



TUGAS AKHIR - TL141584

**PENGARUH KOMPOSISI GARAM DAN
PENAMBAHAN AGEN NUKLEASI TERHADAP
DERAJAT *SUPERCOOLING* SERTA KINERJA
LARUTAN EUTEKTIK GARAM/H₂O UNTUK
COLD STORAGE BERBASIS *PHASE CHANGE
MATERIAL (PCM)***

Rosena Mardiah
NRP 2712 100 005

Dosen Pembimbing :
Dr. Agung Purniawan, ST., M.Eng
Diah Susanti, ST., MT., PhD

JURUSAN TEKNIK MATERIAL DAN METALURGI
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2016



TUGAS AKHIR - TL141584

**PENGARUH KOMPOSISI GARAM DAN
PENAMBAHAN AGEN NUKLEASI TERHADAP
DERAJAT *SUPERCOOLING* SERTA KINERJA
LARUTAN EUTEKTIK GARAM/H₂O UNTUK
COLD STORAGE BERBASIS *PHASE CHANGE
MATERIAL(PCM)***

Rosena Mardiah
NRP 2712 100 005

Dosen Pembimbing :
Dr. Agung Purniawan, ST, M.Eng
Diah Susanti, ST., MT., PhD

JURUSAN TEKNIK MATERIAL DAN METALURGI
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2016

(Halaman ini sengaja dikosongkan)



FINAL PROJECT - TL141584

**THE EFFECT OF SALT COMPOSITION AND
NUCLEATING AGENT ADDITION TO
SUPERCOOLING DEGREE AND PERFORMANCE
OF EUTECTIC SALT/H₂O SOLUTION FOR
COLD STORAGE BASED ON PHASE CHANGE
MATERIAL(PCM)**

Rosena Mardiah
NRP 2712 100 005

Lecturer :
Dr. Agung Purniawan, ST., M.Eng
Diah Susanti, ST., MT., PhD

MATERIALS AND METALLURGICAL ENGINEERING
Industrial Technology Faculty
Institute Technology of Sepuluh Nopember
Surabaya 2016

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

**PENGARUH KOMPOSISI GARAM DAN PENAMBAHAN
AGEN NUKLEASI TERHADAP DERAJAT
SUPERCOOLING SERTA KINERJA LARUTAN
EUTEKTIK GARAM/H₂O UNTUK COLD STORAGE
BERBASIS PHASE CHANGE MATERIAL (PCM)**

TUGAS AKHIR

Diajukan untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
pada
Bidang Studi Material Inovatif
Program Studi S-1 Jurusan Teknik Material dan Metalurgi
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh :

ROSENA MARDLIAH

NRP. 2712 100 005

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir :

1. Dr. Agung Purniawan, ST., M.Eng (Pembimbing I)
2. Diah Susanti, ST., MT., PhD (Pembimbing II)



(Halaman ini sengaja dikosongkan)

**PENGARUH KOMPOSISI GARAM DAN
PENAMBAHAN AGEN NUKLEASI TERHADAP
DERAJAT *SUPERCOOLING* SERTA KINERJA
LARUTAN EUTEKTIK GARAM/H₂O UNTUK *COLD
STORAGE* BERBASIS *PHASE CHANGE
MATERIAL*(PCM)**

Nama Mahasiswa : Rosena Mardiah
NRP : 2712 100 005
Jurusan : Teknik Material dan Metalurgi
Dosen Pembimbing : Dr. Agung Purniawan, ST, M. Eng
Diah Susanti, ST., MT., PhD

ABSTRAK

Pengembangan Cold Storage berbasis PCM saat ini merupakan topik yang menarik untuk diteliti. Supercooling merupakan salah satu masalah yang harus diselesaikan pada pengaplikasian PCM. Salah satu solusi untuk masalah supercooling yaitu dengan menambahkan agen nukleasi. Pada penelitian ini menggunakan proses pendinginan dan pencairan pada larutan NaCl/H₂O, KCl/H₂O dan NaNO₃/H₂O serta boraks sebagai agen nukleasi. Variasi komposisi sebesar 5,10,15 dan 20%wt dari komposisi garam, pemberian boraks sebesar 1%wt pada masing-masing komposisi dan pada komposisi eutektik dari larutan, kinerja larutan pada komposisi eutektik dilihat dengan menggunakan sistem hybrid dengan pengujian Test Chamber dan Scale Laboratory Cold Storage. Hasil penelitian menunjukkan bahwa pada semua komposisi, masing-masing jenis garam menyebabkan larutan mengalami supercooling. Nilai derajat supercooling terletak pada rentang 1-8°C. Penambahan agen nukleasi memberikan hasil pengurangan derajat supercooling pada semua komposisi kecuali NaCl 20%wt(dengan kenaikan sampai 1,05°C) penurunan derajat supercooling paling tinggi pada KCl dengan 7,7°C. Kinerja larutan NaNO₃ sebelum

penambahan boraks paling ideal untuk penyimpanan produk beku.

Kata Kunci: *Cold Storage*, PCM, Larutan Eutektik Garam/H₂O , Derajat *Supercooling*, Kinerja Larutan Eutektik Garam/H₂O, Derajat *Supercooling*.

THE EFFECT OF SALT COMPOSITION AND NUCLEATING AGENT ADDITION TO SUPERCOOLING DEGREE AND PERFORMANCE OF EUTECTIC SALT/H₂O SOLUTION FOR COLD STORAGE BASED ON PHASE CHANGE MATERIAL

Name : Rosena Mardliah
NRP : 2711200005
Department : Materials and Metallurgical Engineering
Advisor : Dr. Agung Purniawan, ST, M. Eng
Diah Susanti, ST., MT., PhD

ABSTRACT

Nowaday, Cold Storage development based on PCM is one of interesting research topic. Supercooling is one of the problem to be addressed in the application of PCM, one solution with nucleation agent addition. In this study used freezing and melting process for NaCl/H₂O, KCl/H₂O, NaNO₃/H₂O solution and borax as nucleation agent. Variation composition are 5, 10, 15 and 20%wt of provision borax 1%wt in each composition and eutectic. Performance eutectic solution was observed by Chamber Test and Scale Cold Storage Laboratory. The result of this experiment shows that the addition of the composition of each type of salt causes supercooling, the value of supercooling degree occur between 1 to 8°C. Addition of nucleation agent affects supercooling reduction almost composition expect NaCl 20%wt (increase up to 1.05°C). The most of decrease supercooling degree is on KCl until 7.7°C. NaNO₃ solution before added borax has best performance for product storage in the range -12 until -18 °C.

Keywords : Cold Storage, PCM, Eutectic water-salt, Supercooling Degree, Performance of Eutectic water-salt.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan kehadirat Allah SWT, karena Rahmat dan Hidayat-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan laporan Tugas Akhir yang berjudul “Pengaruh Komposisi Garam dan Penambahan Agen Nukleasi terhadap Derajat *Supercooling* serta Kinerja Larutan Eutektik Garam/H₂O sebagai *Cold Storage* Berbasis *Phase Change Material*(PCM)”.

Adapun laporan ini disusun dan diajukan untuk memenuhi sebagian persyaratan studi di Jurusan Teknik Material dan Metalurgi, Fakultas Teknologi Industri (FTI), Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS) Surabaya

Ucapan terima kasih penulis sampaikan kepada :

1. Kedua orang tua serta anggota keluarga yang memberikan doa dan dukungan selama ini.
2. Dr. Agung Purniawan, ST, M.Eng selaku Ketua Jurusan Teknik Material dan Metalurgi FTI ITS serta selaku Dosen Pembimbing pertama yang membimbing penulis menyelesaikan Tugas Akhir.
3. Diah Susanti, ST., MT., PhD selaku Dosen Pembimbing kedua yang membimbing penulis menyelesaikan Tugas Akhir.
4. Ir. Ir. Rochman Rochiem, M.Sc. selaku Kepala Laboratorium Metalurgi Jurusan Teknik Material dan Metalurgi FTI-ITS.
5. Dosen-dosen Jurusan Teknik Material dan Metalurgi FTI-ITS yang telah memberikan ilmu yang berharga
6. Ir. Alam Bahersyah M.Sc selaku Kepala Laboratorium Mesin dan Sistem Fluida Jurusan Teknik Sistem Perkalapan FTK-ITS
7. Karyawan Laboratorium Metalurgi, Kimia Material Jurusan Teknik Material dan Metalurgi FTI ITS serta Laboratorium Mesin dan Sistem Fluida Jurusan Teknik Sistem Perkalapan FTK-ITS.
8. Rekan-rekan Angkatan 2012 Teknik Material dan Metalurgi FTI-ITS

9. Rekan-rekan Laboratorium Metalurgi Jurusan Teknik Material dan Metalurgi FTI-ITS
10. Rekan-rekan Laboratorium Kimia Material Jurusan Teknik Material dan Metalurgi FTI-ITS
11. Rekan-rekan Laboratorium Mesin dan Sistem Fluida Jurusan Sistem Perkapalan FTK-ITS
12. Pihak-pihak yang tidak bisa disebutkan satu-persatu.

Penulis menyadari bahwa dalam penulisan ini masih terdapat beberapa ketidaksempurnaan, oleh karena adanya keterbatasan kemampuan penulis. Untuk itu, saran dan kritik yang konstruktif sangat penulis harapkan.

Surabaya, 26 Juli 2016

Penulis

DAFTAR ISI

Halaman Judul.....	i
Lembar Pengesahan.....	v
Abstrak.....	vii
<i>Abstract</i>	ix
Kata Pengantar.....	xi
Daftar Isi.....	xiii
Daftar Gambar.....	xvii
Daftar Tabel.....	xxi
BAB I PENDAHULUAN	
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Permasalahan.....	2
1.3 Batasan Masalah.....	3
1.4 Tujuan.....	3
1.5 Manfaat Penelitian.....	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	
2.1 Penyimpanan Energi Termal.....	5
2.1.1 Penyimpanan Sensibel.....	5
2.1.2 Penyimpanan Panas Laten.....	6
2.2 Phase Change Material (PCM).....	7
2.3 Klasifikasi Aplikasi <i>Cold Storage</i> Bawah Nol.....	11
2.4 Larutan Campuran Air-garam Eutektik.....	12
2.4.1 Spesifikasi Larutan Eutektik Air-Garam.....	12
2.4.2 Kristalisasi Pembekuan Eutektik.....	15
2.4.3 Garam sebagai Larutan Ionik.....	16
2.5 <i>Supercooling/Subcooling</i>	16
2.6 Sifat Koligatif Air.....	18
2.7 Efek Mbemba.....	19
2.8 Material Garam.....	20
2.8.1 Natrium Nitrat.....	20

2.8.2 Natrium Klorida	21
2.8.3 Kalium Klorida.....	22
2.9 Perpindahan Panas.....	22
2.9.1 Konduksi	22
2.9.2 Konveksi.....	23
2.9.3 Koefisien Perpindahan Kalor Menyeluruh.....	24
2.10 Penelitian sebelumnya	26
BAB III METODOLOGI PENELITIAN	
3.1 Bahan	29
3.2 Alat	30
3.3 Diagram Alir Penelitian.....	38
3.4 Metode Penelitian.....	38
3.5 Prosedur Penelitian.....	39
3.5.1 Preparasi Sampel	39
3.5.2 Penambahan Agen Nukleasi.....	40
3.5.3 Pengujian.....	41
3.6 Rancangan Penelitian	54
BAB IV ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN	
4.1 Analisa Data <i>Chamber Test</i>	57
4.1.1 Analisa Data <i>Chamber Test</i> Aquades.....	59
4.1.2 Analisa Data <i>Chamber Test</i> PCM Komersial.....	59
4.1.3 Analisa Data <i>Chamber Test</i> Larutan NaCl/H ₂ O.....	60
4.1.4 Analisa Data <i>Chamber Test</i> KCl/H ₂ O.....	63
4.1.5 Analisa Data <i>Chamber Test</i> NaNO ₃ /H ₂ O.....	65
4.1.6 Analisa Penurunan Titik Beku dan <i>Derajat Supercooling</i> Larutan NaCl/H ₂ O, KCl/H ₂ O serta NaNO ₃ /H ₂ O.....	68
4.1.7 Analisa Hasil <i>Chamber Test</i> Larutan NaCl/H ₂ O dengan Penambahan Agen Nukleasi.....	70
4.1.8 Analisa Hasil Hasil <i>Chamber Test</i> Larutan KCl/H ₂ O dengan Penambaham Agen Nukleasi	71

4.1.9 Analisa Hasil Chamber Test Larutan NaNO ₃ /H ₂ O dengan Penambahan Agen Nukleasi.....	73
4.2 Analisa Pengujian Performa Menggunakan <i>Scale Cold Storage Laboratory</i>	75
4.3 Komparasi Larutan NaCl/H ₂ O, KCl/H ₂ O serta NaNO ₃ /H ₂ O berdasarkan Karakteristik PCM yang Baik	80
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN	
5.1 Kesimpulan.....	83
5.2 Saran.....	83
DAFTAR PUSTAKA	85
LAMPIRAN	
BIODATA PENULIS	

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Metode untuk Penyimpanan Panas dan Dingin	5
Gambar 2.2 Prinsip dari PCM	7
Gambar 2.3 Klasifikasi Material yang dapat digunakan sebagai PCM beserta Tipe Temperatur Lebur dan Entalpi Lebur.....	8
Gambar 2.4 Klasifikasi Berbagai Jenis Aplikasi <i>Cold Storage</i> Bawah Nol	11
Gambar 2.5 Diagram Fasa Larutan Eutektik Garam-Air	13
Gambar 2.6 Skematik Perubahan Temperatur selama Pemanasan (meleleh) serta Pendinginan (memadat) pada PCM dengan <i>Subcooling</i>	16
Gambar 2.7 Pengaruh <i>supercooling</i> pada Penyimpanan Panas (a) sedikit <i>Supercooling</i> setelah diberi Agen Nukleasi, (b) <i>supercooling</i> berlebihan tanpa terjadi Nukleasi	17
Gambar 2.8 Kurva Pendinginan pada Air Panas dan Dingin	20
Gambar 2.9 Arah Aliran Kalor.....	23
Gambar 2.10 Perpindahan Kalor secara Konveksi.....	23
Gambar 2.11 Perpindahan Kalor Menyeluruh Melalui Dinding Datar	25
Gambar 2.12 Jaringan tahanan perpindahan kalor menyeluruh ..	25
Gambar 3.1 <i>Gelas Erlenmeyer</i>	31
Gambar 3.2 Gelas Ukur.....	31
Gambar 3.3 Pipet.....	32
Gambar 3.4 Spatula	32
Gambar 3.5 Cawan Petri	32
Gambar 3.6 Neraca Digital Analitik.....	33
Gambar 3.7 <i>Magnetic Strirer</i>	33
Gambar 3.8 <i>Freezer</i> MODENA	34
Gambar 3.9 Wadah tabung Logam.....	35
Gambar 3.10 a) Sensor dan Data <i>Logger</i> b) Termometer Standart APPA	35
Gambar 3.11 <i>Cold Storage</i>	36
Gambar 3.12 <i>Labjack T7 Pro</i>	37
Gambar 3.13 <i>Thermocouple</i>	37

Gambar 3.14 Diagram Alir Penelitian.....	38
Gambar 3.15 Skema diagram <i>Enviromental Test Chamber</i>	41
Gambar 3.16 Grafik Kurva Pendinginan Temperatur <i>terhadap Waktu</i>	42
Gambar 3.17 Grafik Kurva Pencairan Temperatur terhadap Waktu	42
Gambar 3.18 Skema Test Chamber	43
Gambar 3.19 <i>Test Chamber</i>	43
Gambar 3.20 Panel Listrik Utama	45
Gambar 3.21 Panel Kontrol <i>Cold Storage</i>	45
Gambar 3.22 Cara melakukan <i>Setting</i> Temperatur Tujuan	46
Gambar 3.23 Cara melakukan <i>Setting Differential</i>	46
Gambar 3.234 Pemasangan Thermocouple ke Labjack T7-Pro ..	48
Gambar 3.25 tampilan Awal Kippling	48
Gambar 3.26 Tampilan Menu Analog Input	49
Gambar 3.27 Proses Konfigurasi <i>AIN</i>	49
Gambar 3.28 Pemilihan Jenis <i>Thermocouple</i>	50
Gambar 3.29 Pemilihan <i>Metric Temperature</i>	50
Gambar 3.30 Pemilihan <i>Cold Junction Location</i>	50
Gambar 3.31 Tampilan Awal LJ Log M 51	51
Gambar 3.32 Tampilan setelah dilakukan pengaturan LJ	52
Gambar 3.33 Desain <i>Coolbox</i>	53
Gambar 4.1 Kurva Pendinginan dan pencairan larutan <i>Aquades</i> ..	57
Gambar 4.2 Kurva Pendinginan dan pencairan PCM.....	59
Gambar 4.3 Kurva Pendinginan dan Pencairan Larutan NaCl/H ₂ O untuk 5,10,15 dan 20%wt NaCl.....	60
Gambar 4.4 Perbandingan Proses Pencairan dan pendinginan antara <i>Aquades</i> , PCM dan KCl/H ₂ O	62
Gambar 4.5 Kurva Pendinginan dan Pencairan Larutan KCl/H ₂ O untuk 5,10,15 dan 20%wt KCl.....	63
Gambar 4.6 Perbandingan Proses Pencairan dan pendinginan antara <i>Aquades</i> , PCM dan KCl/H ₂ O	65
Gambar 4.7 Kurva Pendinginan dan Pencairan Larutan NaNO ₃ /H ₂ O untuk 5,10,15 dan 20%wt NaNO ₃	66

Gambar 4.8 Perbandingan Proses Pencairan dan pendinginan antara <i>Aquades</i> , PCM dan KCl/H ₂ O	67
Gambar 4.9 Pengaruh Variasi Komposisi terhadap Penurunan Titik Beku	68
Gambar 4.10 Pengaruh Variasi Komposisi terhadap Derajat <i>supercooling</i>	69
Gambar 4.11 Kurva Pendinginan dan Pencairan Larutan NaCl/H ₂ O 5,10,15,20%wt + 1%wt <i>Boraks</i>	70
Gambar 4.12 Kurva Pendinginan dan Pencairan Larutan KCl/H ₂ O 5,10,15,20%wt + 1%wt <i>Boraks</i>	72
Gambar 4.13 Kurva Pendinginan dan Pencairan Larutan NaNO ₃ /H ₂ O 5,10,15,20%wt + 1%wt <i>Boraks</i>	73
Gambar 4.14 Hasil tes Kinerja Bahan pada <i>Scale Cold Storage Laboratory</i> (a) <i>Aquades</i> (b) PCM.....	75
Gambar 4.15 Hasil tes Kinerja Bahan pada <i>Scale Cold Storage Laboratory</i> (a) <i>Aquades</i> (b) PCM.....	77
Gambar 4.16 Hasil tes Kinerja Bahan pada <i>Scale Cold Storage Laboratory</i> (a) NaCl/H ₂ O (b) KCl/H ₂ O (c)NaNO ₃ /H ₂ O dengan Penambahan Agen Nukleasi.....	79

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Jenis PCMs beserta Kelebihan dan Kekurangan	10
Tabel 2.2 Sifat Termofisika Material Penyimpanan Dingin.....	14
Tabel 2.3 Sifat Termokimia Natrium Nitrat	20
Tabel 2.4 Sifat Termokimia Natrium Klorida	21
Tabel 2.5 Sifat Termokimia Kalium Klorida	21
Tabel 2.6 Penelitian Sebelumnya	26
Tabel 3.1 Spesifikasi Serbuk KCl	29
Tabel 3.2 Spesifikasi Serbuk NaCl.....	29
Tabel 3.3 Spesifikasi Serbuk NaNO ₃	30
Tabel 3.4 Spesifikasi serbuk N ₂ B ₄ O ₇ .10H ₂ O.....	30
Tabel 3.5 Kalibrasi Sensor Pada Temperatur 25,1 - 0°C	36
Tabel 3.6 Kalibrasi Sensor pada Temperatur 0 – (-24,7)°C	36
Tabel 3.7 Rancangan Penelitian	54
Tabel 4.1 Data Hasil Pengujian Chamber Test untuk Aquades ..	57
Tabel 4.2 Data Hasil Pengujian Chamber Test untuk PCM	59
Tabel 4.3 Data Hasil Pengujian Chamber Test untuk NaCl/H ₂ O	60
Tabel 4.4 Data Hasil Pengujian Chamber Test untuk KCl/H ₂ O..	63
Tabel 4.5 Hasil Pengujian Chamber Test NaNO ₃ /H ₂ O	66
Tabel 4.6 Hasil Pengujian Chamber Test NaCl/H ₂ O sebelum dan setelah Penambahan 1wt% Boraks	71
Tabel 4.7 Hasil Pengujian Chamber Test KCl/H ₂ O sebelum dan setelah Penambahan 1wt% Boraks	73
Tabel 4.8 Hasil Pengujian Chamber Test NaNO ₃ /H ₂ O sebelum dan setelah Penambahan 1wt% Boraks.....	74
Tabel 4.9 Komparasi Larutan NaCl/H ₂ O, KCl/H ₂ O dan NaNO ₃ /H ₂ O berdasarkan Karakteristik PCM	80

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Hal yang menarik dari penyimpanan energi panas salah satunya yaitu penyimpanan berbasis panas laten. Panas laten digunakan pada material berubah fasa *Phase Change Material* atau PCM. PCM memanfaatkan panas laten untuk mengubah fasa suatu material, misalnya perubahan dari fasa padat ke cair dan sebaliknya pada kondisi temperatur yang tetap yang membuat PCM memiliki fungsi yang lebih baik dari penyimpanan berbasis panas sensibel yang hanya memanfaatkan perubahan temperatur. Pemanfaatan panas laten pada PCM merupakan metode paling efisien untuk penyimpanan energi panas(Oro dkk, 2012). Hal inilah yang membuat PCM sangat penting untuk dikaji.

PCM memiliki beberapa permasalahan dalam penerapannya, salah satunya *supercooling*. *Supercooling* merupakan kondisi dimana masih tersisanya air ketika seharusnya semua air berubah menjadi beku, hal ini menyebabkan terhambatnya proses kristalisasi serta penyimpanan dan pelepasan panas laten di dalam material (Tan dkk,2014). Menurut Gao dkk (2013) masalah *supercooling* dapat diatasi dan dikurangi salah satunya dengan menambahkan agen nukleasi ke material PCM. Pada penelitian yang dilakukan oleh Ozgur dkk (2006) menyebutkan penambahan agen nukleasi pada larutan Garam Glauber menghasilkan penurunan *supercooling* sebesar 1-2 °C . Penggunaan *borax* sebagai agen nukleasi pada Garam Glauber memberikan efek pengurangan *supercooling* hingga 2°C saat 2,5%-3% (Telkes,1953)

Cold storage pada umumnya menggunakan sistem refrigerasi berbasis energi listrik yang secara terus menerus digunakan menjaga produk dalam keadaan dingin. Dalam hal ini energi yang digunakan cukup besar namun



dengan bahan PCM, hal tersebut dapat diminimalisasi. Salah satunya dengan menggunakan sistem *hybrid* pada sistem penyimpanan dingin yang dilakukan oleh Liu dkk pada tahun 2006. Penelitian tersebut memanfaatkan energi listrik hanya untuk membekukan bahan PCM, proses pembekuan bahan PCM dilakukan sebelum proses pendinginan produk dan pada saat temperatur ruangan *cold storage* melewati temperatur batas tertentu. Liu menggunakan apparatus *Eviromental Test Chamber* untuk mendapatkan karakteristik *thermal* pada pembekuan dan pencairan dari jenis PCM-34 yang komposisi bahannya tidak dikomersilkan.

Pada tugas akhir fokus riset adalah bahan dasar PCM yang digunakan untuk media penyimpanan makanan beku (dibawah 0°C) pada *cold storage*. Bahan dasar PCM yang digunakan harus mempunyai temperatur beku dibawah 0°C . PCM yang digunakan pada penelitian ini berasal dari campuran garam dan air yang memiliki temperatur beku dibawah 0°C . Menurut penelitian Li (2013) larutan garam dan air memiliki titik beku -62° sampai $-1,6^{\circ}\text{C}$.

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh penambahan komposisi serta penambahan agen nukleasi terhadap derajat *supercooling* larutan garam/ H_2O serta menganalisis kinerja larutan pada komposisi eutektik larutan garam/ H_2O . Bahan yang diuji pada penelitian ini yaitu *Aquades* murni, PCM komersial, serta larutan garam $\text{NaCl}/\text{H}_2\text{O}$, $\text{KCl}/\text{H}_2\text{O}$ dan $\text{NaNO}_3/\text{H}_2\text{O}$, komposisi garam pada setiap larutan garam jenisnya sebanyak 5, 10, 15, 20 %wt garam serta pada larutan eutektik garam yaitu sebesar 22,3 ; 19,7 dan 39%wt. Penambahan *boraks* sebesar 1 % diberikan pada masing-masing %wt larutan garam/ H_2O sebagai agen nukleasi. Penelitian ini menggunakan *Test Chamber* untuk mengetahui karakteristik sifat *thermal* PCM serta menggunakan mesin *Scale Laboratory Cold Storage* untuk mengetahui kinerja PCM yang terbuat dari komposisi eutektik.



1.2 Rumusan Permasalahan

Berdasarkan penjelasan pada latar belakang di atas, maka rumusan permasalahan dalam Tugas Akhir ini adalah :

1. Bagaimana pengaruh komposisi garam terhadap derajat *supercooling* larutan garam/H₂O ?
2. Bagaimana pengaruh penambahan agen nukleasi terhadap derajat *supercooling* larutan eutektik garam/H₂O ?
3. Bagaimana kinerja larutan garam/H₂O pada komposisi eutektik yang diaplikasikan sebagai PCM untuk *Cold Storage* ?

1.3 Batasan Masalah

Untuk menganalisis masalah pada penelitian ini terdapat beberapa batasan masalah sebagai berikut :

1. Kondisi lingkungan dianggap tidak berpengaruh.
2. Pengotor diabaikan
3. Larutan dianggap tercampur merata
4. Laju pendinginan didalam *Test Chamber* dan *Scale Laboratory Cold storage* dianggap konstan
5. Posisi peletakkan PCM diabaikan
6. Laju pendinginan di dalam *Test Chamber* dan *Scale Laboratory Cold storage* dianggap merata

1.4 Tujuan

Tujuan penelitian ini adalah :

1. Menganalisis pengaruh komposisi garam terhadap derajat *supercooling* larutan garam/H₂O
 2. Menganalisis pengaruh penambahan agen nukleasi terhadap derajat *supercooling* larutan eutektik garam/H₂O
 3. Menganalisis kinerja larutan garam/H₂O pada komposisi eutektik yang diaplikasikan sebagai *Cold Storage*.
-



1.5 Manfaat Penelitian

Penelitian ini diharapkan dapat bermanfaat bagi kemajuan teknologi dalam pengembangan material yang digunakan sebagai material dasar berbasis *Phase Change Material* yang diaplikasikan untuk *Cold Storage* yang membantu proses penyimpanan makanan beku.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

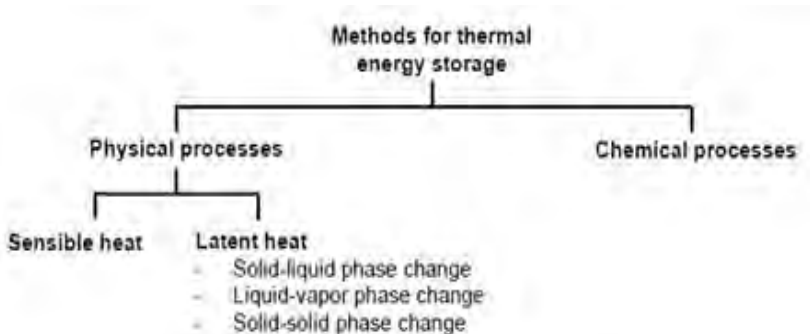
2.1 Penyimpanan Energi Thermal

Beberapa sifat fisika yang menjelaskan tentang penyimpanan energi thermal yaitu :

1. Kapasitas panas spesifik (C_p)
2. Titik Lebur (T_m)
3. Panas Laten dari pembentukan (H_m atau L_f)

Sistem TES diklasifikasikan menjadi penyimpanan panas sensibel dan penyimpanan panas laten (Berera, Geetha. 2006).

Thermal Energy Storage (TES) atau bisa disebut dengan *heat and cold storage*, menggunakan prinsip penyimpanan panas atau dingin untuk digunakan kemudian. Terdapat beberapa metode penyimpanan untuk membuatnya bersifat *reversible* yaitu dengan proses fisika dan kimia seperti pada Gambar 2.1 berikut.



Gambar 2.1 Metode untuk Penyimpanan Panas dan Dingin (Mehling dan Cabeza.2008)

Berikut merupakan penjelasan dari penyimpanan panas sensibel dan penyimpanan panas laten:

2.1.1 Penyimpanan Sensibel

Prinsip penyimpanan panas sensibel dari energi termal dengan perubahan temperatur dalam keadaan padat atau cair.



Perubahan material berbasis perubahan panas dan temperatur, penyimpanan material mengabsorpsi panas dengan mekanika perpindahan panas konvensional dari radiasi, konduksi dan konveksi. Seperti material dingin pada malam hari atau pada panas pada siang hari yang menyimpan panas yang dilepaskan dengan model yang sama. Pada saat mengabsorpsi panas, temperatur naik dan berubah menjadi hangat (Pielichowska dan Pielichowski.2014).

Kalor sensibel merupakan kalor yang dibutuhkan untuk meningkatkan atau menurunkan temperatur suatu zat tanpa merubah fase zat. Persamaan kalor sensibel ditunjukkan oleh persamaan 2.1:

$$Q = m \cdot C_p \cdot \Delta T \dots\dots\dots (2.1)$$

Dimana :

Q : Energi kalor yang dilepas/ diterima zat (J)

m : massa zat (kg)

C_p : kalor spesifik (J/kg.K)

ΔT : perubahan temperatur (K)

(Holman, J.P.1997)

2.1.2 Penyimpanan Panas Laten

Energi yang disimpan sebagai panas laten selama perubahan fasa, biasanya terjadi perubahan fasa dari padat ke cair pada temperatur yang tetap. Energi yang diabsorpsi selama proses peleburan kemudian disimpan sebagai panas laten pembentuk dan dilepaskan pada saat proses pembekuan (Berera, Geetha.2006). Penyimpanan panas laten lebih efisien dalam menyimpan energi thermal. LHS mengabsorpsi atau melepas panas dari perubahan padat ke cair atau padat ke padat dan sebaliknya dengan temperatur yang tetap. (Pielichowska dan Pielichowski.2014). Persamaan kalor laten suatu zat dapat ditulis dengan persamaan 2.2

$$Q = m \cdot h_1 \dots\dots\dots (2.2)$$

Dimana :

Q : Energi kalor yang dilepas/ diterima zat (J)

m : massa zat (kg)



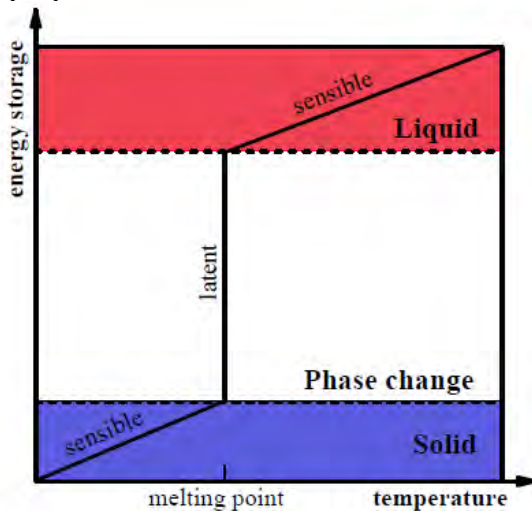
h_1 : kalor laten (kJ/kg)

(Holman,J.P.1997).

2.2 Phase Change Material (PCM)

Phase Change Material (PCM) adalah salah satu jenis material penyimpan energi yang menggunakan prinsip panas laten dari proses solidifikasi dan pelelehan. Material jenis ini akan menyimpan energi panas ketika berubah fasa dari padat ke cair, dari cair ke gas ataupun dari padat ke padat, kemudian material ini akan melepaskan energi panas ketika fasa berubah sebaliknya. Energi termal pada saat material ditransfer dari perubahan padat ke cair atau dari cair ke padat. Hal ini disebut perubahan “Fasa”.

PCM dengan fasa padat menjadi cair ditunjukkan seperti material penyimpan konvensional, temperatur yang keluar panasnya disimpan(Sharma dkk. 2007). Berikut merupakan prinsip dari PCM terdapat pada Gambar 2.2.

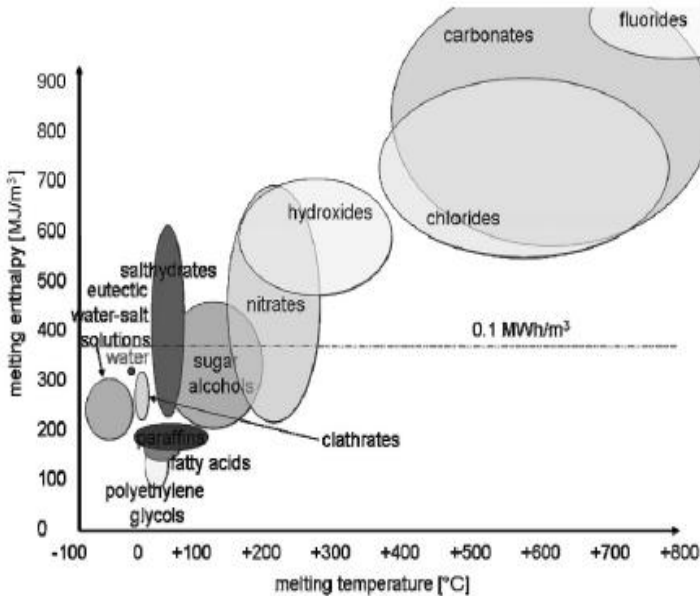


Gambar 2.2 Prinsip dari PCM (Gao dkk 2013)

Pada Gambar 2.2 menunjukkan energi panas sensible menyerap dan melepas energi yang menyebabkan temperatur



berubah, pada material yang memanfaatkan panas laten saat proses pemanasan, maka terjadi penyimpanan energi untuk berubah fasa, kemudian material ini akan melepaskan energi panas ketika fasa berubah sebaliknya. penyerapan atau pelepasan energi panas pada temperatur yang relatif konstan. (Mehling dan Cabeza.2008)



Gambar 2.3 Klasifikasi Material PCM beserta tipe temperatur lebur dan entalpi lebur (Mehling dan Cabeza.2008)

Pada Gambar 2.3, ditunjukkan bahwa PCM didapatkan dari beberapa tipe material, sesuai dengan temperatur lebur dan entalpi lebur. PCM diklasifikasikan menjadi organik, anorganik, dan eutektik. Pengaplikasian digunakan sesuai temperatur yang diperlukan. PCM organik terbagi menjadi parafin dan non-parafin. Non-parafin yaitu asam lemak, ester, alkohol, dan glikol. PCMs anorganik terbagi menjadi garam terhidrasi termasuk garam Glauber (natrium sulfat decahydrate) dan logam PCM eutektik



terbentuk dari dua atau lebih komponen yang masing-masing mencair dan membeku kongruen membentuk campuran kristal komponen selama proses kristalisasi. (Sinha dan Sinha, 2013).

PCM memiliki beberapa sifat termofisik, kinetik, kimia dan lainnya sebagai berikut :

1. Sifat *Thermal*

PCM memiliki kelebihan berikut dari segi ketahanan *thermal* antara lain temperatur transisi fasa T_f yang cocok digunakan untuk berbagai aplikasi, panas laten transisi yang tinggi dan perpindahan panas yang baik. Saat memilih PCM untuk aplikasi tertentu, temperatur operasi dari pemanasan atau pendinginan perlu disesuaikan dengan temperatur transisi PCM itu sendiri. Panas laten harus disesuaikan setinggi mungkin khususnya pada basis volumetrik untuk meminimalisasi ukuran fisis dari penyimpanan panas. Konduktivitas panas yang tinggi juga mempengaruhi proses pengisian dan pelepasan dari penyimpanan energi.

2. Sifat Fisis

Dari segi fisis, PCM memiliki sifat antara lain fase ekuilibrium yang baik, densitas yang tinggi, perubahan volume yang kecil dan memiliki tekanan uap air yang rendah. Kestabilan fasa selama proses pembekuan dan peleburan akan membantu pengaturan penyimpanan panas dan densitas yang tinggi bertujuan untuk memberikan ukuran yang kecil dari container penyimpanan. Perubahan volume yang kecil saat transformasi fasa dan tekanan uap air yang kecil pada temperature operasi berfungsi untuk mengurangi masalah pengisian.

3. Sifat Kinetik

Dari sifat kinetik, PCM memiliki sifat antara lain tanpa *supercooling* dan laju kristalisasi yang cukup baik. *Supercooling* sendiri telah menjadi aspek permasalahan pada pengembangan PCM secara khusus untuk hidrat garam. *Supercooling* lebih dari beberapa derajat akan mengganggu



dengan ekstraksi panas yang wajar dari media penyimpanan dan sekitar 5-10 ⁰C dari *Supercooling* bisa mencegahnya masuk.

4. Sifat Kimiawi

Dari sifat kimiawi, PCM memiliki sifat antara lain memiliki kestabilan kimiawi yang lama, cocok untuk material konstruksi, tidak beracun dan tidak memiliki bahaya kebakaran. PCM dapat memberikan gejala degradasi dengan menghilangkan air dari hidrasi, dekomposisi kimia atau ketidakcocokan dengan material konstruksi. PCM harus tidak beracun, tidak mudah terbakar dan tidak mudah meledak untuk keamanannya.

5. Sifat Ekonomis

Dari sifat ekonomis, PCM memiliki sifat antara lain jumlahnya yang berlimpah, tersedia dan harga yang efektif. Harga yang murah dan ketersediaan dalam jumlah besar dari PCM adalah hal yang sangat penting dalam pengembangannya (Sharma dkk.2007).

Untuk mendapat material penyimpan panas laten harus memperhatikan sifat termodinamik, kinetik, sifat fisika dan sifat kimia, selain itu faktor ekonomi. Berikut merupakan Tabel 2.1 klasifikasi material PCM.

Tabel 2.1 Jenis PCMs beserta Kelebihan dan Kekurangan (Gao dan Tialong .2013)

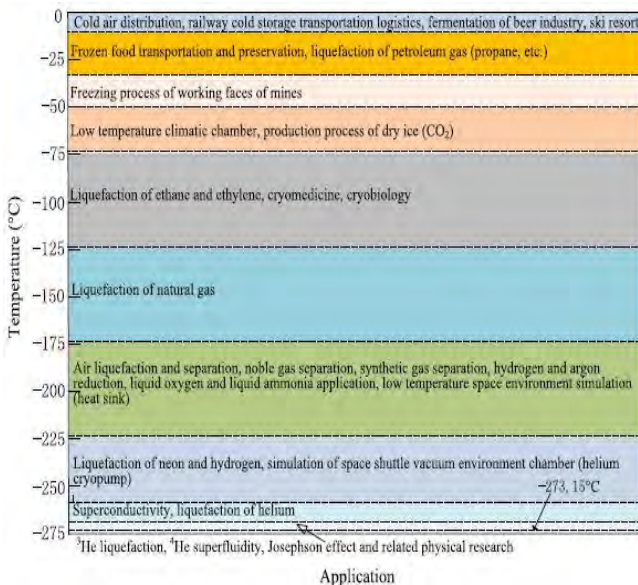
Klasifikasi	Kelebihan	Kekurangan
PCMs Organik	Tersedia dalam rentan temperatur yang besar Rendah atau tidak ada <i>supercooling</i> Reaksi kimia dan dapat didaur ulang Cocok dengan material lain	Kapasitas panas laten yang rendah Konduktivitas thermal rendah Mudah terbakar Rentan perubahan volum relatif besar
PCMs Anorganik	Panas fusi yang tinggi Konduktivitas panas yang tinggi	<i>Supercooling</i> Pemisahan fasa



	Perubahan volume rendah Tersedia dan murah	Stabilitas thermal kurang Korosi
Eutektik	Temperatur lebur yang tajam Volum penyimpanan massa jenis thermal yang tinggi	Tes fakta sifat termofisika kurang

2.3 Klasifikasi berbagai jenis Aplikasi Cold Storage Bawah Nol

Pada Gambar 2.4 merupakan klasifikasi berbagai jenis aplikasi *cold storage* untuk penyimpanan di bawah nol derajat *celcius*.



Gambar 2.4 Klasifikasi Berbagai Jenis Aplikasi *Cold Storage* Bawah Nol(Li dkk,2013)

Gambar 2.4 *Coldstorage* mempunyai kriteria sesuai dengan bahan yang akan disimpan. Di mulai dari 0° C hingga –



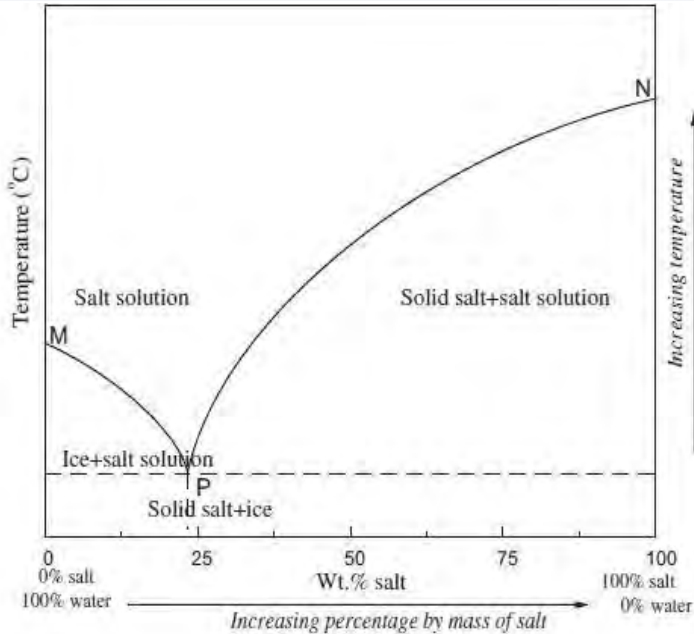
275 °C pada kondisi cair padat, temperatur perubahan fasa dan panas laten yang lebih besar merupakan persyaratan yang paling penting dalam aplikasi penyimpanan dingin dibawah nol derajat. (Li dkk,2013)

2.4 Larutan Campuran Air-Garam Eutektik

2.4.1 Spesifikasi Larutan Eutektik Air-Garam

Larutan eutektik yang terdiri dari komponen yang membentuk campuran titik leleh rendah, memberikan substansi yang unik untuk mengembangkan material. Contoh larutan eutektik adalah natrium klorida dan air. Larutan ini memiliki titik lebur eutektik pada -21,2 °C digunakan untuk membantu pencairan es atau menghasilkan es dengan temperatur rendah (Chen, dkk, 2005).

Larutan garam eutektik sering digunakan pada *Phase Change Material* karena memiliki panas laten yang besar dan rentan temperatur fasa yang baik. Sifat termal dari larutan eutektik garam dan air memiliki perbedaan temperatur dari -62 °C sampai -16 °C, Secara umum larutan eutektik garam-air pada tabel. PCMs mempunyai kelebihan panas dan massa jenis yang tinggi. Namun memiliki masalah pada pemisahan fasa pendinginan (Li dkk.2013). Berikut merupakan Gambar 2.5 tipe sistem diagram fasa biner padat-cair.



Gambar 2.5 Diagram Fasa Larutan Eutektik Garam-Air(Li dkk.2013)

Gambar 2.5 menjelaskan pada umumnya titik beku air turun saat ditambahkan garam. Semakin banyak garam yang ditambahkan maka titik beku semakin turun, tetapi eutektik air dan garam tidak dapat terbentuk dari larutan murni atau bentuk padat. Pada diagram fasa eutektik larutan air-garam, titik beku pada 0°C ketika komposisinya 100% air. Dengan tambahan beberapa garam titik beku dari air-garam menurun. Penambahan ini sampai ke titik eutektik (titik P). Pada titik ini baik garam dan air beku keluar dari larutan dan komposisi dari material beku dibuat sama dengan larutan. Dengan penambahan garam, temperatur beku larutan mulai naik dan garam *anhydrous* tumbuh keluar pembekuan. Dibawah konsentrasi partikel garam (Titik P) larutan beku dan leleh komplit dari cairan/ padat ke padat/cairan pada temperatur tetap (Titik P) dengan melepaskan energi yang besar. PCM seperti ini disebut



dengan larutan air-garam eutektik (Li dkk.2013). Berikut Tabel 2.2 merupakan sifat termofisika material untuk *cold storage*.

Tabel 2.2 Sifat Termofisika Material Penyimpanan Dingin (*cold storage*) (Oro dkk, 2012)

Komposisi	Tipe	Melting Temperature (°C)	Panas Laten (kJ/kg)
24,8 %wt HCl	Larutan eutektik garam-air	-86	-73,77
24 %wtLiCl	Larutan eutektik garam-air	-67	-36,26
30,5%wt CaCl ₂	Larutan eutektik garam-air	-49,5	-76,81
36%wt NaNO ₃	Larutan eutektik garam-air	-17,7	187,79
23,3%wt NaCl	Larutan eutektik garam-air	-21,2	233
19,7%wt KCl	Larutan eutektik garam-air	-10,6	18,43
0,8%wt NaCl	Larutan eutektik garam-air	-	235
4,3%wt NaCl	Larutan eutektik garam-air	-	231
8,4%wt NaCl	Larutan eutektik garam-air	-	233
26,3%wt NaCl	Larutan eutektik garam-air	-	234
27,9%wt Li ₂ SO ₄	Larutan eutektik garam-air	-23	-26,10
22,1%wt BaCl ₂	Larutan eutektik garam-air	-7,7	-10,2



2.4.2 Kristalisasi Pembekuan Eutektik

Konsep dari pembekuan larutan yaitu pemisahan antara air dan zat terlarut. Titik eutektik terdiri dari dua komponen yaitu air dan garam. Keuntungan menggunakan larutan eutektik air dan garam :

1. Proses ini tidak rumit dengan penambahan senyawa kimia yang ditambahkan
2. Dari sudut pandang termodinamika, sebagai panas penguapan adalah enam kali lebih tinggi dari panas laten pembekuan air dan garam dimana energi intensif lebih kecil dari energi penguapan.
3. Pengotor yang dikeluarkan dari struktur es selama kristalisasi es
4. Kristal es yang dihasilkan dapat digunakan untuk penyimpanan panas dingin
5. Pemisahan gravitasi es dan garam adalah keuntungan tambahan selamakristalisasi pembekuan eutektik sejak kondisi eutektik keduaproduk terpisah sebagai akibat dari perbedaan densitas air dan garam. Garam tenggelam ke bagian bawah crystallizer sementara es mengapung ke atas.

(Randall D.G dkk, 2010)

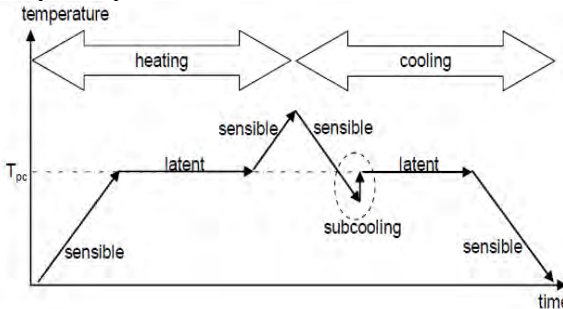
2.4.3 Garam sebagai Larutan Inonik

Larutan ionik adalah garam dari kation organik dengan temperatur *melting* yang rendah, dikarakterisasikan berdasarkan kisaran temperatur yang digunakan, stabilitas termal yang tinggi, tinggikepadatan ion dan *designability*. Beberapa kation organik seperti imidazolium, amonium, pyridinium dan aniontermasuk halida, nitrat, hexafluorophosphate, tetrafluoroborate, tiosianat dan sulfanilamida yang digunakan untuk membuat bahan-bahan tersebut. Resultan cairan ionik ini umumnya memiliki antara fisik dansifat kimia untuk organik dan anorganiksenyawa. Namun, juga dikenal untuk memberikansifat termal yang unik. Dengan demikian, beberapa cairan ionik terpilih sebagai energi panas yang potensialsebagai alat penyimpanan.(Baht dkk,2010)



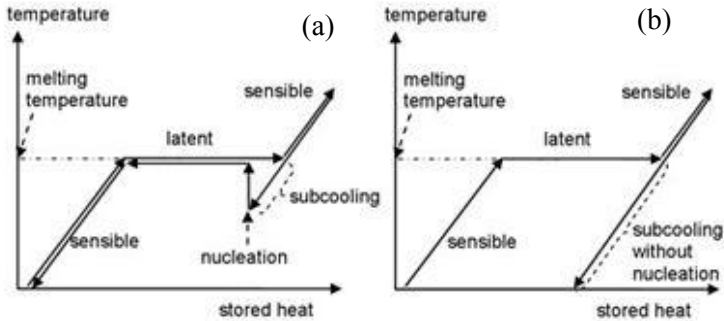
2.5 Supercooling / Supercooling

Beberapa PCM memulai kristalisasi setelah temperatur dibawah titik lebur tercapai, fenomena inidisebut *supercooling/ supercooling*(pendinginan). *Supercooling* merupakan masalah yang serius pada aplikasi PCMs.



Gambar 2. 6 Skematik Perubahan Temperatur selama Pemanasan (meleleh) serta Pendinginan (memadat) pada PCM dengan *Supercooling*(Mehling dan Cabeza.,2008)

Gambar 2.6 menjelaskan konsep terjadinya *supercooling* yang terjadi saat pembekuan. Pada saat dipanaskan material mengalami perubahan temperatur kemudian pada titik leburnya material mulai berubah fasa dengan melepas energi sehingga temperatur tetap tidak berubah kemudian material didinginkan , material mengalami perubahan temperatur. Material yang mengalami pendinginan belum dapat beku pada titik pembekuannya dikarenakan terjadi *supercooling* yang menghambat proses pembekuan sehingga tidak terjadi nukleasi dan panas laten tidak dapat dilepaskan semuanya serta material hanya menyimpan panas *sensible* (Mehling dan Cabeza,2008). *Supercooling* merupakan selisih antara temperatur pembekuan dengan temperatur pada saat sampel bernukleasi (Gholaminejad dan Reza .2013).



Gambar 2.7 Pengaruh *supercooling* pada Penyimpanan Panas
(a) sedikit *supercooling* setelah diberi agen nukleasi,
(b) *supercooling* berlebihan tanpa terjadi nukleasi (Mehling, dan Cabeza., 2008)

Pada Gambar 2.7 menjelaskan pengaruh *supercooling* pada saat material mengalami penambahan agen nukleasi ada pada material yang mengalami *supercooling* berlanjut. Masalah *supercooling* dapat diatasi dengan cara (i) penambahan agen nukleasi, (ii) pengadukan mekanik, (iii) penambahan eberapa pengotor, (iv) teknik jari dingin, (v) enkapsulasi PCM untuk mengurangi *supercooling*. Banyak material yang tidak menerima konduktivitas thermal, pengisian lambat dan laju pengosongan. Selama jumlah penyimpanan panas atau dingin dari PCM terdapat dalam volum kecil, transfer energi akan terhambat akibat konduktivitas thermal yang rendah. Konduktivitas thermal yang baik, dapat menyimpan atau melepas panas laten yang diberikan pada volume penyimpanan material dalam waktu yang singkat sehingga teknik peningkatan transfer panas wajib untuk banyak aplikasi energi thermal panas laten (Gao dan Tialong., 2013).

2.6 Sifat Koligatif Air

Air memiliki beberapa sifat koligatif yaitu pada saat bahan ditambahkan kedalamnya (air), sifat yang dimunculkan dapat diketahui jika jumlah partikel diketahui. Beberapa sifat koligatif



ini yaitu tekanan uap (ketika air pada keadaan setimbang dengan uapnya sendiri), tekanan osmosis (tekanan mengontrol difusi dari pelarut yang melalui *membrane semipermeabel*), titik didih (temperature dimana air berubah fasa menjadi gas) dan titik beku (temperature dimana air berubah fasa menjadi padat). Empat hal tersebut akan terpengaruh ketika kita menambahkan sejumlah partikel terlarut seperti gula atau garam pada satu liter air murni, akan ada beberapa konsekuensinya.

Tekanan uap akan turun sedangkan tekanan osmosis akan naik. Titik didih akan berelevasi sedikit diatas titik didih normal 100°C. Begitupun untuk titik bekunya. Titik beku air dengan penambahan bahan tersebut akan turun dibawah titik beku air normal 0°C. Penurunan titik beku ini juga dinamakan sebagai *freezing-point depression*. Hal ini aplikasikan khususnya pada daerah bersalju. Ketika jalan dipenuhi dengan es dan salju maka garam ditaburkan pada daerah tersebut agar pada temperature tersebut air tetap mencair (Stewart.2009). Berikut merupakan persamaan 2.3 untuk mencari *freezing-point depression*, penurunan titik beku :

$$\Delta T_f = K_{f,1} m_2 \dots\dots\dots(3)$$

Dimana:

m_2 : molalitas zat terlarut

$K_{f,i}$: *freezing point depression constant* untuk pelarut spesifik

Nilai *freezing-point depression* ini juga dapat dihasilkan dari persamaan 2.4 berikut :

$$K_{f,1} = \frac{M_1 R T_{m,1}^2}{\Delta_{fus} H_{m,1}} \dots\dots\dots(4)$$

Dimana :

m_2 : molalitas zat terlarut (molal)

$K_{f,i}$: *freezing point depression constant* untuk pelarut spesifik

M = molaritas (M)

T = Temperatur (K)



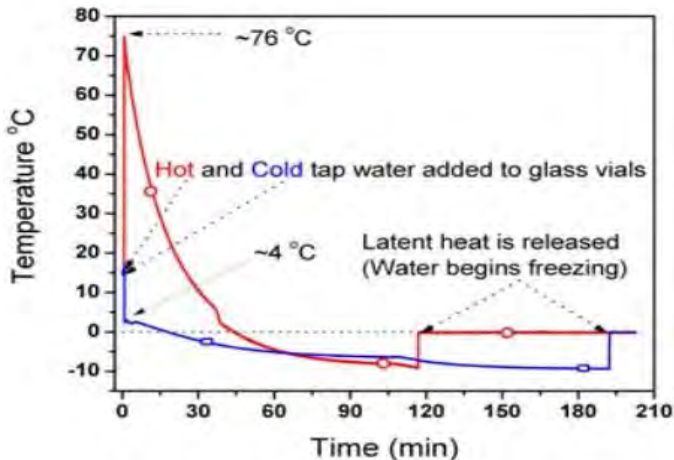
m_2 : molalitas zat pelarut (molal)

R= tetapan gas (0,082 L.atm/mol.K)

Freezing point depression constant($K_{f,i}$) memiliki nilai yang berbeda untuk masing-masing pelarut tetapi tidak bergantung terhadap zat terlarut. Bila ada zat terlarut tertentu, m_2 digantikan dengan sejumlah molalitas dari semua zat terlarut tersebut. Bila zat terlarut terdisosiasi atau terionisasi, total molalitas dari semua spesies zat terlarut harus digunakan, walaupun demikian pasangan ion juga perlu dihitung. Penurunan titik beku bias digunakan untuk menghitung ionisasi dari elektrolit lemah (Mortimer, 2008).

2.7 Efek Mbemba

Efek Mpemba didefinisikan sebagai sebuah fenomena pada sampel air panas yang membeku lebih cepat dibandingkan air dingin(Tan dkk, 2012).



Gambar 2. 8 Kurva pendinginan pada air panas dan air dingin(Tan dkk, 2012).

Seperti pada Gambar 2.8, dua wadah yang sama menampung air dalam jumlah yang sama dengan temperatur berbeda diletakkan dalam pendingin, dan diamati bahwa air panas membeku terlebih



dahulu.. Air murni dapat membeku dibawah 0 °C pada tekanan atmosfer. Air dapat membeku pada 0° C fenomena ini terjadi biasanya saat pendinginan air yang membentuk kristal es yang seperti pada permukaan tanah .(Brownrigde.2002)

2.8 Material Garam

2.8.1 Natrium Nitrat

Komposisi pada Natrium nitrat yaitu Na 27.08%, N 16.48%, O 56.47%. Natrium Nitrat mempunyai sifat fisis yaitu berbentuk solid kristal,tidak berasa, struktur berbentuk trigonal dan rhombohedral, massa jenis 2.257g/cm³, indeks reaktif 587 (trigonal) and 1,336 (rhombohedral). Natrium nitrat meleleh pada 308°C, terdekomposisi pada 380°C, memiliki konduktansi spesifik 95 μmhos/cm pada 300°C, kekentalan 2,85 sentipois pada 317°C,sangat mudah terlarut dalam air yakni 92.1 g/100 mL pada 25°C dan 180 g/100 mL pada 100°C, dapat terlarut dalam amoniak dan alkohol. Natrium nitrat memiliki sifat thermokimia, berikut merupakan Tabel 2.3 sifat thermokimia Natrium nitrat.

Tabel 2.3 Sifat Thermokimia Natrium Nitrat
(Patnaik,Pradyot,2002)

Sifat	Nilai
ΔH_f°	-111.82 kcal/mol
ΔG_f°	-87.73 kcal/mol
S°	27.85 cal/°mol
C_p	22.20 al/°mol

2.8.2 Natrium Klorida

Kristal berbentuk granular atau serbuk besarnya tidak berwarna transparan dan berstruktur kubik. Bahan ini juga memiliki indeks refraksi 1,5422, densitas 2,165 g/cm³, titik lebur pada 801°C, menguap pada 1413°C, larut dalam air (batas kelarutan 35,7gram/100mL pada 0°C dan 39,1gram/100 mL pada



100°C), larut dalam gliserol, larut dalam etilen glycol dan membentuk asam. Dalam methanol memiliki kelarutan 1,49gram/100 mL), pada amonia cair memiliki kelarutan 2,15 gram/100mL) dan tidak larut dalam asam hidroklorida. Kristal besarnya tidak berwarna, transparan dan berstruktur kubik. NatriumKlorida memiliki sifat termokimia pada Tabel 2.4 :

Tabel2.4 SifatTermokimia Natirum Klorida(Patnaik, 2002)

Sifat	Nilai
ΔH_f°	-98,27kcal/mol
ΔG_f°	-91,82kcal/mol
S°	17,24 cal/°mol
C_p	12,07 cal/°mol

2.8.3 Kalium Klorida

Kalium klorida biasanya ditemukan di air laut dengan konsentrasi 0,076%(w/v). Kalium Klorida sangat penting untuk berbagai aplikasi. Kalsium Klorida digunakan untuk memproduksi bahan untuk logam kalium dan beberapa garam lain seperti kalium nitrat, kalium hidroksida dan kalium sulfat. kalium Klorida memiliki sifat fisik yaitu berbentuk kristal padat, struktur kubik , massa jenis 1,98 g cm³ , titik leleh 770°C,; menyublim pada 1.500°C , terlarut dalam air pada 34,4 g/100mL at 20°C, 56,7 g/100mL dan pada glikol dan alkali di 100°C.

Tabel 2.5 SifatTermokimia Kalium Klorida(Patnaik, 2002)

Sifat	Nilai
ΔH_f°	-104,4 kcal/mol
ΔG_f°	-97,8 kcal/mol
S°	19,7 cal/mol
C_p	12,3 cal/mol



2.9 Perpindahan Panas

2.9.1 Konduksi

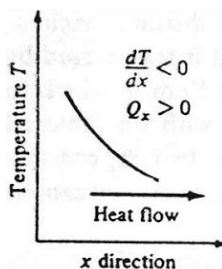
Konduksi merupakan peristiwa perpindahan panas yang terjadi pada medium yang bersinggungan langsung. Jika pada suatu benda terdapat gradient suhu maka akan terjadi perpindahan energi dari bagian bersuhu tinggi ke bagian bersuhu rendah. Persamaan untuk menyatakan perpindahan kalor secara konduksi telah dijelaskan dengan hukum Fourier pada persamaan 2.5.

$$q = -kA \frac{\partial T}{\partial x} \dots \dots \dots (2.5)$$

Dimana :

- q : laju perpindahan kalor (W)
- k : konduktivitas termal benda (W/m°C)
- A : luas bidang yang tegak lurus dengan arah laju perpindahan kalor (m²)
- $\frac{\partial T}{\partial x}$: gradient suhu ke arah perpindahan kalor (°C/m)

Pemberian tanda minus pada persamaan hukum Fourier adalah untuk memenuhi hukum kedua termodinamika, yang menyebutkan bahwa kalor mengalir ke tempat yang lebih rendah dalam skala suhu. (J.P. Holman.1997) yang ditunjukkan Gambar 2.9.

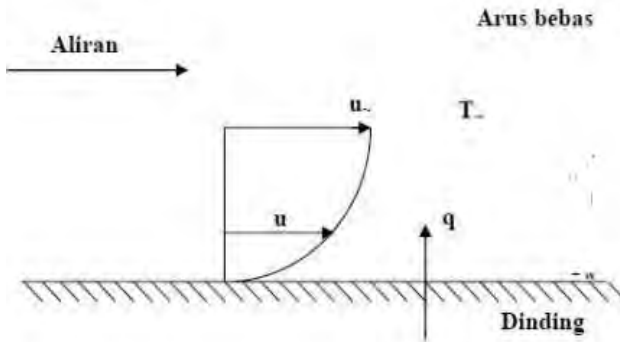


Gambar 2.9 Arah Aliran Kalor (Holman, J.P.1997)



2.9.2 Konveksi

Konveksi merupakan peristiwa perpindahan panas yang terjadi antara permukaan benda yang bersinggungan dengan fluida yang bergerak atau mengalir dan melibatkan pengaruh konduksi dan aliran fluida.



Gambar 2.10 Perpindahan Kalor secara Konveksi (J.P. Holman, 1997)

Pengaruh konduksi secara menyeluruh dapat menggunakan hukum Newton tentang pendinginan, dengan persamaan 2.6 berikut :

$$q = hA (T_s - T_f) \dots \dots \dots (2.6)$$

(Holman, J.P.1997)

Dimana :

- q : laju perpindahan kalor (W)
- h : koefisien perpindahan panas konveksi (W/m²°C)
- A : luas penampang (m²)
- T_s : Temperatur plat/benda (°C)
- T_f : Temperatur fluida yang mengalir dekat permukaan benda (°C)

2.9.3 Koefisien Perpindahan Kalor Menyeluruh

Dua fluida yang berbeda temperatur dan dipisahkan oleh dinding datar. Dimana pada satu sisi dinding datar fluida panas A dan satu sisi dinding datar lainnya fluida dingin B. Pada kasus ini dapat pula digambarkan dengan jaringan tahanan. Perpindahan



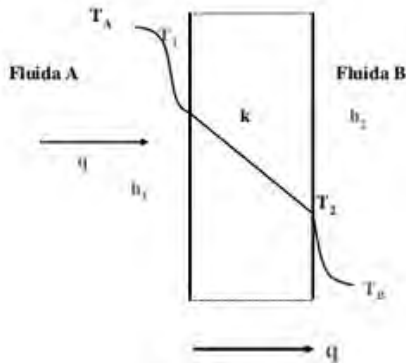
kalor menyeluruh dapat dihitung dengan membagi beda suhu menyeluruh dengan jumlah tahanan *thermal* pada persamaan 2.7.

$$q = \frac{T_A - T_B}{\frac{1}{h_1 A} + \frac{\Delta x}{kA} + \frac{1}{h_2 A}} \dots \dots \dots (2.7)$$

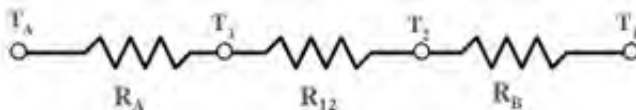
(Holman, J.P.1997)

Dimana :

- q : laju perpindahan kalor (W)
- T_A : Temperatur fluida A (°C)
- T_B : Temperatur fluida B (°C)
- k : konduktivitas termal benda (W/m°C)
- h : koefisien perpindahan panas konveksi (W/m²°C)
- A : luas penampang (m²)
- Δx : ketebalan dinding (m)



Gambar 2.11 Perpindahan Kalor Menyeluruh Melalui Dinding Datar(Holman, J.P.1997)



Gambar 2.12 Jaringan tahanan perpindahan kalor menyeluruh (Holman, J.P.1997)



Aliran kalor menyeluruh merupakan hasil gabungan proses konduksi dan konveksi yang dinyatakan dengan koefisien perpindahan kalor menyeluruh U yang dirumuskan sebagai persamaan 2.8.

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_1} + \frac{\Delta x}{k} + \frac{1}{h_2}} \dots\dots\dots (\text{Holman, J.P.1997})$$

Sehingga untuk menyatakan persamaan laju perpindahan kalor dapat menggunakan persamaan sebagai persamaan 2.9.

$$q = U A \Delta T_{\text{menyeluruh}} \dots\dots\dots (2.9)$$

(Holman, J.P.1997)

Dimana :

U : koefisien perpindahan kalor menyeluruh (satuan)

A : luas bidang aliran kalor

Hubungan antara energi kalor dengan laju perpindahan kalor yang terjadi dinyatakan dalam persamaan 2.10.

$$Q = q \cdot \Delta t \dots\dots\dots (2.10)$$

Dimana :

Q : Energi kalor yang dilepas/ diterima zat (J)

q : laju perpindahan kalor (Watt)

Δt : waktu yang dibutuhkan untuk memindahkan energi kalor (s)

Performa suatu insulasi termal suatu bahan dapat diukur dengan menggunakan salah satu nilai sebagai berikut : konduktivitas termal (k), *density* (ρ), ataupun kapasitas panas spesifik (c).

2.10 Penelitian Sebelumnya

Berikut merupakan beberapa penelitian terdahulu mengenai *phase change material*





Tabel 2.6 Penelitian Sebelumnya

No.	Peneliti	Variasi		Hasil
		Bahan PCM	PCM - 34	
1	Liu, Ming dkk (2006)	Bahan PCM	PCM - 34	<ul style="list-style-type: none"> • Titik beku dan leleh antara -34°C dan -35°C • Bahan <i>additive</i> mengurangi <i>supercooling</i> hingga $5,8-7^{\circ}\text{C}$
		Aditif	A, B, C	
2	Mohammed M. Farid, Amar M. Khudhair, Siddique Ali K. Razack, Said AlHallaj Judul: "A review on phase change energy storage: materials and application"	Bahan PCM: Glauber Salt ($\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$) mengandung 44% Na_2SO_4 , 46% H_2O TM $32,4^{\circ}$ Panas Laten tinggi : 254 kJ/kg (377 mJ/m^3) Masalahnya: Fase segregasi dan <i>supercooling</i> memiliki sedikit aplikasi dan dinukleasi dengan Bentonite clay. <i>Boraks</i> dinukleasi untuk meminimalisir <i>supercooling</i> (high density <i>boraks</i>)		Mengurangi segregasi fasa dan <i>supercooling</i> , namun mengurangi konduktifitas <i>thermal</i> material

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Bahan

Bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Serbuk KCl

Berikut merupakan spesifikasi KCl produk dari *SAP CHEMICALS* dapat dilihat pada Tabel 3.1

Tabel 3.1 Spesifikasi serbuk KCl

Spesifikasi	Kadar
Pengujian kadar logam	> 99,5 %
Besi	< 0,001 %
Logam berat	< 0,002%

2. Serbuk NaCl

Berikut merupakan NaCl produk dari *SAP CHEMICALS* dapat dilihat pada Tabel 3.2

Tabel 3.2 Spesifikasi serbuk NaCl

Spesifikasi	Kadar (%)
Pengujian kadar logam	>99,5%
Residu saat pembakaran	< 0,0005%
Klorida	< 0,002%
Besi	< 0,0001%
Logam berat	< 0,002%

3. Serbuk NaNO₃

Berikut merupakan NaNO₃ produk dari *SAP CHEMICALS* dapat dilihat pada Tabel 3.3



Tabel 3.3 Spesifikasi serbuk NaNO_3

Spesifikasi	Kadar
Pengujian kadar logam	>98%
Karbonat	< 1,0
Klorida	< 0,005%
Besi	< 0,001%
Logam berat	< 0,005%

4. Serbuk $\text{N}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ atau *Boraks*
Berikut merupakan produk $\text{N}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ dari SAP CHEMICALS dapat dilihat pada Tabel 3.4

Tabel 3.4 Spesifikasi serbuk $\text{N}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$

Spesifikasi	Kadar
Pengujian kadar logam	>99%
pH untuk 5% air	< 9,2-9,5
Sulfat	< 0,005%
Logam berat	< 0,002%

5. *Aquades*
Merupakan *Aqua DM* (demineral)

3.2 Alat

Alat yang digunakan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut

1. Gelas *Erlenmeyer*

Gelas *erlenmeyer* digunakan untuk menyampur serbuk garam dengan H_2O serta digunakan untuk menyampur pada *magnetic stirrer*



Gambar 3.1 *Gelas Erlenmeyer*

2. Gelas Ukur 100 ml

Gelas ukur dengan merk HERMA kelas A temperatur pemanasan sampai 20°C , digunakan untuk mengukur larutan yang akan dituangkan ke wadah untuk pengujian *enviromental test chamber*



Gambar 3.2 Gelas Ukur

3. Pipet

Digunakan untuk meneteskan larutan kedalam gelas ukur



Gambar 3.3 Pipet

4. Spatula
Spatula digunakan untuk mengambil serbuk yang akan digunakan



Gambar 3.4 Spatula

5. Cawan Petri
Cawan Petri digunakan untuk meletakkan serbuk yang akan ditimbang



Gambar 3.5 Cawan Petri

6. Neraca Digital Analitik
Neraca digital (Mettler Toledo) yang digunakan memiliki tingkat ketelitian yang sangat tinggi. Neraca ini digunakan untuk menghitung berat dari garam .



Spesifikasi Alat neraca digital (metter Toledo) :

- >Kapasitas max : 320 g
- >Ketelitian : 0,001 g
- >waktu setting : 1 s
- >beratalat : 4,6 kg



Gambar 3.6 Neraca Digital Analitik

7. *Magnetic Stirrer*

Magnetic stirrer digunakan menyampur larutan garam dan H₂O dengan kecepatan dan temperatur yang disesuaikan



Gambar 3.7 *Magnetic Strirer*



8. *Freezer*

Freezer merk MODENA Digunakan untuk rangkaian dalam pengujian *test chamber*.



Gambar 3.8 *Freezer* MODENA

Freezer merk MODENA Digunakan untuk rangkaian dalam pengujian *test chamber*. Digunakan sebagai insulasi (*chamber*) untuk membekukan larutan, *freezer* modena memiliki temperatur *freezing* minimal 0 sampai -2°C dan temperatur *freezing* maksimal tak terhingga sampai dengan $-25 \pm 3^{\circ}\text{C}$

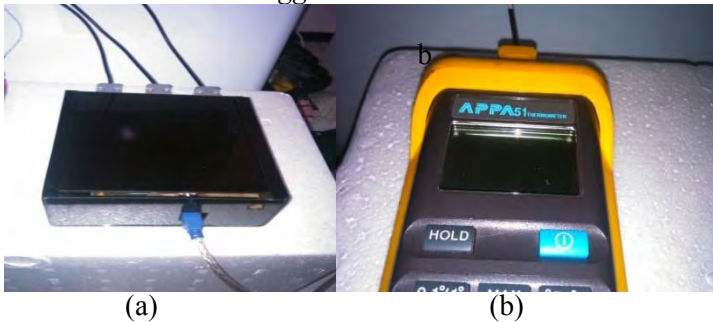
9. Wadah Tabung Silinder

Merupakan wadah yang terbuat dari stainless steel digunakan sebagai wadah larutan untuk dibekukan di dalam *chamber*



Gambar 3.9 Wadah Tabung Silinder

10. Sensor dan Data *Logger*



Gambar 3.10 a) Sensor dan Data *Logger* b) Termometer Standart APPA

Berikut merupakan spesifikasi Temperatur *data logger* menggunakan jenis sensor DS18B20 dengan jangkauan temperatur -55°C hingga 125°C . Sensor ini telah dikalibrasi dengan thermometer standar APPA 55 untuk penggunaan di temperatur minus. Berikut merupakan tabel 3.5 dan 3.6 yaitu pengkalibrasian dan *setup* ulang sensor pada temperatur 25,1 sampai 0°C dan sensor pada temperatur $0 - (-24,7)^{\circ}\text{C}$. Berikut merupakan Tabel 3.5 dan 3.6 untuk kalibrasi sensor.



Tabel 3.5 Kalibrasi Sensor Pada Temperatur 25,1 - 0°C

Kalibrasi Sensor Pada Temperatur 25,1 - 0	R ²
Sensor 1	0,9989
Sensor 2	0,9984
Sensor 3	0,9984

Tabel 3.6 Kalibrasi Sensor Pada Temperatur 0 - (-24,7)°C

Kalibrasi Sensor Pada Temperatur 0 - -24,7	R ²
Sensor 1	0,9995
Sensor 2	0,9995
Sensor 3	0,9982

11. Cold storage



Gambar 3.11 Cold storage

Cold storage yang digunakan mempunyai spesifikasi:

P = 2400 mm

L = 1260 mm

T = 2500 mm

Ruang: 2 (*freezer* dan *chiller*)



12. Labjack T7 Pro Data Logger



Gambar 3.12 Labjack T7 Pro

Data logger adalah suatu alat elektronik yang berfungsi mencatat data dari waktu ke waktu secara kontinyu. Beberapa *data logger* menggunakan bantuan perangkat komputer dan *software* sebagai tempat penyimpanan data dan analisa data. Pada percobaan ini *data logger* yang digunakan dengan spesifikasi berikut:

<i>Merk</i>	: Labjack
<i>Tipe</i>	: T7-Pro
<i>Analog</i>	: 14 analog
<i>Range</i>	: 10 s/d 0.001 V
<i>Current output</i>	: 200 μ A

13. Thermocouple

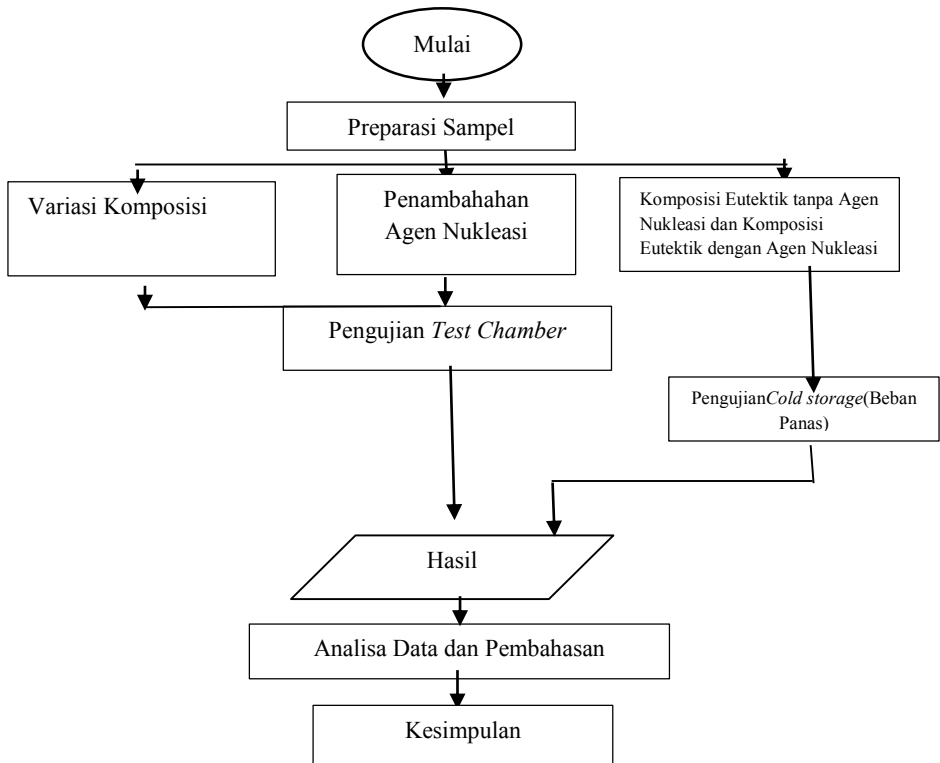


Gambar 3.13 Thermocouple



Merupakan *thermocouple* PT100 untuk FWAS T/C tipe K
untuk analisa temperatur *cold storage*

3.3 Diagram Alir Penelitian



Gambar 3.14 Diagram Alir Penelitian

3.4 Metode Penelitian

Pada penelitian ini akan dilakukan dengan metode penelitian sebagai berikut:



1. Studi Litelatur

Penelitian ini mengacu pada litelatur terkait *cold storage*, garam dan *enviromental test chamber*, baik dari buku maupun jurnal yang mempelajari terkait hal-hal tersebut

2. Eksperimental

Pengujian yang dilakukan dalam penelitian ini yaitu pengujian *Test Chamber* dan pengujian *Scale Cold Storage Laboratory*

3.5 Prosedur Penelitian

3.5.1 Preparasi Sampel

Material garam yang digunakan yaitu NaCl, KCl serta NaNO_3 . Berikut preparasi untuk membuat larutan garam/ H_2O

3.5.1.1 Preparasi Larutan Eutektik KCl/ H_2O

3.5.1.1.1 Preparasi Larutan NaCl/ H_2O

1. Menyiapkan serbuk NaCl
2. Menimbang serbuk NaCl sebanyak 5 gram
3. Memasukkan 5 gram garam ke *erlenmeyer* kemudian memasukkan aquades sampai mencapai 100 gram
4. Memasukkan larutan kedalam wadah kemudian memberikan label 5 %wt larutan NaCl / H_2O
5. melakukan langkah 1-4 untuk dengan % berat 10,15,20 serta 23,3 gram garam

3.5.1.1.2 Preparasi Larutan KCl/ H_2O

1. Menyiapkan serbuk KCl
2. Menimbang serbuk KCl sebanyak 5 gram
3. Memasukkan 5 gram garam ke *erlenmeyer* kemudian memasukkan aquades sampai mencapai 100 gram
4. Memasukkan larutan kedalam wadah kemudian memberikan label 5 %wt larutan KCl / H_2O
5. Melakukan langkah 1-4 untuk dengan % berat 10,15,20 serta 19,7 gram garam

3.5.1.1.2 Preparasi Larutan NaNO_3 / H_2O

1. Menyiapkan serbuk NaNO_3
 2. Menimbang serbuk NaNO_3 sebanyak 5 gram
-



3. Memasukkan 5 gram garam ke *erlenmeyer* kemudian memasukkan aquades sampai mencapai 100 gram
4. Memasukkan larutan kedalam wadah kemudian memberikan label 5 %wt larutan $\text{NaNO}_3/\text{H}_2\text{O}$
5. Melakukan langkah 1-4 untuk dengan % berat 10,15,20 serta 37 gram garam

3.5.2 Penambahan Agen Nukleasi

Pada penelitian ini digunakan penambahan agen nukleasi yaitu *Boraks* atau $\text{N}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ pada 5,10,15 dan 20 %wt larutan $\text{KCl}/\text{H}_2\text{O}$, $\text{NaCl}/\text{H}_2\text{O}$ serta $\text{NaNO}_3/\text{H}_2\text{O}$. Berikut merupakan langkah preparasi sample dengan penambahan *boraks* :

3.5.2.1 Penambahan 1% wt Larutan Agen Nukleasi *Boraks* $\text{NaCl}/\text{H}_2\text{O}$

1. Menyiapkan serbuk *boraks*
2. Menimbang serbuk *boraks* sebanyak 1 gram
3. Memasukkan 1 gram garam ke *erlenmeyer* kemudian memasukkan 5%wt $\text{NaCl}/\text{H}_2\text{O}$ 100 gram
4. Mengaduk larutan menggunakan magnetic *stirer* pada kecepatan 7 rpm dan temperatur 25°C selama 10 menit
5. Memasukkan larutan kedalam wadah kemudian memberikan label 1 %wt larutan *Boraks* + $\text{NaCl}/\text{H}_2\text{O}$
6. Melakukan langkah 1,2,3,4,5 kembali dengan untuk larutan eutektik 10,15,20%wt $\text{NaCl}/\text{H}_2\text{O}$

3.5.2.2 Penambahan 1% wt Larutan Agen Nukleasi *Boraks* pada $\text{KCl}/\text{H}_2\text{O}$

1. Menyiapkan serbuk *boraks*
2. Menimbang serbuk *boraks* sebanyak 1 gram
3. Memasukkan 1 gram garam ke *erlenmeyer* kemudian memasukkan 5%wt $\text{KCl}/\text{H}_2\text{O}$ 100 gram
4. Mengaduk larutan menggunakan magnetic *stirer* pada kecepatan 7 rpm dan temperatur 25°C selama 10 menit
5. Memasukkan larutan kedalam wadah kemudian memberikan label 1 %wt larutan *Boraks* + $\text{KCl}/\text{H}_2\text{O}$
6. Melakukan langkah 1,2,3,4,5 kembali dengan untuk larutan eutektik 10,15,20 serta 19,7%wt $\text{KCl}/\text{H}_2\text{O}$



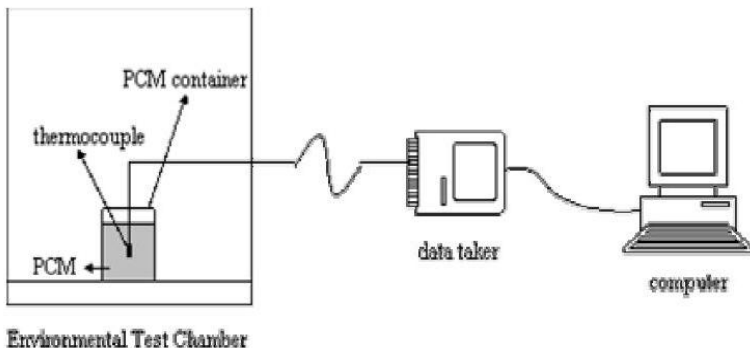
3.5.2.3 Penambahan 1% wt Larutan Agen Nukleasi Boraks $\text{NaNO}_3/\text{H}_2\text{O}$

1. Menyiapkan serbuk *boraks*
2. Menimbang serbuk *boraks* sebanyak 1 gram
3. Memasukkan 1 gram garam ke *erlenmeyer* kemudian memasukkan 5%wt $\text{NaNO}_3/\text{H}_2\text{O}$ 100 gram
4. Mengaduk larutan menggunakan magnetic *stirer* pada kecepatan 7 rpm dan temperatur 25°C selama 10 menit
5. Memasukkan larutan kedalam wadah kemudian memberikan label 1 %wt larutan *Boraks* + $\text{NaNO}_3/\text{H}_2\text{O}$
6. Melakukan langkah 1,2,3,4,5 kembali dengan untuk larutan eutektik 10,15,20%wt $\text{NaNO}_3/\text{H}_2\text{O}$

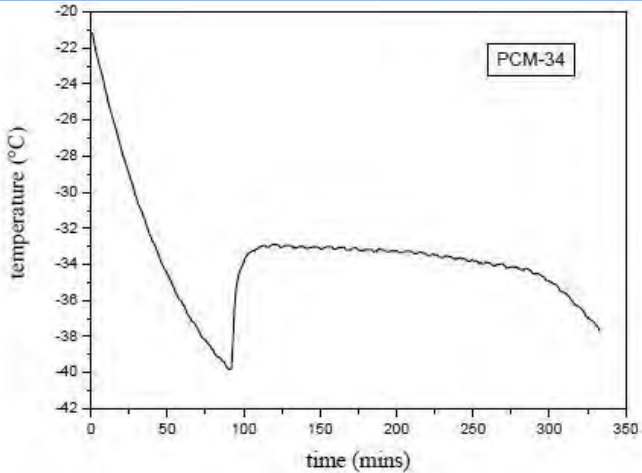
3.5.3 Pengujian

3.5.3.1 Test Chamber

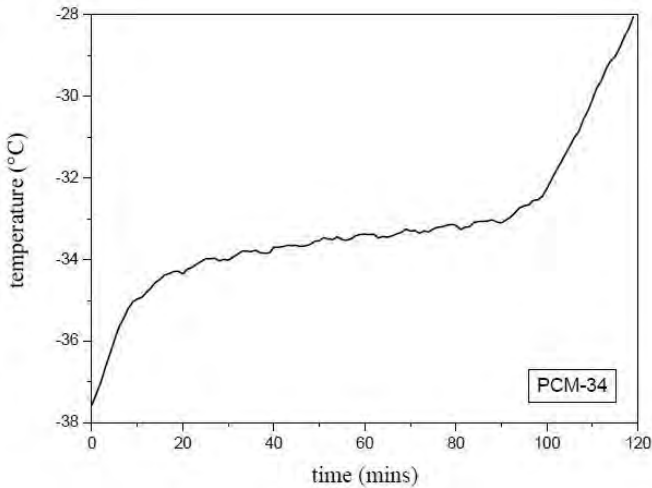
Menurut penelitian Liu dkk tahun 2006 *Enviromental Test Chamber* digunakan untuk mencairkan serta membekukan sampel dan menguji sampel untuk sejumlah siklus thermal serta mampu membekukan hingga -70°C dan memanaskan sampai 100°C . Berikut merupakan gambar skema serta kurva pendinginan dari *test chamber* yang digunakan oleh Liu dkk(2006)



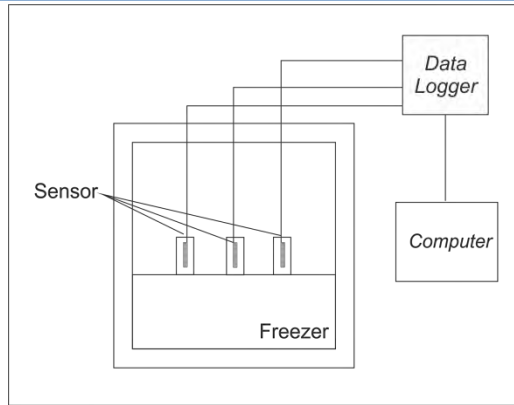
Gambar 3.15 Skema diagram *Enviromental Test Chamber* (Liu,dkk.2006)



Gambar 3.16 Grafik Kurva Pendinginan Temperatur terhadap Waktu



Gambar 3.17 Grafik Kurva Pencairan Temperatur terhadap Waktu



Gambar 3.18 Skema *Test Chamber*

Gambar skema *test chamber* dapat dilihat pada gambar 3.18. Kemudian untuk alat *test chamber* dapat dilihat pada gambar 3.19 dibawah ini .



Gambar 3.19 *Test Chamber*

Pada penelitian ini pengujian dilakukan ialah pengujian *test chamber*, untuk mendapatkan kurva pendinginan serta pencairan larutan eutektik garam/ H₂O. Pada *Test Chamber* yang digunakan pada penelitian ini mengadopsi sistem kerja skema Liu



dkk. *Chamber* menggunakan *Freezer* yang mempunyai insulasi dan *test chamber* digunakan hanya untuk membekukan sampel.

3.5.3.2 Prosedur pengujian :

1. Memasukkan sampel PCM yang terbuat dari garam serta *aquades* kedalam wadah PCM sebanyak 15 ml
2. PCM masih dalam keadaan cair karena berada dalam temperatur ruang, kemudian memasukkan PCM dalam ruangan pendingin / *freezer*
3. Menghubungkan *data logger* pada komputer atau PC
4. Meletakkan sensor masing-masing pada PCM yang berada pada wadah sehingga sensor menyentuh larutan
5. Membekukan sampel selama 2 jam
6. Mendapatkan data pembekuan dari masing-masing sensor
7. Mengolah data kedalam bentuk kurva temperatur-waktu kemudian mendapatkan titik pembekuan T_f dan titik kristalisasi T_c
8. Menghitung derajat *supercooling* dengan menggunakan rumus:
$$\Delta T = T_f - T_c > 0$$
9. Mengulangi untuk larutan garam dan air dengan komposisi garam yang berbeda kemudian untuk larutan garam, air yang ditambahkan agen nukleasi

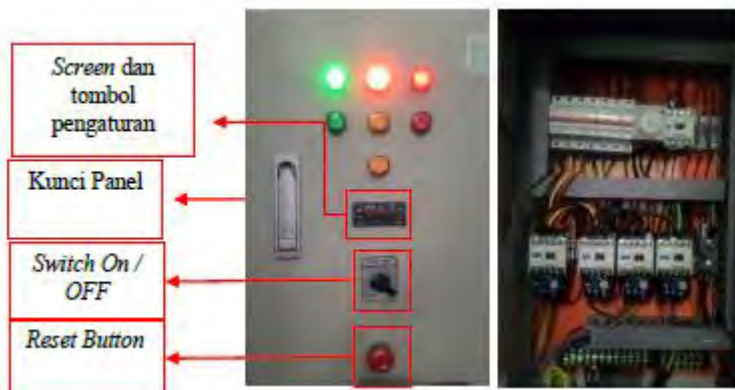
3.5.3.3 Prosedur Pengoperasian *Cold storage* Laboratorium Mesin Fluida

1. Membuka kunci pada panel listrik utama
 2. Menyalakan saklar utama pada panel listrik utama yang terdapat di pintu masuk ruangan workshop
 3. Menyalakan MCB *cold storage* yang terdapat pada panel listrik utama
-



Gambar 3.20 Panel Listrik Utama

4. Membuka kunci panel control *cold storage* yang terdapat di sebelah *cold storage*
5. Menyalakan seluruh MCB yang terdapat di dalam panel control *cold storage*
6. Menyalakan saklar lampu penerangan ruang muat *cold storage* yang terdapat di bagian depan *cold storage*
7. Menyalakan *cold storage* dengan mengubah posisi *switch button* yang semula di posisi 1 menuju posisi 2



Gambar 3.21 Panel Kontrol *Cold storage*



8. Mengatur temperatur tujuan pendinginan:
 - a. Memastikan *screen* telah menunjukkan pembacaan temperature di dalam ruang muat *cold storage*.
 - b. Menekan “SET” button sebanyak satu kali hingga screen menunjukkan tulisan SET.
 - c. Menekan “SET” button sekali lagi hingga screen memunculkan angka besarnya temperature yang akan di atur.
 - d. Mengatur kembali tujuan pendinginan.
 - e. Menekan “FNC” button untuk mengembalikan tampilan screen menjadi tampilan awal.



Gambar 3.22 Cara Melakukan *Setting* Temperatur Tujuan

9. Mengatur *differential temperature*
Differential temperature dalah rentang temperatur yang harus dijaga oleh sistem otomatis pendingin yang terpasang pada *cold storage*, adapun proses pengaturan *differential temperature* sebagai berikut:
 - a. Menekan dan menahan “SET” button hingga muncul tulisan “CP” pada screen.
 - b. Menekan “SET” button hingga muncul tulisan “dif” pada screen.
 - c. Menekan “SET” button sekali lagi hingga muncul angka besarnya *differential temperature* yang akan di atur.
 - d. Menekan “FNC” button untuk mengembalikan tampilan screen.



Gambar 3.23 Cara Melakukan *Setting Differential*

10. *Cold storage* siap digunakan.



3.5.3.4 Prosedur Mematikan *Cold storage*

1. Mengubah posisi *switch button* yang semula di posisi 2 menuju posisi 1.
2. Setelah *screen* pada panel sepenuhnya mati, mematikan seluruh MCB yang berada di dalam control panel *cold storage*.
3. Mengunci kembali control panel *cold storage*.
4. Mematikan saklar lampu penerangan ruang muat *cold storage*.
5. Mematikan MCB *cold storage* yang terdapat pada panel listrik utama.
6. Mematikan saklar utama listrik yang terdapat pada panel listrik utama.

3.5.3.5 Prosedur Pengoperasian *Data Logger*

❖ Pengaturan *Data Logger*

Data logger digunakan sebagai media pengkonversi *analog data* yang dibaca oleh *thermocouple* menjadi *digital data*. *Data logger* memungkinkan praktikan untuk melakukan pencatatan temperature secara *real time* sesuai dengan pengaturan. Pada proses percobaan ini *data logger* yang digunakan adalah *data logger Labjack T7-Pro*. Sebelum *data logger Labjack T7-Pro* digunakan perlu dilakukan pengaturan awal agar *data logger* dapat mencatat perubahan temperature secara baik.

❖ Konfigurasi *Data Logger*

Data logger yang digunakan pada pengambilan data ini menggunakan dua buah *software* yakni *Kipling* sebagai konfigurasi jenis data yang akan dicatat dan *LJlogM* sebagai *software* pencatat data sesuai dengan pengaturan. Berikut adalah langkah – langkah pengaturan *Kipling* dan *LJlogM*.

a. Pengaturan *Kipling*

1. Memastikan perangkat *labjack T7-Pro* telah terpasang dengan benar. Hal ini dapat dilihat dari seluruh *thermocouple* telah terpasang ke perangkat dan perangkat telah tersambung dengan computer.
-



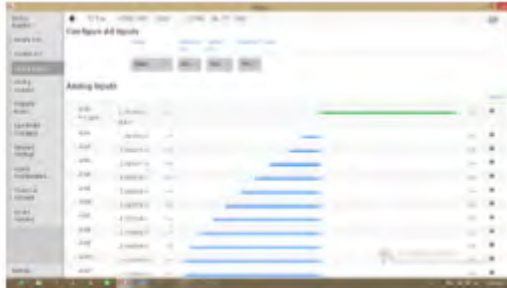
Gambar 3.24 Pemasangan *Thermocouple* ke *Labjack T7-Pro*

2. Mengaktifkan *software Kipling* dan menunggu hingga *software* siap dioperasikan.
3. Memilih koneksi jenis koneksi dari perangkat *Labjack T7-Pro* ke computer. Pada percobaan ini digunakan koneksi menggunakan *USB*.



Gambar 3.25 Tampilan Awal *KIPLING*

4. Mengkonfigurasi dengan terlebih dahulu memilih menu *analog input*.



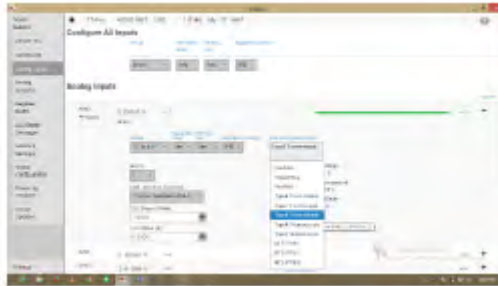
Gambar 3.26 Tampilan Menu *Analog Inputs*

5. Melakukan pengaturan pada setiap *thermocouple*. Pengaturan ini dilakukan pada pilihan menu *AIN* dengan cara menekan tombol “+” di setiap pilihan *AIN*.
6. Mengatur jumlah *AIN* yang disesuaikan dengan jumlah *thermocouple* yang digunakan untuk mengukur temperatur.



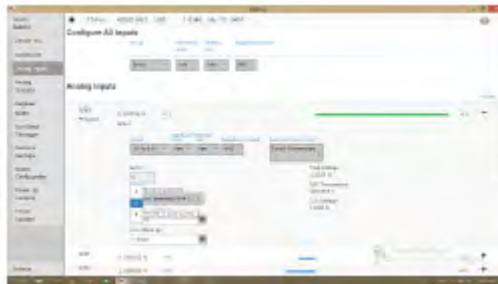
Gambar 3.27 Proses Konfigurasi *AIN*

7. Memilih jenis *thermocouple* yang digunakan. Pada percobaan ini menggunakan *thermocouple tipe K*.



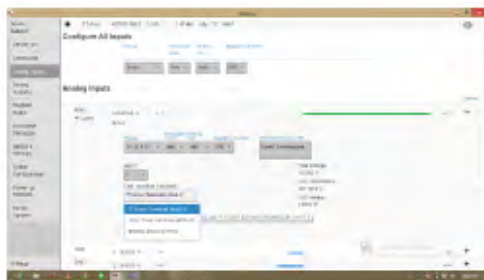
Gambar 3.28 Pemilihan Jenis *Thermocouple*

8. Memilih *metric temperature* drngan pilihan *Celcius*, *Kelvin*, atau *Fahrenheit*.



Gambar 3.29 Pemilihan *Metric Temperatur*

9. Memilih jenis *cold storage locatin* tempat *thermocouple* dipasang. Pada percobaan ini *thermocouple* dipasang pada *junction* tambahan jenis *CB 37 Screw Terminals (AIN 0 – AIN 13)*



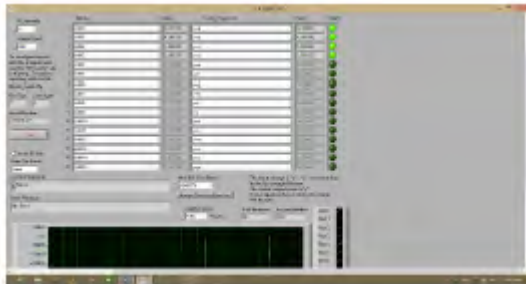
Gambar 3.30 Pemilihan *Cold Junction Location*



10. Mengulang pengaturan pada setiap menu *AIN* sebanyak jumlah *thermocouple* yang digunakan.
11. Memastikan seluruh konfigurasi telah dilakukan dengan benar. Kesalahan konfigurasi nantinya akan berpengaruh pada proses pembacaan temperatur.
12. Menutup aplikasi dan mengaktifkan *software LJLogM*.

b. Konfigurasi LJLogM.

1. Mengaktifkan *software LJLogM*.
2. Memastikan tampilan awal *LJLogM* seperti berikut.

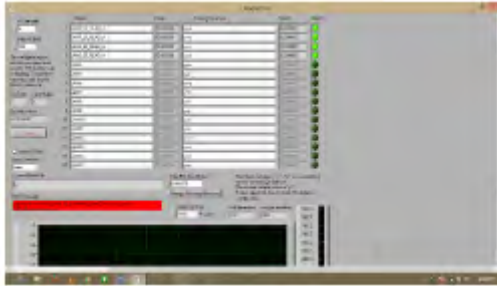


Gambar 3.31 Tampilan Awal *LJLogM*

3. Menentukan banyaknya *channel* yang akan direkam pada kolom *#channel*.
4. Menentukan interval waktu perekam pada kolom interval (*ms*). Perlu diingat bahwa konfigurasi bawaan dan *software* ini menggunakan satuan *mili sekon (ms)*.
5. Mengaktifkan grafik sesuai dengan jumlah channel dengan cara menekan tombol pada kolom *graph*.
6. Memastikan *software* telah melakukan pembacaan dalam bentuk *metric temperature*. Hal ini dilakukan karena konfigurasi bawaan *software* ini adalah pembacaan dalam bentuk *voltase* bukan temperatur. Jika *software* belum melakukan pembacaan dalam bentuk temperatur maka melakukan pengaturan dengan cara memasukkan kode *_EF_READ_A* pada setiap kolom *name*.
7. Memilih direktori tujuan penyimpanan data.



8. Melakukan proses perekaman dengan cara menekan tombol “*write to file*”.
9. Merekam proses temperatur sudah dapat dilakukan.

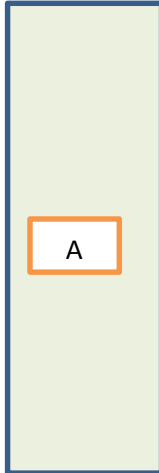


Gambar 3.32 Tampilan Setelah Dilakukan Pengaturan

3.5.3.6 Pengujian *Cold storage* dan Perhitungan Beban Panas

1. Memasukkan *apparatus* berupa *cool box* yang kosong pada bagian dalamnya dan telah terpasang *thermocouple*
2. Memasukkan PCM dalam *cool box* (PCM dari beberapa komposisi garam serta yang telah mendapat penambahan agen nukleasi)
3. Mengatur sensor dalam *cold storage* dengan rentang temperatur $(-12) - (-18)^{\circ}\text{C}$. (Temperatur penyimpanan pada ikan)
4. Memasukkan *cool box* kedalam *cold storage*, mengatur temperatur pada *cold storage* -12°C hingga temperatur -18°C

Beban panas yang terjadi dalam *cold storage* disebabkan panas yang dikeluarkan oleh jenis benda yang didinginkan (kalor produk) dan panas yang berasal dari lingkungan yang masuk melalui dinding – dinding *cold storage*.



Gambar 3.33 Desain *Cool box*

Rumus untuk menghitung beban panas

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_1} + \frac{\Delta x}{k} + \frac{1}{h_2}} \dots \dots \dots (3.1)$$



Dimana :

- Q : laju perpindahan kalor (W)
 T_A : Temperatur fluida A (°C)
 T_B : Temperatur fluida B (°C)
 k : konduktivitas termal benda (W/m°C)
 h : koefisien perpindahan panas konveksi (W/m²°C)
 A : luas penampang (m²)
 Δx : ketebalan dinding (m)

3.6 Rancangan Penelitian

Rancangan pada penelitian ini dapat dilihat pada Tabel 3.7 Sebagai berikut :

Tabel 3.7 Rancangan Penelitian

No.	Larutan (%)	<i>Test Chamber</i>				Performa <i>Cold storage</i>	
		N_T	T_f	S	T_m		
1	Aquades	√	√	√	√	√	
2	PCM	√	√	√	√	√	
3	NaCl	5	√	√	√	√	-
		10	√	√	√	√	-
		15	√	√	√	√	-
		20	√	√	√	√	-
		23.3	-	-	-	-	√
4	KCl	5	√	√	√	√	-
		10	√	√	√	√	-
		15	√	√	√	√	-
		20	√	√	√	√	-
		19.7	-	-	-	-	√
5	NaNO ₃	5	√	√	√	√	-
		10	√	√	√	√	-
		15	√	√	√	√	-



		20	√	√	√	√	-
		3.7	-	-	-	-	√
6	NaCl + 1% Boraks	5	√	√	√	√	-
		10	√	√	√	√	-
		15	√	√	√	√	-
		20	√	√	√	√	-
		23.3	-	-	-	-	√
7	KCl + 1% Boraks	5	√	√	√	√	-
		10	√	√	√	√	-
		15	√	√	√	√	-
		20	√	√	√	√	-
		19.7	-	-	-	-	√
8	NaNO ₃ + 1% Boraks	5	√	√	√	√	-
		10	√	√	√	√	-
		15	√	√	√	√	-
		20	√	√	√	√	-
		3.7	-	-	-	-	√



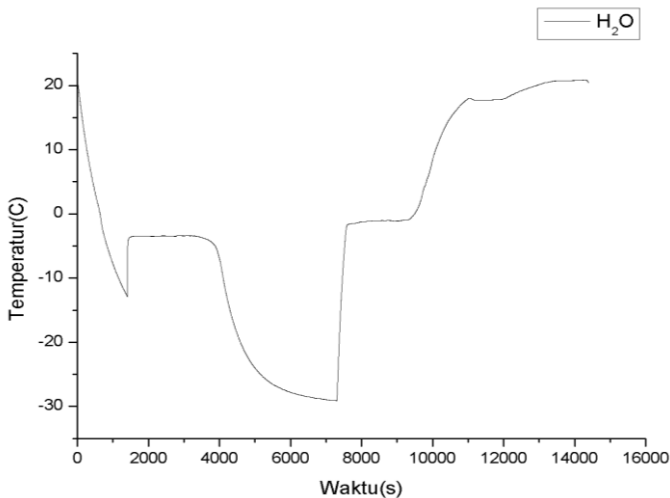
(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB IV ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN

4.1 Analisa Hasil *Chamber Test*

4.1.1 Analisa Hasil *Chamber Test Aquades*

Pengujian *Chamber Test* ini dilakukan pada larutan murni *aquades* bertujuan untuk mengetahui karakteristik sifat *thermal* dari larutan H₂O murni. Hasil proses pembekuan dan pencairan terlihat pada Gambar 4.1 dan data terdapat pada Tabel 4.1



Gambar 4.1 Kurva Pendinginan dan Pencairan Larutan *Aquades*

Tabel 4.1 Data Hasil Pengujian *Chamber Test* untuk Larutan *Aquades*

Jenis	N _T (°C)	T _f (°C)	T _{fl} (°C)	s(°C)	T _m (°C)	T _{ml} (°C)
H ₂ O	-10,7	-5	-28,5	5,7	0	20,6

Gambar 4.1 dan Tabel 4.1 dapat diketahui hasil dari pendinginan dan pencairan *aquades* selama dua jam. Hasil yang didapat yaitu pada proses pendinginan, *aquades* mengalami *supercooling*. Larutan mulai bernukleasi pada sebesar -10,7°C



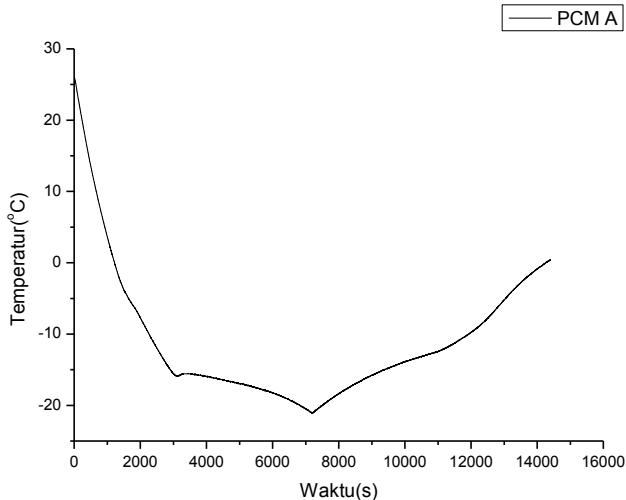
setelah itu terjadi pembentukan inti es dan pembekuan mulai berlangsung pada -5°C dari hasil tersebut didapatkan nilai derajat *supercooling* sebesar $5,7^{\circ}\text{C}$. Pendinginan terus berlangsung selama dua jam menyebabkan temperatur dari larutan terus menurun menjadi $-28,5^{\circ}\text{C}$. Dua jam selanjutnya yaitu proses pencairan larutan, proses pencairan ini berlangsung pada temperatur ruang 25°C , *aquades* yang sudah membeku tersebut mulai mencair pada temperatur 0°C . Hasil pencairan selama dua jam dapat mencapai temperatur sebesar $20,6^{\circ}\text{C}$.

Berdasarkan data yang telah diperoleh, *aquades* belum membeku meskipun melewati temperatur 0°C , sehingga *aquades* mengalami *supercooling*. Hal ini berbeda dengan teori yang mengatakan *aquades* membeku dan mencair pada 0°C , namun pembekuan *aquades* berada pada temperatur dibawah 0°C dapat terjadi karena kondisi temperatur *aquades* sebelum proses pendinginan berada pada temperatur dingin 20°C dan saat didinginkan laju pendinginannya berjalan lambat. Laju pendinginan lambat disebabkan larutan mengalamai efek Mpemba. Brownridge(2002) menyebutkan efek Mpemba merupakan suatu kondisi dimana larutan dengan temperatur lebih panas akan membeku lebih cepat dibandingkan larutan dengan temperatur rendah. Hal ini sesuai dengan kondisi *aquades* yang membeku jauh dibawah 0°C karena *aquades* memiliki temperatur awal yang dingin. Pada gambar 4.1 titik pembekuan diidentifikasi dari kenaikan mendadak temperatur setelah mengalami *supercooling*, *supercooling* $-10,7^{\circ}\text{C}$ terjadi nukleasi dan temperatur mendadak naik ke -5°C diikuti dengan garis datar yang disebut sebagai periode datar, pada titik inilah terjadi pelepasan panas laten oleh larutan untuk membeku fasa, menurut Tan dkk (2014) pada kondisi ini larutan mengandung air dan es. Pada proses pencairan *aquades* mencair pada 0°C sesuai dengan titik pencairan *aquades* tersebut.



4.1.2 Analisa Hasil *Chamber Test* PCM Komersial

Pengujian *Chamber Test* dilakukan untuk mengetahui karakteristik sifat *thermal* dari larutan PCM A (PCM komersial). Hasil proses pembekuan dan pencairan terlihat pada Gambar 4.5 dan data terdapat pada Tabel 4.2



Gambar 4.2 Kurva Pendinginan dan Pencairan PCM A

Tabel 4.2 Data Hasil Pengujian *Chamber Test* untuk PCM A

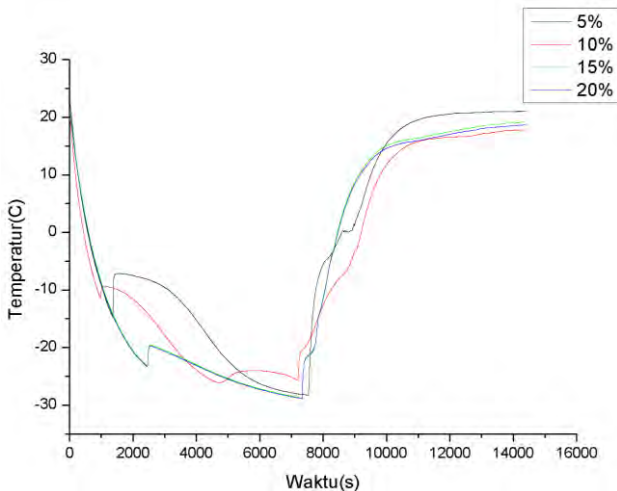
Jenis	N_T (°C)	T_f (°C)	T_{fl} (°C)	s (°C)	T_{ml} (°C)
PCM A	-16	-15,8	-21,16	-	0,44

Hasil pengujian pada gambar 4.2 dan Tabel 4.2 memperlihatkan bahwa pada proses pendinginannya PCM A mulai bernukleasi pada -16°C dan kemudian mengalami perubahan fasa pada $-15,8^{\circ}\text{C}$. Larutan PCM A secara linier mengalami penurunan temperatur selama proses pendinginan. Pada proses pencairan selama dua jam, temperatur yang dicapai pada $0,44^{\circ}\text{C}$. Pada kondisi ini PCM A belum mencair.



4.1.3 Analisa Hasil *Chamber Test* Larutan NaCl/H₂O

Pengujian *Chamber Test* dilakukan untuk mengetahui karakteristik sifat *thermal* dari larutan NaCl/H₂O. Kurva proses pendinginan dan pencairan larutan NaCl/H₂O dengan variasi komposisi 5,10,15,20 %wt NaCl dapat dilihat pada Gambar 4.3 dan data terdapat pada Tabel 4.3



Gambar 4.3 Kurva Pendinginan dan Pencairan Larutan NaCl/H₂O untuk 5,10,15,20%wt NaCl

Tabel 4.3 Data Hasil Pengujian *Chamber Test* untuk NaCl/H₂O

(%) NaCl	T ₀ (°C)	N _T (°C)	T _f (°C)	s(°C)	T _m (°C)
5	-7,572	-9,107	-21,856	1,535	19,774
10	-8,35	-10,351	-21,967	2,001	18,107
15	-19,11	-23,31	-28,9	4,2	18,77
20	-19,11	-23,31	-28,9	4,2	18,77

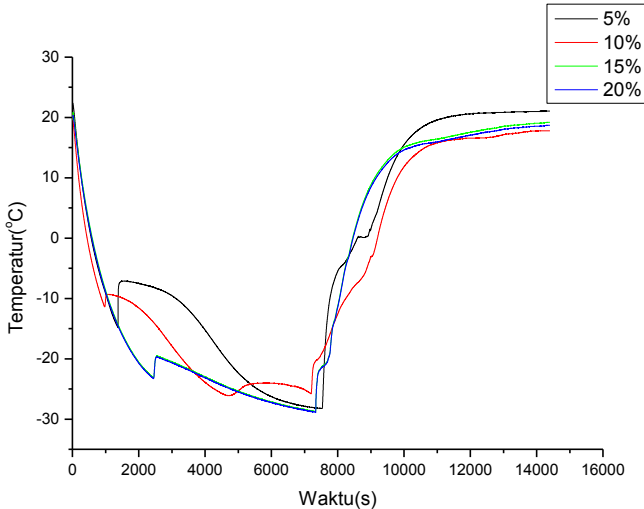
Hasil pengujian pendinginan dan pencairan larutan NaCl/H₂O terdapat pada Gambar 4.3 dan Tabel 4.3. Pada proses pendinginan mempunyai sifat *thermal* sebagai berikut untuk



komposisi 5% larutan mulai bernukleasi pada $-9,107^{\circ}\text{C}$ kemudian terjadi kenaikan temperatur pada $-7,572^{\circ}\text{C}$ pada saat inilah larutan sudah mulai membeku. Larutan ini memiliki derajat *supercooling* sebesar $1,535^{\circ}\text{C}$, setelah pendinginan selama dua jam didapat temperatur beku sebesar $-21,856^{\circ}\text{C}$. Larutan garam pada komposisi 10%wt memiliki nilai *supercooling* dan titik beku lebih rendah dibanding pada komposisi 5%wt yaitu $-8,35$ dan $-10,351^{\circ}\text{C}$ sehingga memiliki derajat *supercooling* yang lebih besar yaitu $2,057^{\circ}\text{C}$, temperatur beku pada dua jam pendinginan mencapai $-21,967^{\circ}\text{C}$. Pada proses pencairan komposisi ini berada pada temperatur yang lebih rendah yaitu $18,107^{\circ}\text{C}$. Pada komposisi 15% dan 20 %wt nilai titik nukleasi yang sama yaitu $-23,31^{\circ}\text{C}$, dan nilai derajat *supercooling* yaitu $4,2^{\circ}\text{C}$, proses pencairan terjadi pada temperatur $18,77^{\circ}\text{C}$.

Gambar 4.3 menjelaskan bahwa semua komposisi pada larutan NaCl/H₂O mengalami *supercooling*, *supercooling* yang terjadi pada larutan ini disebabkan karena pengaruh penambahan garam yang ditambahkan pada air memperlambat laju pendinginan. Menurut Yilmaz(2010) larutan yang ditambahi garam akan mengalami proses kristalisasi dan aglomerasi kemudian menyebabkan masalah pada transisi perubahan fasa. Pada hasil yang didapatkan nilai derajat *supercooling* memiliki nilai fluktuatif sehingga penambahan komposisi yang semakin banyak dari NaCl tidak memberikan pengaruh perubahan linier. Pada nilai titik beku, pemberian komposisi garam yang semakin banyak mampu menurunkan titik beku pada larutan, namun pada komposisi 20%wt sama dengan pada komposisi 15%wt.

Berikut merupakan hasil perbandingan proses pendinginan dan pencairan antara *aquades*, PCM A dengan larutan NaCl/H₂O dapat di lihat pada Gambar 4. 4 dibawah ini:



Gambar 4.4 Perbandingan Proses Pendinginan dan Pencairan antara *Aquades* , PCM A dengan Larutan NaCl/H₂O

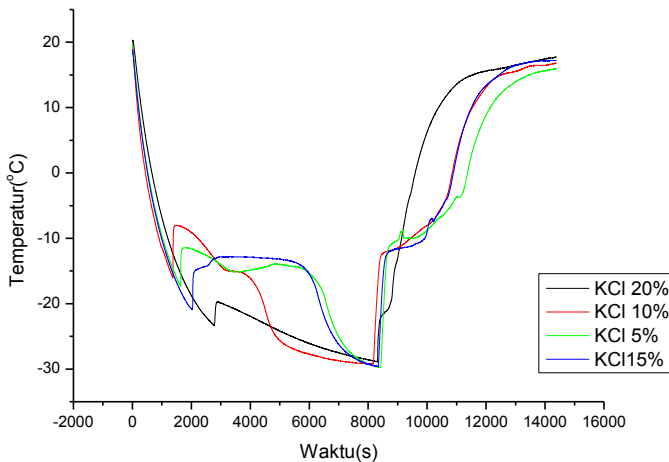
Pada Gambar 4.4 menunjukkan data titik beku bila dikorelasikan dengan *aquades* , *aquades* memiliki titik beku -5° , kemudian larutan dengan penambahan NaCl menunjukkan penurunan nilai titik beku untuk setiap penambahan komposisinya dibawah -5°C . Penurunan titik beku ini disebabkan oleh sifat koligatif dari larutan tersebut, sesuai dengan penelitian Stewart(2009) titik beku air akan membeku dibawah (titik beku air normal) 0°C bila ada dengan ditambahnya bahan-bahan partikel terlarut .

Dari kelima variasi komposisi pembekuan paling cepat terdapat pada komposisi 5%wt dan memiliki nilai derajat *supercooling* terendah. Laju pendinginan dari larutan NaCl/H₂O lebih baik dari PCM , PCM dari larutan NaCl/H₂O membeku lebih cepat.



4.1.4 Analisa Hasil *Chamber Test* Larutan KCl/ H₂O

Pengujian *Chamber Test* dilakukan untuk mengetahui karakteristik sifat *thermal* dari larutan KCl/H₂O . Kurva pendinginan dan pencairan larutan KCl/H₂O dengan variasi komposisi 5,10,15,20 %wt KCl. Hasil proses pembekuan dan pencairan terlihat pada Gambar 4.5 dan data terdapat pada Tabel 4.4.



Gambar 4.5 Kurva Pendinginan dan Pencairan Larutan KCl/H₂O untuk 5,10,15,20%wt KCl

Tabel 4.4 Data Hasil Pengujian *Chamber Test* untuk KCl/H₂O

(%) KCl	T ₁₀ (°C)	N _T (°C)	T _f (°C)	s(°C)	T _m (°C)
5	-7,461	-14,868	-28,859	8,225	21,005
10	-10,45	-10,74	-27,025	0,49	18,718
15	-16,37	-21,3	-28,859	4,13	19,18
20	-19,211	-23,079	-28,859	3,869	18,718

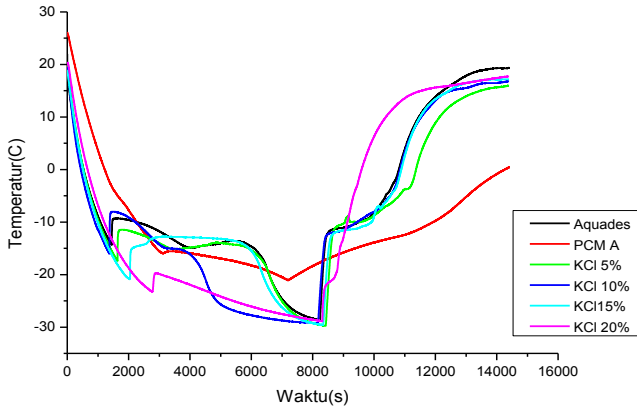


Berdasarkan Gambar 4.5 dan Tabel 4.4 sama seperti hasil pencampuran sebelumnya, semua variasi memiliki *supercooling* komposisi 5%wt temperatur *supercooling* terjadi pada $-14,868^{\circ}\text{C}$, kemudian larutan mulai membeku pada $-7,461^{\circ}\text{C}$, derajat *supercooling* sebesar $8,225^{\circ}\text{C}$, kemudian setelah pendinginan selama dua jam didapat temperatur beku sebesar $-28,859^{\circ}\text{C}$. Larutan dengan komposisi 10%wt memiliki titik nukleasi dan titik beku yang lebih rendah yaitu $-10,74$ dan $-10,45^{\circ}\text{C}$, derajat *supercooling* sebesar $0,49^{\circ}\text{C}$, setelah pendinginan selama dua jam didapat temperatur beku sebesar $-27,025^{\circ}\text{C}$. Pada larutan dengan komposisi 15%wt memiliki titik nukleasi sebesar $-21,3^{\circ}\text{C}$ dan titik beku $-16,37^{\circ}\text{C}$. Pada komposisi 20% wt untuk titik nukleasi pada $-23,079^{\circ}\text{C}$ kemudian titik beku pada $-19,211^{\circ}\text{C}$ lalu setelah dua jam memiliki temperatur beku sebesar $-28,859^{\circ}\text{C}$, larutan derajat *supercooling* sebesar $3,869^{\circ}\text{C}$. Pada proses pencairan yang dilakukan pada temperatur 25°C dan selama dua jam, didapatkan hasil temperatur leleh untuk komposisi 5%wt sebesar $21,005^{\circ}\text{C}$, untuk 10% sebesar $18,718^{\circ}\text{C}$, untuk 15%wt sebesar $19,18^{\circ}\text{C}$ dan untuk komposisi 20%wt sebesar $18,718^{\circ}\text{C}$.

Hasil yang didapatkan menjelaskan bahwa larutan campuran KCl/H₂O juga memiliki *supercooling* seperti larutan NaCl/H₂O, hal ini disebabkan garam KCl yang ditambahkan pada air mempengaruhi proses kristalisasi dan aglomerasi menyebabkan masalah pada perpindahan fasa transisi. Penelitian dari (Yilmaz.2010) yang menyebutkan bahwa larutan kristalisasi dan aglomerasi menyebabkan masalah pada transisi perubahan fasa. Penambahan garam mempengaruhi pembentukan nukleasi pada larutan, namun pada nilai derajat *supercooling* nilainya berfluktuatif. Sifat koligatif juga berpengaruh pada larutan ini, terlihat pada Tabel 4.2 bahwa setiap kenaikan %wt komposisi garam maka titik beku larutan ini mengalami penurunan temperatur, dapat dikatakan bahwa larutan ini mengalami *freezing-point depression*. Hal ini sesuai dengan Stewart(2009) bahwa titik beku air dengan penambahan bahan-bahan akan turun di bawah titik beku air normal 0°C .



Berikut merupakan hasil perbandingan proses pendinginan dan pencairan antara *aquades*, PCM A dengan larutan KCl/H₂O dapat di lihat pada Gambar 4. 6 dibawa ini:



Gambar 4.6 Perbandingan Proses Pendinginan dan Pencairan antara *Aquades* , PCM A dengan Larutan KCl/H₂O

Pada Gambar 4.6 menunjukkan penurunan titik beku antara *aquades* lebih tinggi dibanding dan KCl/H₂O sedangkan untuk PCM A titik bekunya berada menunjukkan penurunan nilai titik beku untuk setiap penambahan komposisinya dibawah -5°C.

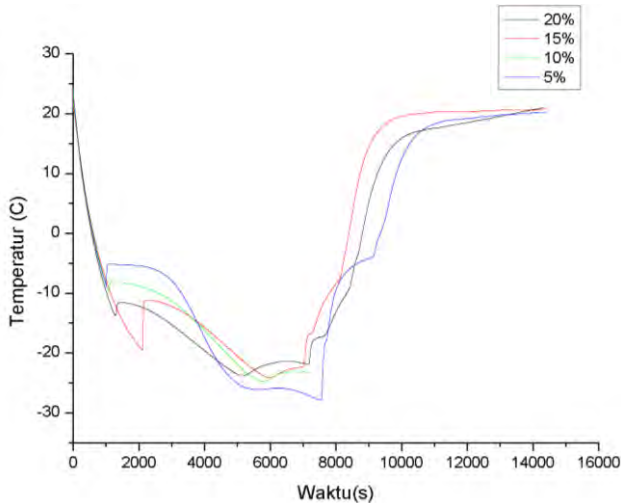
Dari kelima variasi komposisi pembekuan paling cepat terdapat pada komposisi 5%wt karena memiliki nilai derajat *supercooling* terendah. Laju pendinginan dari larutan NaCl/H₂O lebih baik dari PCM , PCM dari larutan NaCl/H₂O membeku lebih cepat, untuk titik beku paling rendah yang dapat dicapai larutan NaCl/H₂O berada pada komposisi 5,15 dan 20%wt NaCl.

4.1.5 Analisa Hasil *Chamber Test* Larutan NaNO₃/H₂O

Pengujian *Chamber Test* dilakukan untuk mengetahui karakteristik sifat *thermal* dari larutan NaNO₃//H₂O. Kurva pendinginan dan pencairan larutan NaNO₃//H₂O dengan variasi



komposisi 5,10,15,20 %wt NaNO_3 . Hasil proses pembekuan dan pencairan terlihat pada Gambar 4.7 dan data terdapat pada Tabel 4.5



Gambar 4.7 Kurva Pendinginan dan Pencairan Larutan $\text{NaNO}_3/\text{H}_2\text{O}$ untuk 5,10,15,20%wt NaNO_3

Tabel 4.5 Hasil Pengujian *Chamber Test* $\text{NaNO}_3/\text{H}_2\text{O}$

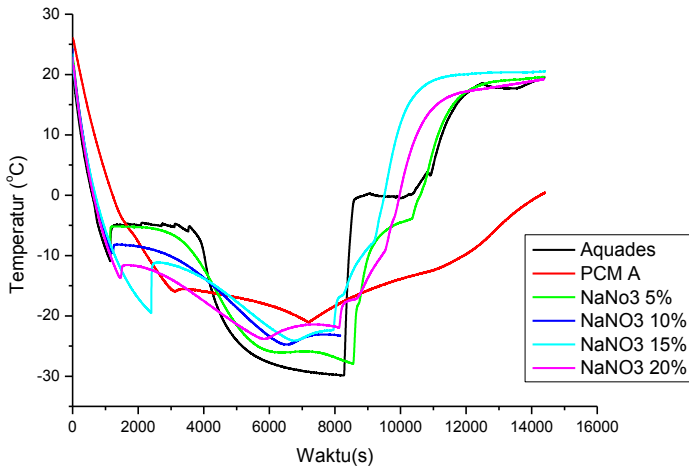
(%) NaNO_3	$T_{i0}(\text{C})$	$N_{T1}(\text{C})$	$T_f(\text{C})$	$s(\text{C})$	$T_m(\text{C})$
5	-7,91	-3,84	-27,999	4,07	20,97
10	-10,87	-9,35	-27,025	1,52	20,97
15	-19,46	-11,57	-28,859	2,11	20,97
20	-13,68	-12,41	-28,859	7,05	20,97

Berdasarkan Tabel 4.5 hasil pengujian proses pendinginan dan pencairan larutan $\text{NaNO}_3/\text{H}_2\text{O}$. Hasil yang didapatkan menjelaskan bahwa larutan campuran $\text{NaNO}_3/\text{H}_2\text{O}$ mengalami *supercooling*, *supercooling* yang terjadi pada larutan ini disebabkan karena proses nukleasi larutan cair menjadi yang berjalan lambat. Hal ini sesuai dengan Michels dan



PitzPaal,2007) bahwa garam nitrat mencair dan mendingin dalam kondisi yang tidak pasti. Pada nilai titik beku larutan dapat menjelaskan bahwa sifat koligatif pada larutan air berperan dalam perubahan temperatur beku dari semua komposisi larutan. Hal ini terlihat dari semakin turunnya temperatur beku ketika komposisi NaNO_3 ditambah. Hal ini sesuai dengan (Stewart, 2009) bahwa Titik beku air dengan penambahan bahan-bahan yang terlarut akan turun di bawah titik beku air normal 0°C . Penurunan titik beku ini juga dinamakan sebagai *freezing-point depression*. Pada gambar 4.7 dapat dilihat bahwa semua komposisi mengalami fasa eutektik.

Berikut merupakan hasil perbandingan proses pendinginan dan pencairan antara *aquades*, PCM A dengan larutan $\text{NaNO}_3/\text{H}_2\text{O}$ dapat di lihat pada Gambar 4. 8 dibawah ini:



Gambar 4.8 Perbandingan Proses Pendinginan dan Pencairan antara *Aquades* , PCM A dengan Larutan $\text{NaNO}_3/\text{H}_2\text{O}$

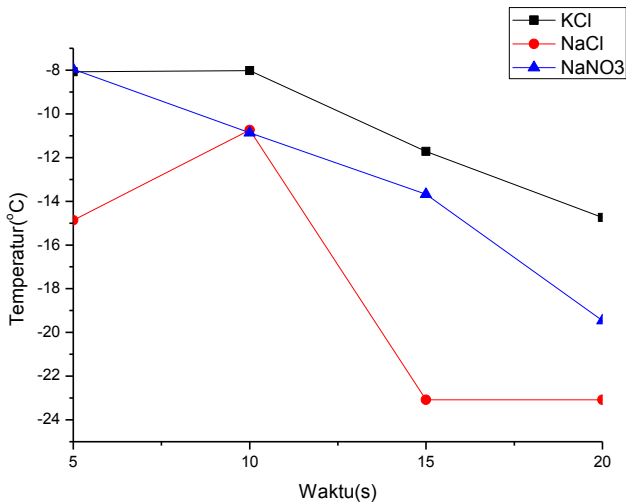
Pada Gambar 4.8 menunjukkan penurunan titik beku *aquades* paling tinggi, sedangkan untuk PCM A titik bekunya



berada lebih rendah. Nilai penurunan titik beku untuk setiap penambahan komposisi NaNO_3 dibawah -5°C . Dari kelima variasi komposisi pembekuan paling cepat terdapat pada komposisi 5%wt karena memiliki nilai derajat *supercooling* terendah. Laju pendinginan dari larutan $\text{NaNO}_3/\text{H}_2\text{O}$ lebih baik dari PCM , PCM dari larutan $\text{NaNO}_3/\text{H}_2\text{O}$ membeku lebih cepat.

4.1.6 Analisa Penurunan Titik Beku dan Derajat *Supercooling* Larutan $\text{NaCl}/\text{H}_2\text{O}$, $\text{KCl}/\text{H}_2\text{O}$ serta $\text{NaNO}_3/\text{H}_2\text{O}$

Berdasarkan hasil analisis data pada KCl, NaCl dan NaNO_3 maka hasil dapat dilihat pada Gambar 4.8 dan 4.9

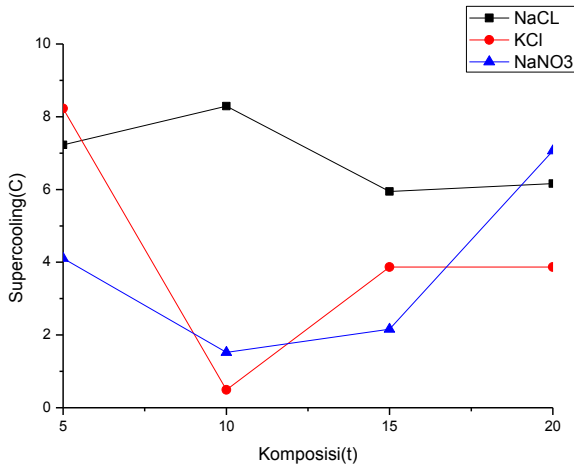


Gambar 4.9 Pengaruh Variasi Komposisi terhadap Penurunan Titik Beku

Gambar 4.9 menunjukkan pengaruh terhadap penurunan titik beku larutan , untuk larutan KCl dan NaCl memiliki tren dengan bertambahnya komposisi garam maka titik beku menuru



hal ini berhubungan dengan sifat koligatif air yang sesuai dengan penjelasan Stewart (2009) bahwa penambahan bahan-bahan akan menyebabkan penurunan titik beku/ *freezing-point depression* di bawah titik beku air normal 0°C.



Gambar 4.10 Pengaruh Variasi Komposisi terhadap derajat *supercooling*

Hasil pengujian pada gambar 4.10 menunjukkan bahwa semua larutan yang diuji mengalami *supercooling* dan mempunyai derajat *supercooling*. Masing-masing larutan temperatur awal yang berbeda pada saat diuji, larutan NaCl, KCl dan NaNO₃ dengan %wt yang berbeda pada saat terlarut dalam air menyebabkan reaksi endotermik, yaitu panas lingkungan yang terserap oleh larutan, hal ini menyebabkan keadaan larutan menjadi lebih dingin. Larutan yang mempunyai temperatur yang lebih dingin akan mengalami pembekuan lebih lambat dari larutan pada temperatur lebih tinggi yang biasanya disebut efek Mpemba. Hal ini dijelaskan oleh (Brownrigde, 2002).

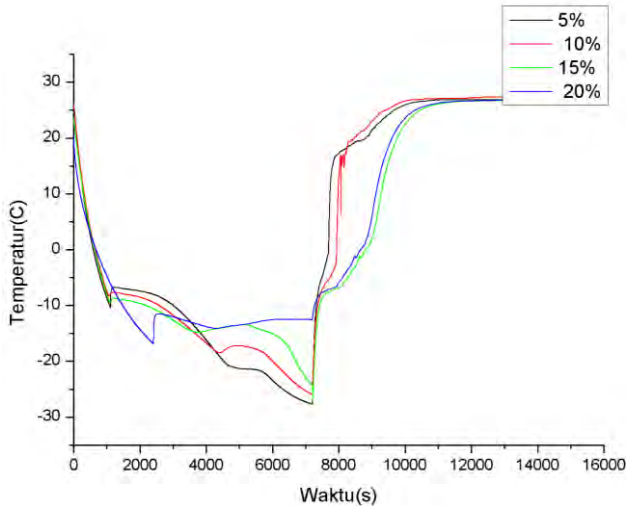
Derajat *supercooling* yang terjadi menunjukkan trend fluktuatif antara 1-7 °C. Hasil pengujian ini berkebalikan dengan



apa yang dijelaskan oleh Tan dkk(2014) bahwa setiap perbedaan temperatur larutan akan memberikan laju pendinginan yang berbeda pula, hal ini yang menyebabkan larutan dengan temperatur awal yang lebih dingin memiliki derajat *supercooling* yang lebih besar. Hasil tersebut menunjukkan bahwa komposisi garam yang ditambahkan tidak memberikan pola pengaruh yang sama terhadap derajat *supercooling*. Menurut Ribeiro dkk (2006) nilai derajat *supercooling* akan meningkat saat terjadi peningkatan laju pertumbuhan dendrit. Pengaruh lainnya juga dijelaskan oleh Wilson (2012) bahwa derajat *supercooling* dapat berbeda tergantung pada volume dan laju pendinginannya

4.1.7 Analisa Hasil *Chamber Test* Larutan NaCl/H₂O dengan Penambahan Agen Nukleasi

Pengujian *Chamber Test* dilakukan untuk mengetahui karakteristik sifat *thermal* dari larutan NaCl/H₂O setelah ditambah 1%wt agen nukleasi pada larutan NaCl/H₂O pada komposisi 5,10,15 dan 20 %wt. Untuk mengetahui pengaruh penambahan agen nukleasi pada masing-masing komposisi, maka diberikan perbandingan sifat *thermal* antara larutan yang belum mendapat penambahan agen nukleasi dengan larutan setelah penambahan agen nukleasi. Berikut merupakan kurva pendinginan setelah penambahan 1%wt *boraks*



Gambar 4.11 Kurva Pendinginan dan Pencairan Larutan NaCl/H₂O untuk 5,10,15,20% wt NaCl + 1% wt Boraks

Tabel 4.6 Hasil Pengujian *Chamber Test* NaCl/H₂O sebelum dan setelah penambahan 1%wt Boraks

(%) NaCl	T ₀ (°C)	N _T (°C)	T _f (°C)	s(°C)	T _m (°C)
5	-7,572	-9,107	-21,856	1,535	19,774
10	-8,35	-10,351	-21,967	2,001	18,107
15	-19,11	-23,31	-28,9	4,2	18,77
20	-19,11	-23,31	-28,9	4,2	18,77
(%) NaCl+1%wt					
5	-7,88	-9,06	-26,5	1,18	27
10	-7,81	-7,88	-24,9	0,07	27
15	-8,63	-8,63	-26,8	0	27
20	-11,5	-16,75	-12	5,25	27

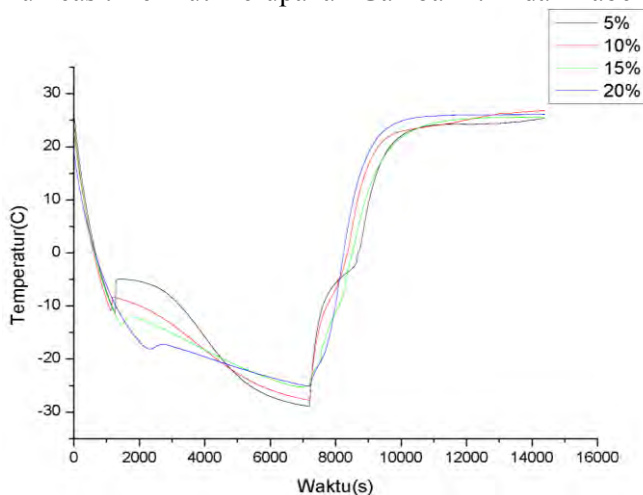
Gambar 4.11 merupakan kurva pendinginan dan pencairan larutan NaCl/H₂O yang sudah mendapat penambahan boraks. Pembacaan kurva tersebut kemudian dibandingkan dengan kurva



yang berada pada Gambar 4.3 Pembacaan tersebut kemudian direpresentasikan Tabel 4.6 diatas. Penambahan agen nukleasi *boraks* pada masing-masing larutan menyebabkan hasil yang berfluktuatif pada titik beku, sedangkan pada nilai titik nukleasi *boraks* menurunkan titik nukleasi pada semua komposisi larutan. Pada nilai derajat *supercooling*, derajat *supercooling* mengalami penurunan. Penurunan derajat *supercooling* menyesuaikan hasil titik pembekuan dan titik nukleasi dari masing-masing larutan.

4.1.8 Analisa Analisa Hasil *Chamber Test* Larutan KCl/H₂O dengan Penambahan Agen Nukleasi

Pengujian *Chamber Test* dilakukan untuk mengetahui karakteristik sifat *thermal* dari larutan KCl/H₂O setelah ditambah 1%wt agen nukleasi pada larutan KCl/H₂O pada komposisi 5,10,15 dan 20 %wt. Untuk mengetahui pengaruh penambahan agen nukleasi pada masing-masing komposisi, maka diberikan perbandingan sifat *thermal* antara larutan yang belum mendapat penambahan agen nukleasi dengan larutan setelah penambahan agen nukleasi. Berikut merupakan Gambar 4.12 dan Tabel 4.7



Gambar 4.12 Kurva Pendinginan dan Pencairan Larutan KCl/H₂O untuk 5,10,15,20% wt KCl + 1% wt Boraks



Tabel 4.7 Hasil Pengujian *Chamber Test* KCl/H₂O sebelum dan setelah penambahan 1%wt *Boraks*

(%) KCl	T _{f0} (°C)	N _T (°C)	T _f (°C)	s(°C)	T _m (°C)
5	-7,461	-14,868	-28,85	8,225	21,005
10	-10,45	-10,74	-27,02	0,49	18,718
15	-16,3	-21,3	-28,85	4,13	19,18
20	-19,211	-23,079	-28,85	3,869	18,718
<hr/>					
(%) KCl+1%wt <i>Boraks</i>					
5	-9,38	-7,81	-27,8	0,5	22,1
10	-10,75	-8,88	-24,9	0,06	22,1
15	-13,31	-13,3	-25,1	1,87	22,1
20	-18,06	-18,56	-25,1	1,57	26,12

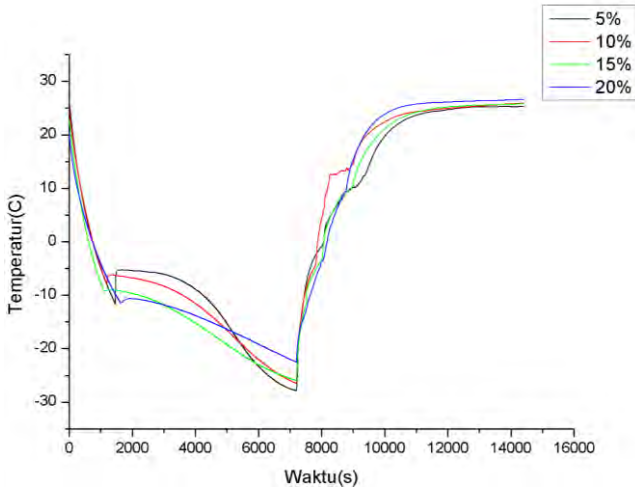
Gambar 4.12 merupakan kurva pendinginan dan pencairan larutan KCl/H₂O yang sudah mendapat penambahan *boraks*. Pembacaan kurva tersebut kemudian dibandingkan dengan kurva yang berada pada Gambar 4.5 hasil representasi kemudian tercantum pada tabel 4.7 diatas. Penambahan agen nukleasi *boraks* pada masing-masing larutan menyebabkan hasil yang berfluktuatif pada titik beku, sedangkan pada nilai titik nukleasi *boraks* meningkatkan titik nukleasi pada semua komposisi larutan .

4.1.9 Analisa Hasil *Chamber Test* Larutan NaNO₃/H₂O dengan Penambahan Agen Nukleasi

Pengujian *Chamber Test* dilakukan untuk mengetahui karakteristik sifat *thermal* dari larutan NaNO₃/H₂O setelah ditambah 1%wt agen nukleasi pada larutan NaNO₃/H₂O pada komposisi 5,10,15 dan 20 %wt. Untuk mengetahui pengaruh penambahan agen nukleasi pada masing-masing komposisi , maka diberikan perbandingan sifat thermal antara larutan yang



belum mendapat penambahan agen nukleasi dengan larutan setelah penambahan agen nukleasi. Berikut merupakan kurva pendinginan dan pencairan $\text{NaNO}_3/\text{H}_2\text{O}$ dengan penambahan boraks pada gambar 4.13



Gambar 4.13 Kurva Pendinginan dan Pencairan Larutan $\text{NaNO}_3/\text{H}_2\text{O}$ untuk 5,10,15,20% wt+ 1% wt Boraks

Tabel 4.8 Hasil Pengujian *Chamber Test* $\text{NaNO}_3/\text{H}_2\text{O}$ sebelum dan setelah penambahan 1%wt Boraks

(%) NaNO_3	T_{f0} (°C)	N_T (°C)	T_f (°C)	s(°C)	T_m (°C)
5	-7,91	-3,84	-27,99	4,07	20,97
10	-10,87	-9,35	-27,02	1,52	20,97
15	-19,46	-11,57	-28,85	2,11	20,97
20	-13,68	-12,41	-28,89	7,05	20,97
(%) NaNO_3 + 1%wt Boraks					
5	-10,6	-11,44	-25,1	0,75	26,56
10	-8,94	-8,94	-25,1	0	26,56
15	-7,63	-7,88	-24,9	0,25	26,56
20	-6,69	-10,07	-27,8	4,06	26,56

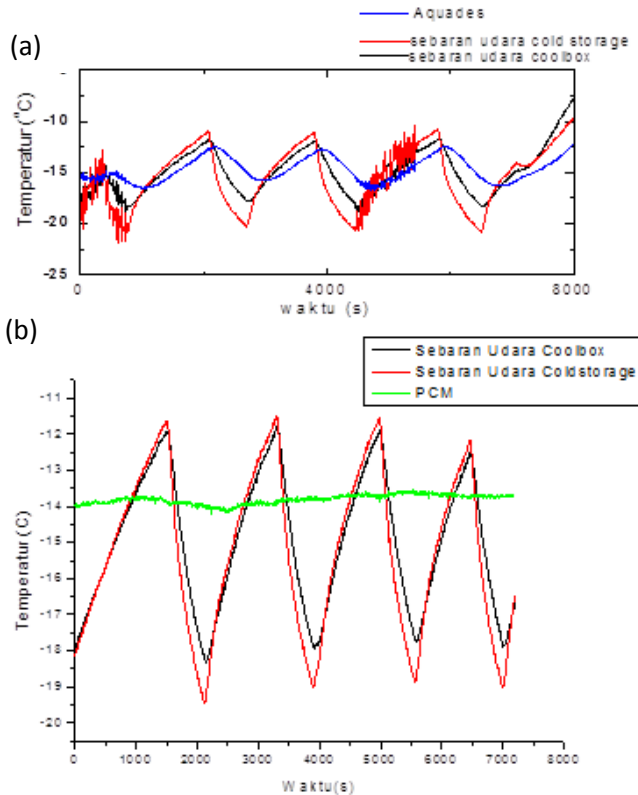


Gambar 4.13 merupakan kurva pendinginan dan pencairan larutan $\text{NaNO}_3/\text{H}_2\text{O}$ yang sudah mendapat penambahan *boraks*. Pembacaan kurva tersebut kemudian dibandingkan dengan kurva yang berada pada Gambar 4.7 hasil representasi kemudian tercantum pada Tabel 4.8 diatas.

Penambahan agen nukleasi *boraks* pada masing-masing larutan menyebabkan hasil yang berfluktuatif pada titik beku, sedangkan pada nilai titik nukleasi *boraks* meningkatkan titik nukleasi pada semua komposisi larutan. Penambahan agen nukleasi pada $\text{NaCl}/\text{H}_2\text{O}$, $\text{KCl}/\text{H}_2\text{O}$ dan $\text{NaNO}_3/\text{H}_2\text{O}$ pada masing-masing komposisi menyebabkan perubahan derajat *supercooling*. Sesuai dengan penelitian Ozgur(2006) penambahan agen nukleasi khususnya *boraks* dengan komposisi 1 – 2 wt% pada garam jenis glauber dapat memberikan pencegahan terhadap *supercooling*.

4.2 Analisa Pengujian Performa menggunakan *Scale cold storage laboratory*

Berikut merupakan analisa Beberapa larutan yang bertujuan untuk mengetahui kinerja larutan tersebut menyimpan produk beku. Pada pengujian ini terdapat perpindahan panas secara konveksi , yaitu *Coolbox* mendapat aliran panas dari udara dari lingkungan luar. Laju perpindahan panas melalui dinding sebesar 549, 65 Joule/jam. Berikut merupakan Gambar dari pengujian *Scale Cold Storage Laboratory* yang dilakukan pada *Aquades*, PCM A(komersial), (23,3%wt) $\text{NaCl}/\text{H}_2\text{O}$, (19,7%wt) $\text{KCl}/\text{H}_2\text{O}$,(37%wt) $\text{NaNO}_3/\text{H}_2\text{O}$ sebelum dan setelah penambahan *Boraks* 1%wt.



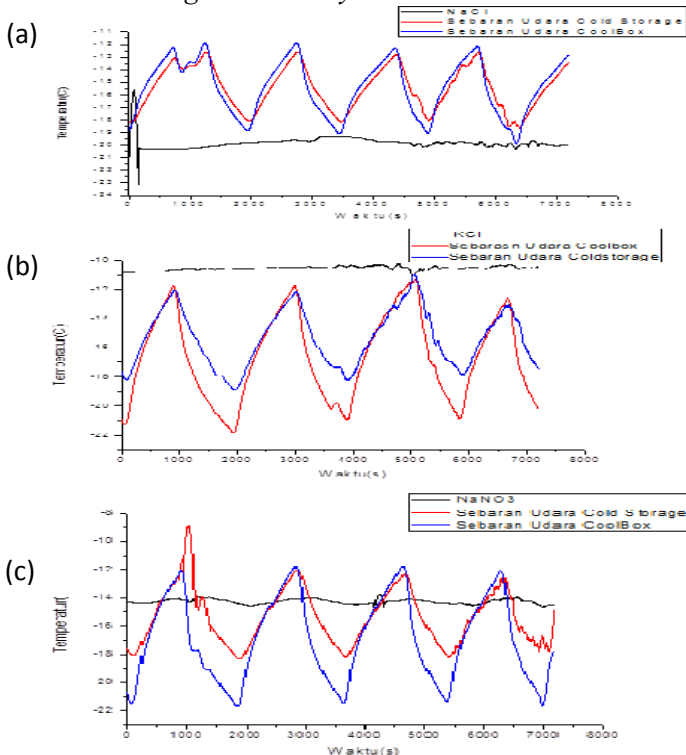
Gambar 4.14 Hasil Tes Kinerja Bahan pada *Scale cold storage laboratory* (a) *Aquades* (b) *PCM A*

Pada Gambar 4.14 hasil pengujian kinerja untuk *aquades*, bahan *aquades* mengikuti mati dan turunnya *kompresor*, hal ini dapat dilihat ketika sebaran udara dalam *coolbox* dan *coldstorage* turun, temperatur *aquades* juga naik dan turun. Pada *PCM A* *PCM* hampir secara konstan tetap berada pada temperatur beku nya, dapat dilihat dari gambar bahwa pada saat *kompresor* mati garis *PCM* berada pada keadaan datar, keadaan datar inilah yang merupakan titik *PCM* untuk menyerap panas laten.



Menurut grafik PCM A mempunyai kinerja yang baik terlihat pada periode datar saat sebaran udara turun, pada saat ini terjadi perubahan fasa untuk menjaga temperatur tetap, hal ini sesuai dengan Mehling dkk(2008) material akan menyimpan energi panas ketika berubah fasa dari padat ke cair, Kemudian material ini akan melepaskan energi panas ketika fasa berubah sebaliknya.

Berikut merupakan Gambar 4.15 Hasil pengujian untuk kinerja pada larutan NaCl/H₂O, KCl/H₂O dan NaNO₃/H₂O sebelum penambahan agen nukleasi. Pengujian dilakukan pada *Scale Cold Storage Laboratory*



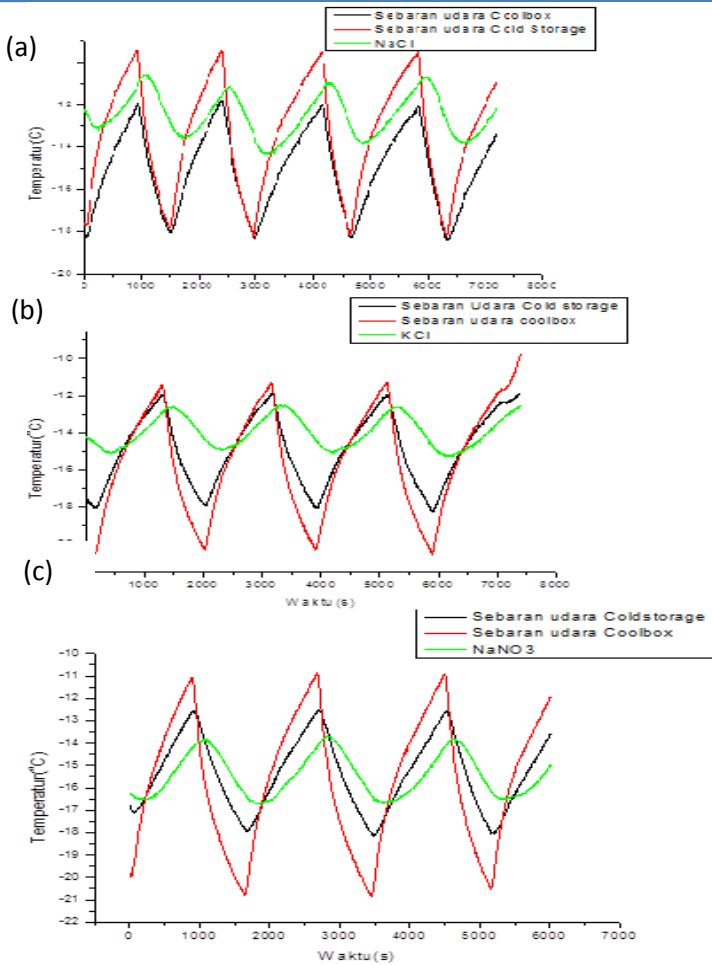
Gambar 4.15 Hasil Pengujian *Scale cold storage laboratory* pada (a)NaCl/H₂O (b)KCl/H₂O dan(c)NaNO₃/H₂O



Dari ketiga grafik diatas dapat ketahu bahwa kecenderungan sifat dari Larutan adalah sama, yakni kesetimbangan dalam mempertahankan temperatur larutan stabil. Pada gambar NaCl/H₂O dapat dilihat temperatur pada posisi stabil namun berada dibawah temperatur pengaplikasian. Hal ini dikarenakan NaCl/H₂O memiliki titik beku dibawah temperatur sistem. Penggunaan PCM dari NaCl/H₂O tidak dipengaruhi sebaran udara NaCl/H₂O sehingga NaCl/H₂O merupakan bahan yang baik . Larutan KCl/H₂O dimana temperaturnya berada diatas temperatur sistem dan menunjukkan temperatur stabil, penggunaan larutan ini kurang efektif karena tidak terpengaruh dengan kenaikan temperatur sistem. Gambar (c) menunjukkan bahwa temperatur NaNO₃/H₂O stabil pada peningkatan dan penurunan temperatur sistem, hal ini dikarenakan kemampuan menyerap panas yang terkandung dalam larutan tersebut besar. Sehingga ketika terjadi peningkatan dan penurunan temperatur sistem, temperatur NaNO₃ stabil.

Menurut Pielichowska dan Pielichowski(2014) prinsip penyimpanan panas sensibel dari energi termal dengan perubahan temperatur dalam keadaan padat atau cair. Perubahan material berbasis perubahan panas dan temperatur, penyimpanan material mengabsorbsi panas dengan mekanika perpindahan panas konvensional dari radiasi,konduksi dan konveksi. Hal ini sesuai dengan hasil pengujian performa dari ketiga larutan yang menunjukkan adanya pengaruh konveksi dari kalor yang dihasilkan beban panas dari lingkungan.

Berikut merupakan Gambar 4.16 Hasil pengujian untuk kinerja pada larutan NaCl/H₂O, KCl/H₂O dan NaNO₃/H₂O setelah penambahan agen nukleasi. Pengujian dilakukan pada *Scale Cold Storage Laboratory*.



Gambar 4.16 Hasil Pengujian *Scale cold storage laboratory* pada (a)NaCl/H₂O ,(b)KCl/H₂O dan(c) NaNO₃/H₂O dengan Penambahan Agen nukleasi

Dari ketiga grafik diatas dapat diketahui bahwa sifat ketiga larutan memiliki kecenderungan yang sama, yakni ketika terjadi



peningkatan temperatur sistem, temperatur ketiga larutan ikut meningkatkan. Dan ketika terjadi penurunan temperatur sistem, temperatur larutan ikut menurun. Penggunaan larutan ini kurang efektif karena peningkatan dan penurunan temperatur larutan mengikuti peningkatan dan penurunan temperatur sistem. Hal ini menunjukkan bahwa larutan tidak bekerja sesuai dengan cara kerja larutan. Perubahan sifat thermal dari penambahan agen nukleasi merupakan penyebab dari menurunnya performa pada larutan. Menurut Farid dkk(2003) penambahan agen nukleasi *boraks* dapat mengurangi konduktivitas thermal dari larutan menjadi rendah sehingga dengan kemampuan penyerapan yang rendah larutan tidak dapat mempertahankan kondisi saat mendapat pengaruh dari mati dan hidupnya *kompresor*.

4.3 Komparasi Larutan NaCl/H₂O, KCl/H₂O dan NaNO₃/H₂O dengan Karakteristik PCM yang baik

Material PCM yang digunakan sebagai Cold Storage harus memenuhi beberapa aspek, berikut merupakan aspek berdasarkan karakteristik yang harus dimiliki bahan yang digunakan sebagai PCM. *Scoring* dilakukan untuk menentukan material yang baik digunakan sebagai PCM

Tabel 4.9 Komparasi Larutan NaCl/H₂O, KCl/H₂O dan NaNO₃/H₂O dengan Karakteristik PCM

Karakteristik	NaCl	KCl	NaNO ₃
Sifat Thermal	***	*	**
Sifat Kinetik	*	***	**
Sifat Fisik	*	***	**
Sifat Kimia	***	*	**
Sifat Ekonomis	***	**	*
Total	11	10	9



Pada Tabel 4.9 bahan garam yang memiliki karakteristik yang paling baik untuk digunakan sebagai PCM adalah NaCl. NaCl memiliki temperatur melting yang paling rendah kemudian merupakan bahan dengan harga termurah. Melihat dari sifat kinetik yang dilakukan hasil dari ketiga bahan menunjukkan bahwa larutan bernukleasi pada rentang yang hampir sama. Kestabilan dari NaCl lebih seimbang dibandingkan bahan lain. Sifat karakteristik dari garam-garam tersebut disebutkan dalam penelitian Oro dkk(2012) dan pada Yatsenko dkk(2002) yang dikomparasikan dengan karakteristik PCM yang baik sesuai yang disebutkan Gao dan Tianlong(2013).



(Halaman in sengaja dikosongkan)

Lampiran

1.Lampiran Perhitungan Beban Panas untuk Produk

Pada penelitian ini bahan yang akan di uji adalah daging, adapun besarnya kapasitas kalor spesifik (C) dari daging Perhitungan Beban Panas yang dihasilkan Dinding *Cool box*. Dengan ketentuan sebagai berikut :

Bahan : styerofoam

$k_{\text{styerofoam}}$: 0.02579536 Kkal/jam $m^{2\circ C}$

h : 0.024 Kkal/jam $m^{2\circ C}$

T_1 : $30^{\circ C}$

T_2 : $0^{\circ C}$

Δx : 0.03 m

Δt : 1jam ~3600 second

(waktu yang dibutuhkan kalor dari lingkungan masuk ke sistem)

Dimensi *cool box* :

No.	Dinding	Lebar(m)	Panjang(m)	Luas(m^2)
1	Dinding 1	0,3	0,25	0,075
2	Dinding 2	0,3	0,25	0,075
3	Dinding 3	0,2	0,3	0,06
4	Dinding 4	0,2	0,3	0,06
5	Alas	0,2	0,25	0,05
6	Atap/ Tutup	0,2	0,25	0,05

Perhitungan :

1. Dinding 1 dan 2

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_1} + \frac{\Delta x}{k} + \frac{1}{h_2}}$$

$$U = \frac{1}{\frac{1}{0.024} + \frac{0.03}{k \cdot 0.02578536} + \frac{1}{0.024}}$$

$$= 0.01183 \text{ Kkal/jam m}^{2\circ\text{C}}$$

$$q = U A \Delta T_{\text{menyeluruh}}$$

$$= 0,01183 \times 0,075 \times 30$$

$$= 0,0266 \text{ kkal/jam}$$

$$= 111,41 \text{ Joule/jam}$$

Sehingga dinding 1 dan 2 menghasilkan laju perpindahan panas sebesar $= 2 \times 111,41 \text{ Joule/jam}$

$$= 222,82 \text{ Joule/jam}$$

2. Dinding 3 dan 4

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_1} + \frac{\Delta x}{k} + \frac{1}{h_2}}$$

$$U = \frac{1}{\frac{1}{0.024} + \frac{0.03}{0.02578536} + \frac{1}{0.024}}$$

$$= 0.01183 \text{ Kkal/jam m}^{2\circ\text{C}}$$

$$q = U A \Delta T_{\text{menyeluruh}}$$

$$= 0,01183 \times 0,06 \times 30$$

$$= 0,0213 \text{ kkal/jam}$$

$$= 89,13 \text{ Joule/jam}$$

Sehingga dinding 3 dan 4 menghasilkan laju perpindahan panas sebesar = 2 x 89,13 Joule/jam

$$= 178,26 \text{ Joule/jam}$$

3. Dinding alas dan tutup

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_1} + \frac{\Delta x}{k} + \frac{1}{h_2}}$$

$$U = \frac{1}{\frac{1}{0.024} + \frac{0.03}{k0.02578536} + \frac{1}{0.024}}$$

$$= 0.01183 \text{ Kkal/jam m}^2\text{ }^\circ\text{C}$$

$$q = U A \Delta T_{\text{menyeluruh}}$$

$$= 0,01183 \times 0,05 \times 30$$

$$= 0,0178 \text{ kkal/jam}$$

$$= 74,275 \text{ Joule/jam}$$

Sehingga dinding alas dan tutup menghasilkan laju perpindahan panas sebesar = 2 x 74,275 Joule/jam

$$= 148,55 \text{ Joule/jam}$$

Sehingga jumlah laju perpindahan panas yang melalui dinding sebesar

$$q_{\text{total}} = 222,84 \text{ J/jam} + 178,26 \text{ J/jam} + 148,55 \text{ J/jam}$$

$$= 549,65 \text{ Joule/jam}$$

2. Lampiran Pengujian Performa Pada saat Kompresor On dan Off Selama 120 menit

on/off	PCM A	Aquades	NaCl	KCl	NaNO ₃	NaCl+Agen Nukleasi	KCl + Agen Nukleasi	NaNO ₃ + Agen Nukleasi
off	22	22	16	16	18	15	19	19
on	10	11	19	19	15	9	12	12
off	20	18	21	20	21	15	19	19
on	10	11	19	26	15	9	13	13
off	18	22	23	10	21	15	20	20
on	10	12	15	15	13	14	13	13
off	15	21	26	19		19	24	24
on	8	21				9		
off						15		

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut :

1. Penambahan % komposisi garam NaCl, KCl dan NaNO₃ menyebabkan derajat *supercooling* naik turun, dengan rentang 1-7,7 ° C..
2. Penambahan agen nukleasi merubah titik nukleasi semakin rendah dan meningkatkan titik beku larutan, nilai derajat *supercooling* lebih rendah dibanding derajat *supercooling* sebelum pemberian agen nukleasi, namun pada larutan NaCl 20%wt nilai derajat *supercooling* semakin tinggi yaitu 1,05 ° C. Pengurangan derajat *supercooling* paling besar terdapat pada larutan KCl sebesar 7,7 ° C.
3. Kinerja larutan NaNO₃/H₂O sebelum penambahan agen nukleasi memberikan pola yang sesuai untuk penyimpanan produk, sedangkan larutan NaCl dan KCl serta larutan setelah diberi penambahan agen nukleasi tidak dapat mempertahankan temperatur saat sebaran udara *coolbox* dan *cold storage* naik turun.

5.2 Saran

Adapun saran dari penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Perlu adanya pengujian yang terstandarisasi seperti *Eviromental Test Chamber* , pengujian *Cold Storage* dengan insulasi yang baik
2. Perlu dilakukannya pengujian nilai karakteristik sifat termofisika dan termokimia pada material PCM seperti pengujian DSC untuk temperatur minus.
3. Perlu penelitian secara langsung pada produk untuk mengetahui kinerja dari larutan PCM yang optimal



4. Perlu dilakukannya perhitungan yang lebih spesifik pada material PCM yang dibuat dan pada *Cold Storage*
-

DAFTAR PUSTAKA

- Baht, Vasishta D, Kuldip Gohil, dan Arunabh Mishr. 2010. "Thermal Energy Storage Capacity of some Phase changing Materials and Ionic Liquids" **Journal of ChemTech Research. Vol.2, No.3, pp 1771-1779**
- Berera, Geetha P. 2006. "THERMAL ENERGY STORAGE SYSTEMS –STEARIC / LAURIC ACID MIXTURES AS PHASE CHANGE MATERIALS. **MATERIALS LABORATORY MODULE - 1**
- Brownridge. 2002. "A Search for the Mpemba Effect: When Hot Water Freezes Faster Than Cooled Water. New York. Department of Physics University of New York.
- Chen, Sih Li., Wang, Pong-Ping., dan Lee, Tzong-Shing. 1999. *An Experimental Investigation of Nucleation Probability of Supercooled Water Inside Cylindrical Capsules*. **Experimental Thermal and Fluid Science** 18 (1999)299-306.
- Farid, M Mohammed M. Farid , Amar M. Khudhair , Siddique Ali K. Razack dan Said Al-Hallaj. 2003. "A review on phase change energy storage: materials and applications". **Energy Conversion and Management** 45 (2004) 1597–1615
- Gao, Daolin and Tianlong Deng .2013. "Energy Storage: Preparations And Physicochemical Properties Of Solidliquid Phase Change Materials For Thermal Energy Storage". **Materials and Processes for Energy: Communicating Current Research and Technological Developments**.
- Gholaminejad, Amir dan Reza Hosseini. 2013. "A Study of Water Supercooling". *Journal of Electronics Cooling and Thermal Control* 2013, 3, 1-6
- Holman, J.P. 1997. **Perpindahan Kalor**. Jakarta: Erlangga
- Li, Gang, Yunho Hwang, Reinhard Radermacher, dan Ho-Hwan Chun .2013. "Review Of Cold Storage Materials For Subzero Applications". **Journal of Energy** 51 (2013) 1-17



- Liu, Ming, Bruno, Frank, dan Saman, Wasim. 2006. *Development of a Low-cost Phase Change Material for Refrigerated Vehicles*. Australis ANZSES 2006.
- Lu, Wan 2013. "Characterization and Experimental Investigation of Phase Change Materials for Chilled Food Refrigerated Cabinet Applications". **Journal of Applied Energy** 112 (2013) 1376-1382.
- Mehling, Harald dan Luisa F. Cabeza. 2008. **Heat And Cold Storage With PCM: An Up To Date Introduction Into Basics And Applications**. Berlin : Springer.
- Michels, Horst dan Robert Pitz-Paal. 2007. " Cascaded latent heat storage for parabolic trough solar power plants". **Solar Energy Volume 81**, Issue 6, Pages 829–837
- Mortimer, Robert G. 2008. *Physical Chemistry Third Edition*. Canada: Elsevier Academic Press.
- Oro, E, A. De Gracia, A. Castell, M.M Farid, LF dan Cabeza. 2012. "Review on phase change materials (PCMs) for cold thermal energy storage applications". **Applied Energy** 99(2012) 513-553
- Ozgur. 2006. "Stabilization of Glauber's salt for latent heat Storage". Dalam **Proceedings of the 10th International Conference on Thermal Energy Storage—Ecstock 2006**
- Patnaik, Pradyot. 2002. *Handbook of Inorganic Chemical*. Amerika: The McGraw-Hill Companies.
- Pielichowska, Kinga dan Krzysztof Pielichowski. "Phase change materials for thermal energy storage". **Progress in Materials Science** 65 (2014) 67–123.
- Randall D.G. dan J. Nathoo, A.E. Lewis. 2010. " A case study for treating a reverse osmosis brine using Eutectic Freeze Crystallization—Approaching a zero waste process. **Desalination** 266 (2011) 256–262
- Ribeiro dkk. 2006. *Thermal and Dynamic Study of Water Crystallization at The Supercooling Breakdown*. **Journal of Electron Devices**, Vol 4 2006 pp 97-100.
-



- Sharma,Atul, V.V. Tyagi, C.R. Chen, dan D. Buddhi. 2007.”
Review on Thermal Energy Storage With Phase Change
Materials and Applications”. **Renewable and Sustainable
Energy Reviews** 13 (2009) 318-345
- Sinha,Piyus dan Neelam Sinha.2013. “Passive latent heat
thermal energy storage systems: PCMs-A review”. Garhwal
University,Pauri campus. VOL.II
- Stewart, K.M. 2009. **Physical Properties of Water**. Amerika
Serikat : Elsevier, Inc.
- Tan, Kah-Cye., dan Ho, Wenxian . 2014. **A Study of the
Occurance of Supercooling of Water**. Cornell University
Library.
- Telkes,Maria.1953.”Improvenments in or relating to a device and
a composition of matter for the storage of heat”.
- Wilson, Peter. 2012. **Supercooling**. Croatia: In Tech.
- Yatsenko, O.B dan Chudotvortsev, I.G. 2002. *Ice Melting and
Crystallization in Binary Water-Salt Systems*.
InorganicMaterials, Vol. 38 No. 9, 2002 pp 907-913.
- Yilmaz S,Sheth F, Martoterell I, paksoy HO, dan Cabeza LF.2010
“Salt-water solution as PCM for cooling applications.”
**Proceeding of EuroSun 2010, International conference
on solar heating,cooling and building 2010**
-



(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BIODATA PENULIS



Penulis lahir di Kota Lumajang pada tanggal 12 November 1993. Penulis merupakan anak ketiga dari tiga bersaudara pasangan Mu'ashol dan Hanawati. Penulis telah menempuh pendidikan formal yaitu di SDN Wonokerto 2-Tekung, SMP Negeri 1-Tekung, dan SMA Negeri 2 Lumajang . Setelah lulus SMA pada tahun 2012 penulis diterima di Jurusan Teknik Material dan Metalurgi Institut Teknologi Sepuluh

Nopember Surabaya.

Semasa kuliah penulis aktif mengikuti kegiatan organisasi. Penulis pernah menjabat sebagai Staff Departemen Kaderisasi LDJ Ash-Haabul Kahfi Teknik Material dan Metalurgi FTI-ITS tahun kepengurusan 2013/2014, Staff Departemen Keprofesian dan Kesejahteraan Mahasiswa HMMT FTI- ITS tahun kepengurusan 2013/2014 serta sebagai Kopidept Departemen Mentoring LDJ Ash-Haabul Kahfi Teknik Material dan Metalurgi FTI-ITS tahun kepengurusan 2014/2015. Selain itu, penulis sempat aktif sebagai asisten Laboratorium Fisika Material.

Tugas akhir yang diambil penulis dalam bidang Material Inovatif berjudul “Pengaruh Komposisi Garam dan Penambahan Agen Nukleasi Terhadap Derajat *Supercooling* serta Kinerja Larutan Eutektik Garam/H₂O untuk *Cold Storage* Berbasis *Phase Change Material*(PCM)”

Email: rosenamardliah@gmail.com