiap titik yang diukur. Karena semua titik yang diukur memiliki karakteristik peleburan yang serupa, baik dalam hal aliran massa yang halus maupun dalam pipa yang bersirip. Dengan demikian, penggunaan sirip di dalam tabung terbukti menjadi metode yang efektif untuk meningkatkan tingkat peleburan (penyerapan panas) dari materi, mengizinkan aliran massa yang lebih tinggi, serta mempercepat proses penyerapan panas dari parafin. Dampaknya, waktu yang diperlukan untuk mencapai suhu leleh 46,7 °C menjadi lebih singkat. Sebagai perbandingan, untuk pipa yang mulus, waktu yang dibutuhkan adalah 26 dan 27 menit untuk aliran massa 0,23 dan 0,19 kg/s, sementara untuk pipa dengan sirip, waktu yang dibutuhkan adalah 21 dan 23 menit untuk aliran massa yang sama, yaitu 0,23 dan 0,19 kg/s.

BAB III

METODE PENELITIAN

A. Metode Penelitian

Metode penelitian yang digunakan untuk menjawab rumusan masalah menggunakan metode eksperimen, metode eksperimen merupakan metode dengan cara memanipulasi satu atau lebih variabel untuk mengamati perubahan yang terjadi pada masing-masing variabel. Pada penelitian ini melakukan percoba terhadap performansi alat uji *thermal* (*melting* dan *solidification*) pada PCM (*paraffin* dan *Stearic Acid*).

Eksperimen yang dilakukan dalam penelitian ini terdapat beberapa tahapan diantaranya:

1. PCM yang digunakan (*paraffin* dan *Stearic Acid*).
2. Media pemanas menggunakan keramik *heater* 220V/230V 500W yang di letakan di bawah alat.
3. Pengujian proses peleburan PCM diamati dengan temperatur keramik *heater* mencapai 100°C.
4. Mengamati proses peleburan PCM dengan waktu sampai PCM benar-benar mencair sepenuhnya.
5. Mengamati proses pembekuan PCM, dalam waktu sampai PCM benar-benar padat.

Data yang diperoleh kemudian dianalisa efisiensinya (*melting* dan *solidification*) PCM yang selanjutnya hasilnya digunakan sebagai perbandingan performansi alat uji *thermal*.

B. Waktu Dan Tempat Penelitian

Penelitian dilaksanakan mulai dari bulan Agustus 2023 - April 2024 seperti tabel 3.1, adapun pembuatan alat uji *thermal*, pengujian dan pengambilan data di lakukan di “Laboratorium Manufaktur dan Lab Konversi energi Universitas Pancasakti Tegal”.

Tabel 3.1 Kalender penelitian

No	Kegiatan	Bulan/Tahun 2023-2024						
		Ags	Sep	Okr	Nov	Des	Apr	Jul
1.	Persiapan							
	a. Pengajuan judul							
	b. Mencari refrensi							
	c. Menyusun proposal							
2.	Pelaksanaan							
	a. Seminar Proposal							
	b. Pembuatan spesimen							
	c. Pengujian spesimen							
3.	Penyelesaian							
	a. Pengolahan data							
	b. Penyusunan Skripsi							
	c. Ujian Skripsi							

C. Istrumen Penelitian

1. Bahan Penelitian

Bahan yang digunakan dalam penelitian menggunakan *paraffin* dan *Stearic Acid*, dikarenakan bahan jenis ini memiliki karakteristik sebagai

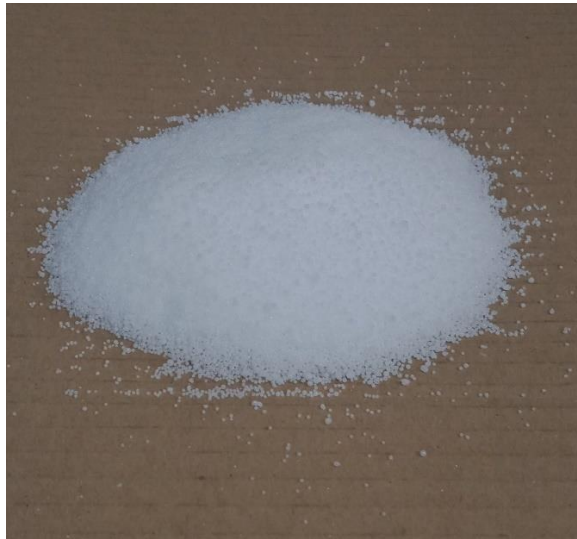
berikut kemampuan menyimpan panas besar, kerapatan, kemampuan menyimpan energi, tingkat efisiensi termal, proses pengisian panas, kehilangan penyimpanan panas, proses pengambilan kembali, pengaruh lingkungan rendah, tahan lama, mudah dalam pembuatan dan penyimpanan serta ketersediaan yang ekonomis dan terjangkau. Sehingga bisa diterapkan pada alat uji *thermal* yang nantinya diambil data dari efektifitas yang terbaik antara *paraffin* dan *stearic acid*.

Dalam percobaan ini menggunakan *phasa change material* seberat 1 kg/percobaan. Selain *phasa change material*, dalam penelitian ini juga menggunakan air sebagai pendingin dibagian sebelah kanan dan kiri antara ruang peleburan yang masing-masing 1,3 liter/percobaan disetiap bagiannya.



Gambar 3.1 *Parafin wax*

Sumber: Dokumen Pribadi



Gambar 3.2 Stearic acid

Sumber: Dokumen Pribadi

Paraffin wax, yang umumnya digunakan sebagai lilin, memiliki titik leleh yang relatif rendah, sekitar 37 - 60 °C, tergantung pada jenisnya. *Stearic acid*, yang juga dapat digunakan dalam lilin, memiliki titik leleh sekitar 69 °C. Ketika suhu ditingkatkan di atas titik leleh, keduanya akan mengalami perubahan dari fase padat menjadi fase cair. Sebaliknya, jika suhu diturunkan di bawah titik leleh, keduanya akan mengalami perubahan dari fase cair menjadi fase padat. Selain itu, sifat termofisika juga mencakup konduktivitas termal, kapasitas panas, dan perubahan volume yang terjadi selama perubahan fase.

Tabel 3.2 Sifat termo fisik bahan perubahan fasa
Sumber: (Ambarita et al., 2017)

Properti	<i>Paraffin wax</i>	<i>Stearic acid</i>
Suhu leleh (°C)	59.8	55.1
Panas laten (<i>kJ/kg</i>)	190	160
Kepadatan (<i>kg/m³</i>) ketika:		
Padat	910	965
Cair	790	848
Panas spesifik (<i>kJ/kg °C</i>) ketika:		
Padat	2,0	1,6
Cair	2.15	2.2
Konduktivitas termal (<i>W/m · K</i>) ketika:		
Padat	0,24	0,36
Cair	0,22	0,172

2. Alat Penelitian

Alat bantu yang digunakan dalam menjalankan penelitian alat uji termal sebagai berikut:

a). Wadah kaca

Wadah ini memiliki bentuk persegi panjang dengan ukuran panjang 280 mm, lebar 180 mm, tinggi 200 mm yang terbuat dari bahan kaca dengan tebal 10 mm dan disekat dengan plat aluminium dengan tebal plat 2 mm.

b). Keramik *heater*

Keramik *heater* digunakan sebagai sumber penanas alat uji *thermal*, yang menjadikan PCM mengalami perubahan fasa dari

padat ke cair (*melting*). keramik *heater* yang digunakan rincian sebagai berikut:

- 1). Berbentuk : persegi
- 2). Ukuran : 120 X 120 mm
- 3). Jenis : hollow dan flat,
- 4). Volttage : 220/230V AC
- 5). Watt : 500W



Gambar 3.3 Keramik *heater*

Sumber: Dokumen Pribadi

c). Alat pengukur suhu

Alat pengukur suhu digunakan untuk mengetahui suhu di ruangan penguji thermal dan mengetahui berapa suhu leleh dari PCM yang digunakan, alat pengukur suhu yaitu thermometer digital seperti gambar 3.4.



Gambar 3.4 Termometer digital

Sumber: Dokumen Pribadi

d). Alat pengontrol temperatur

Alat pengontrol temperatur digunakan untuk mengontrol dan mempertahankan suhu pada ruang peleburan serta memberikan efisiensi energi dengan memastikan bahwa suhu didalam ruangan tetep berada pada rentang yang diinginkan.



Gambar 3.5 gambar alat pengontrol temperatur

Sumber: Dokumen Pribadi

e). Alat pengukur waktu

Alat pengukur waktu digunakan untuk mengetahui seberapa lama waktu untuk melting bahan PCM dan waktu yang dibutuhkan untuk membeku kembali yaitu jam digital.



Gambar 3.6 Gambar alat ukur waktu

Sumber: Dokumen Pribadi

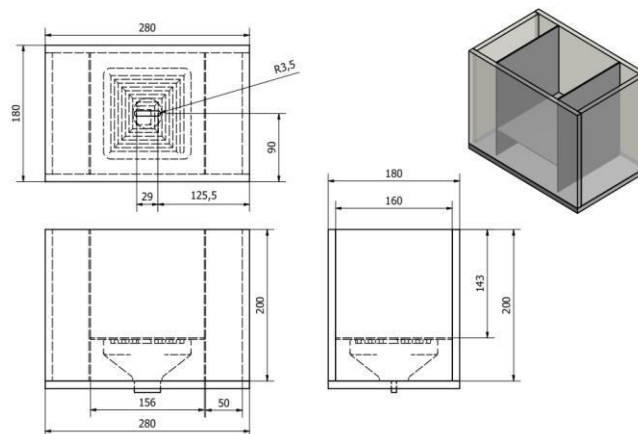
f). Kamera handphone

Pengambilan gambar pada saat proses eksperimen untuk data penelitian menggunakan handphone. Dokumentasi menjadi bukti nyata bahwa data penelitian benar telah dilakukan.

D. Desain Alat Uji *Thermal*

Desain alat uji *thermal* menggunakan bahan kaca yang berbentuk persegi panjang dengan ukuran panjang 280 mm, lebar 180 mm, tinggi 200 mm yang terbuat dari bahan kaca dengan tebal kaca 10 mm serta plat aluminium sebagai penyekatnya dengan ketebalan 2 mm. Dan keramik heater yang ada di bawah alat sebagai media pemanasnya.

Penggunaan kaca dimaksudkan agar lebih mudah mengamati secara langsung yang terjadi saat penelitian berlangsung, pada bagian tengah bawah terdapat keramik pemanas yang bertujuan untuk memanaskan PCM yang ada di atasnya dan bagian samping kiri, kanan terdapat air sebagai media pendingin PCM desain bisa dilihat pada gambar 3.6.



Gambar 3.7 Desain alat uji *thermal*

Sumber: Dokumen Pribadi



Gambar 3.8 Alat uji *thermal*

Sumber: Dokumen Pribadi

E. Variabel Penelitian

Variabel yang diukur dalam penelitian ini variabel bebas dan variabel terikat yaitu:

1. Variabel Bebas

Variabel bebas (*independen*) adalah penggunaan *paraffin wax* dan *stearic acid* dengan temperatur kramik heter 100° C.

2. Variabel Terikat

Variabel terikat adalah variabel yang di pengaruhi oleh variabel bebas. Variabel terikat dalam penelitian ini adalah:

- a). *Melting* dan *solidification* dari PCM.
- b). Perpindahan kalor secara konduksi.

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

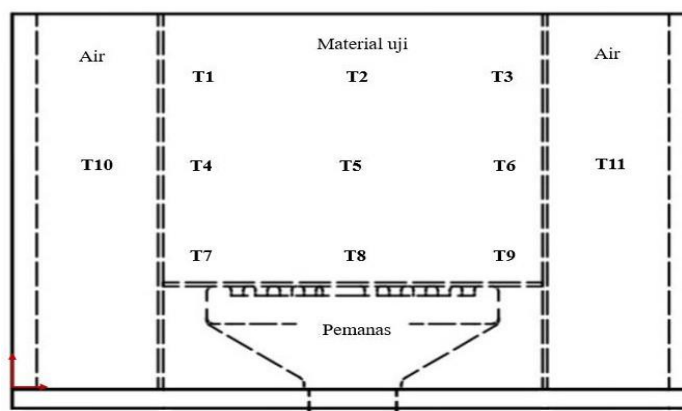
$$\frac{dQ}{dT} = \dot{q} = \frac{m \cdot c \cdot \Delta T}{t}$$

F. Prosedur Penelitian

1. Persiapan Penelitian

Penelitian ini membutuhkan alat dan bahan yang harus disiapkan yaitu:

- a). Alat uji thermal dan kelengkapannya.
- b). Menyiapkan bahan PCM *paraffin wax* dan *stearic acid*.
- c). Pemasangan alat ukur suhu (termometer digital) dan komponen lainnya, dapat dilihat pada gambar 3.9



Gambar 3.9 Gambar titik penempatan termometer

Sumber: Dokumen pribadi

Tabel 3.3 Tabel titik koordinat termometer digital

	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)
T1	80	130	162
T2	130	130	162
T3	180	130	162
T4	80	80	127
T5	130	80	127
T6	180	80	127
T7	80	30	92
T8	130	30	92
T9	180	30	92
T10	25	80	127
T11	235	80	127

2. Pengujian proses peleburan dan pembekuan PCM

Proses peleburan adalah suatu tahapan di mana panas disimpan dalam material hingga mencapai titik leleh dari bahan PCM, menyebabkan material berubah dari fase padat menjadi fase cair. Pengujian dalam proses ini bertujuan untuk memahami seberapa cepat temperatur material mengalami kenaikan seiring berjalannya waktu, hingga seluruh material berubah dari keadaan padat menjadi cair.

Percobaan atau pengujian proses peleburan dan pembekuan PCM, dengan menyalakan keramik heater hingga temperatur suhunya mencapai 100°C. Pada proses peleburan PCM, adapun langkah untuk mengetahui *melting* dan *solidification* dari PCM (*paraffin wax* dan *stearic acid*) sebagai berikut:

- a). Pengambilan data dilakukan secara manual untuk pencatatan waktu dan suhu PCM nya dengan melakukan pengambilan video/foto

disetiap perubahan suhu dan waktu. Pencatatan ini terus berlangsung hingga seluruh PCM sepenuhnya meleleh, dan hal yang serupa terjadi selama proses pemadatan.

- b). Dalam tahap peleburan PCM, pencatatan waktu dan suhu dimulai setelah elemen pemanas keramik menyala, dan pencatatan ini berlangsung hingga PCM benar-benar mencapai fase cairnya.
- c). Proses pembekuan PCM dibantu oleh pendinginan dari air yang ada pada alat uji thermal.

G. Analisis Data

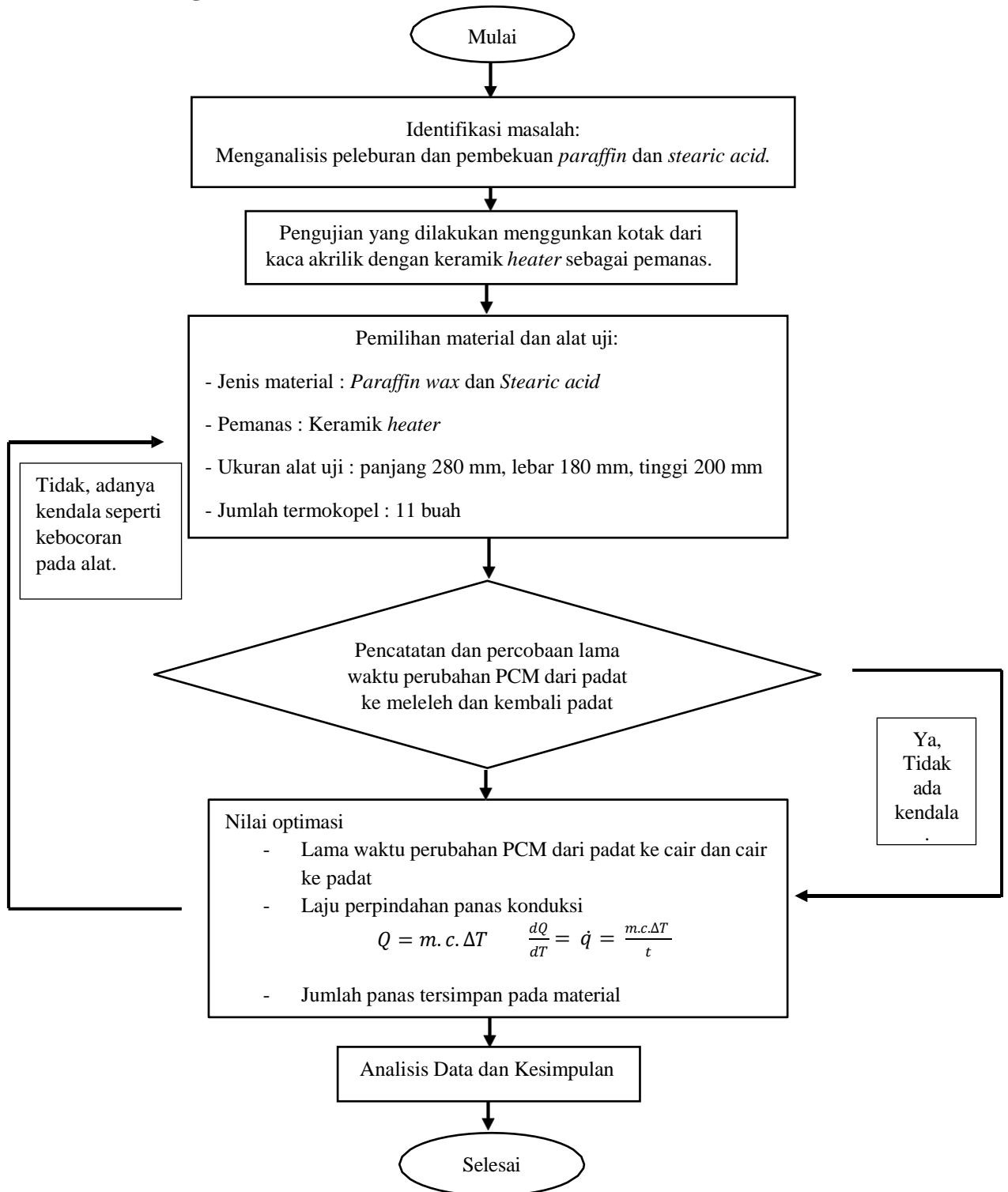
Penting untuk diingat bahwa analisis data merupakan elemen kunci dalam penelitian dan karya ilmiah. Analisis data yang akurat memiliki kemampuan untuk memberikan pemahaman yang bermanfaat dalam memecahkan masalah penelitian dan menghasilkan kesimpulan yang sesuai dengan tujuan penelitian tersebut.

Proses analisis dimulai dengan mengumpulkan semua data yang telah dikumpulkan dari eksperimen dan dokumentasi. Data penelitian tersebut kemudian dianalisis dengan cermat agar kesimpulan yang dihasilkan sesuai dan akurat dengan apa yang telah dilakukan selama penelitian. Untuk memudahkan pengolahan data dapat dimasukkan dalam tabel berikut.

Tabel: 3.4 Lembar pengamatan data temperatur

No	Jenis PCM	Time (waktu)	Temperatur (°C)	<i>Melting</i> PCM	<i>Solidification</i> PCM
1.	Parafin Wax	1.			
		2.			
		3.			
	Rata-Rata				
2.	Staric Acid	1.			
		2.			
		3.			
	Rata-Rata				

H. Diagram Alur Penelitian



Gambar 3.10 Diagram alur penelitian