

PENGARUH KOMPOSISI DAN SIFAT GARAM NaNO_2 , NaNO_3 , DAN KNO_3 MELIPUTI TITIK LELEH, TRANSISI GELAS, KAPASITAS PANAS SPESIFIK UNTUK APLIKASI PENDINGIN PADA REAKTOR NUKLIR

(Skripsi)

Oleh

Nikmah Turohmah
2117041024



**JURUSAN FISIKA
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2025**

ABSTRAK

PENGARUH KOMPOSISI DAN SIFAT GARAM NaNO_2 , NaNO_3 , DAN KNO_3 MELIPUTI TITIK LELEH, TRANSISI GELAS, KAPASITAS PANAS SPESIFIK UNTUK APLIKASI PENDINGIN PADA REAKTOR NUKLIR

Oleh

Nikmah Turohmah

MSR (*Molten Salt Reactor*) merupakan suatu reaktor yang menggunakan garam fluoride sebagai pendinginnya. Garam cair merupakan suatu fluida yang memiliki transfer panas yang baik karena mempunyai kapasitas panas yang tinggi dan stabilitas kimia yang baik. Pada penelitian ini terdapat 4 sampel yang digunakan, sampel 1 (NaNO_2 35%, NaNO_3 10%, KNO_3 55%), sampel 2 (NaNO_2 30%, NaNO_3 15%, KNO_3 55%), sampel 3 (NaNO_2 40%, NaNO_3 5%, KNO_3 55%), sampel 4 (NaNO_2 32%, NaNO_3 18%, KNO_3 50%). Penelitian ini menggunakan DSC untuk mengkarakterisasi sampel yang bertujuan untuk mengetahui titik leleh, transisi gelas, dan kapasitas panas spesifik. Dari karakterisasi DSC diperoleh hasil titik leleh sampel 1 134,50 °C, sampel 2 214,00 °C, sampel 3 165,17 °C, sampel 4 217,00 °C, dan diperoleh hasil transisi gelas sampel 1 35,95 °C, sampel 2 32,04 °C, sampel 3 34,21 °C, sampel 4 34,07 °C. Kapasitas panas spesifik yang dihasilkan pada sampel 1 0,29 – 2,51 J/g°C, sampel 2 1,79 – 18,95 J/g°C, sampel 3 1,24 – 2,38 J/g°C, sampel 4 0,85 – 0,90 J/g°C. Hasil penelitian ini menunjukkan titik leleh terendah berada di sampel 1, dan titik leleh tertinggi berada di sampel 4. Transisi gelas paling tinggi yaitu pada sampel 1, dan terendah yaitu pada sampel 2. Kapasitas panas spesifik yang lebih sempit dihasilkan pada sampel 4 dan menunjukkan kestabilan karakteristik termal yang lebih baik daripada sampel yang lain. Sampel 4 menjadi sampel yang direkomendasikan untuk aplikasi pendingin di reaktor nuklir garam cair.

Kata kunci: MSR, garam cair, DSC, titik leleh, transisi gelas, kapasitas panas spesifik

ABSTRACT

EFFECT OF THE COMPOSITION AND PROPERTIES OF NaNO₂, NaNO₃, AND KNO₃ SALTS INCLUDING MELTING POINT, GLASS TRANSITION, SPECIFIC HEAT CAPACITY FOR COOLING APPLICATIONS IN NUCLEAR REACTORS

By

Nikmah Turohmah

MSR (Molten Salt Reactor) is a type of reactor that uses fluoride salt as its coolant. Molten salt is a fluid with excellent heat transfer properties due to its high heat capacity and good chemical stability. In this study, four samples were used: Sample 1 (NaNO₂ 35%, NaNO₃ 10%, KNO₃ 55%), Sample 2 (NaNO₂ 30%, NaNO₃ 15%, KNO₃ 55%), Sample 3 (NaNO₂ 40%, NaNO₃ 5%, KNO₃ 55%), and Sample 4 (NaNO₂ 32%, NaNO₃ 18%, KNO₃ 50%). Differential Scanning Calorimetry (DSC) was used to characterize the samples, aiming to determine their melting points, glass transition temperatures, and specific heat capacities. Based on the DSC characterization, the melting points obtained were: Sample 1 134.50 °C, Sample 2 214.00 °C, Sample 3 165.17 °C, and Sample 4 217.00 °C. The glass transition temperatures were: Sample 1 35.95 °C, Sample 2 32.04 °C, Sample 3 34.21 °C, and Sample 4 34.07 °C. The specific heat capacity ranges were: Sample 1 0.29 – 2.51 J/g°C, Sample 2 1.79 – 18.95 J/g°C, Sample 3 1.24 – 2.38 J/g°C, and Sample 4 0.85 – 0.90 J/g°C. The results indicate that Sample 1 had the lowest melting point, while Sample 4 had the highest. The highest glass transition temperature was observed in Sample 1, and the lowest in Sample 2. Sample 4 exhibited the narrowest range of specific heat capacity, indicating better thermal stability compared to the other samples. Therefore, Sample 4 is recommended for use as a coolant in molten salt nuclear reactors.

*Keywords: MSR, molten salt, DSC, melting point, glass transition, heat capacity
Specific*

PENGARUH KOMPOSISI DAN SIFAT GARAM NaNO_2 , NaNO_3 , DAN KNO_3 MELIPUTI TITIK LELEH, TRANSISI GELAS, KAPASITAS PANAS SPESIFIK UNTUK APLIKASI PENDINGIN PADA REAKTOR NUKLIR

Oleh

NIKMAH TUROHMAH

Skripsi

**Sebagai Salah Satu Syarat untuk Memperoleh Gelar
SARJANA SAINS**

Pada

**Jurusan Fisika
Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam
Universitas Lampung**



**JURUSAN FISIKA
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2025**

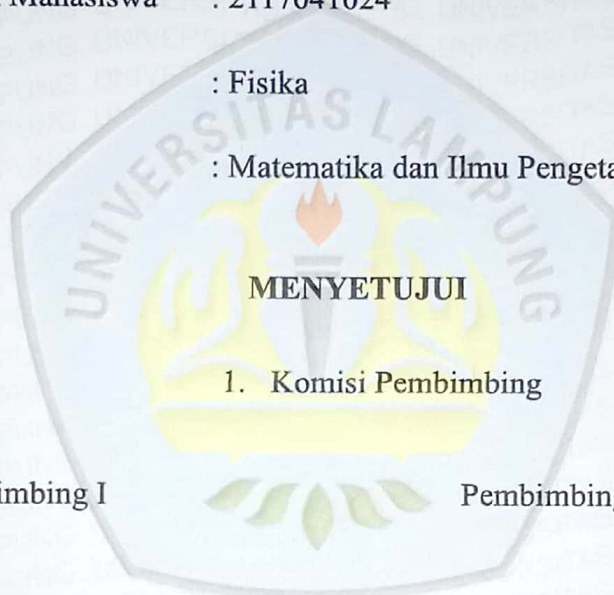
Judul Skripsi : Pengaruh Komposisi dan Sifat Garam NaNO_2 ,
 NaNO_3 , dan KNO_3 Meliputi Titik Leleh, Transisi
Gelas, Kapasitas Panas Spesifik Untuk Aplikasi
Pendingin Pada Reaktor Nuklir

Nama Mahasiswa : Nikmah Turohmah

Nomor Pokok Mahasiswa : 2117041024

Jurusan : Fisika

Fakultas : Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam



1. Komisi Pembimbing

Pembimbing I

Pembimbing II

A handwritten signature in black ink, consisting of a large 'Y' and a smaller 'L'.

Dr. Yanti Yulianti, S.Si., M.Si.
NIP. 19751219000122003

A handwritten signature in black ink, appearing to be 'Syafriadi'.

Drs. Syafriadi, M.Si.
NIP. 196108211992031002

2. Ketua Jurusan Fisika FMIPA

A handwritten signature in blue ink, appearing to be 'Arif Surtono'.

Arif Surtono, S.Si., M.Si., M.Eng.
NIP. 197109092000121001

MENGESAHKAN

1. Tim Penguji

Ketua : **Dr. Yanti Yulianti, S.Si., M.Si.**

.....

Sekretaris : **Drs. Syafriadi, M.Si.**

.....

Penguji Bukan Pembimbing : **Dr. Gurum Ahmad Pauzi, S.Si., M.T.**

.....

2. Dekan Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam



Dr. Eng. Heri Satria, S.Si., M.Si.
NIP. 197110012005011002

Tanggal Lulus Ujian Skripsi: **23 Juni 2025**

PERNYATAAN

Dengan ini saya menyatakan bahwa skripsi saya yang berjudul:

“Pengaruh Komposisi dan Sifat Garam NaNO_2 , NaNO_3 , dan KNO_3 Meliputi Titik Leleh, Transisi Gelas, Kapasitas Panas Spesifik Untuk Aplikasi Pendingin Pada Reaktor Nuklir” adalah hasil karya saya sendiri. Semua sumber data dan referensi yang digunakan dalam penulisan skripsi ini telah disebutkan dengan benar sesuai dengan kaidah akademik. Saya juga menyatakan bahwa skripsi ini belum pernah diajukan sebelumnya untuk memperoleh gelar akademik di universitas atau institusi manapun.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenar-benarnya, dan saya bersedia menanggung segala akibat apabila di kemudian hari ditemukan adanya pelanggaran terhadap pernyataan ini.

Bandar Lampung, 23 Juni 2025



Nikmah Turohmah
NPM. 2117041024

RIWAYAT HIDUP



Penulis, Nikmah Turohmah, dilahirkan di Cipadang pada tanggal 22 Maret 2003. Penulis adalah anak pertama dari pasangan Kuswoyo dan Ida Rahayu. Penulis memulai Pendidikan di TK Harapan Kita PTPN VII pada tahun 2008 hingga 2009, kemudian melanjutkan ke SDN 2 Cipadang dari tahun 2009 hingga 2015. Pendidikan menengah pertama ditempuh di SMPN 1 Gading Rejo dari tahun 2015 hingga 2018, dan Pendidikan menengah atas di SMAN 2 Gading

Rejo dari tahun 2018 hingga 2021. Pada tahun 2021 penulis diterima di Jurusan Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Lampung melalui jalur SNMPTN. Selama masa perkuliahan penulis aktif dalam berbagai organisasi. Penulis bergabung dengan Himpunan Mahasiswa Fisika FMIPA UNILA pada tahun 2022 sebagai anggota Bidang Sosial Masyarakat yang bertanggung jawab terhadap program kerja PDKT Angkatan. Penulis terlibat dalam kegiatan ilmiah sebagai peserta MBKM Penelitian Universitas Lampung pada tahun 2024 dengan topik mengenai **“Produksi Prototype Pembangkit Energi Listrik Elektrokimia Air Laut Dengan Sistem Otomatisasi Pengisian Air Laut dan Charging untuk Regenerasi Anoda”**. Kemudian dalam tugas akhirnya penulis memilih untuk memperdalam ketertarikannya di bidang teknologi nuklir pada pendingin di *Molten Salt Reactor* (MSR) sehingga pada akhirnya penulis mengambil penelitian mengenai **“Pengaruh Komposisi dan Sifat Garam NaNO_2 , NaNO_3 , dan KNO_3 Meliputi Titik Leleh, Transisi Gelas, Kapasitas Panas Spesifik Untuk Aplikasi Pendingin Pada Reaktor Nuklir”**.

MOTTO

“Belajar bukan untuk menjadi yang terbaik, tapi untuk menjadi lebih baik dari kemarin”

Unknown

"Dan bahwa manusia hanya memperoleh apa yang telah diusahakannya."

(QS. An-Najm: 39)

"Karena sesungguhnya sesudah kesulitan itu ada kemudahan."

(QS. Al-Insyirah: 6)

PERSEMBAHAN

**Dengan penuh rasa Syukur, cinta dan mengharapkan ridho Allah SWT dan
Syafaat Nabi Muhammad SAW**

Karya ini saya persembahkan untuk Orang tuaku tercinta

Kuswoyo & Ida Rahayu

Yang selalu menjadi sumber kekuatan dan inspirasi, atas segala doa, kasih sayang,
dan dukungan yang tak pernah henti

Saudaraku tercinta

Daffa Fadhila

Yang selalu memberi semangat dan dukungan

Sahabatku tercinta

Lusia Prastica & Anastiar Inayah

Yang selalu memberi semangat selama masa perkuliahan

Keluarga Besar dan teman-teman Angkatan 2021

Jurusan Fisika FMIPA UNILA

Atas kebersamaan dan dukungan selama perkuliahan

Serta Almamater Tercinta

Universitas Lampung

Tempat saya menimba ilmu dan mengembangkan diri

KATA PENGANTAR

Puji Syukur saya panjatkan kepada Allah SWT atas segala Rahmat dan karunia-Nya, sehingga saya dapat menyelesaikan skripsi ini dengan judul **“Pengaruh Komposisi dan Sifat Garam NaNO_2 , NaNO_3 , dan KNO_3 Meliputi Titik Leleh, Transisi Gelas, Kapasitas Panas Spesifik Untuk Aplikasi Pendingin Pada Reaktor Nuklir”**. Skripsi ini disusun sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Sains di Jurusan Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Lampung. Penelitian ini dilakukan untuk memberikan kontribusi dalam

Saya menyadari bahwa skripsi ini masih memiliki kekurangan dan keterbatasan. Oleh karena itu, saya terbuka untuk saran dan kritik yang membangun untuk perbaikan di masa mendatang. Semoga hasil penelitian ini bermanfaat dan menjadi referensi dalam pengembangan ilmu pengetahuan, khususnya dalam garam cair untuk pendingin reaktor nuklir, serta menjadi Langkah awal untuk penelitian lebih lanjut. Akhir kata, semoga karya ini dapat memberikan kontribusi positif bagi pembaca dan pengembangan ilmu pengetahuan.

Bandar Lampung, 23 Juni 2025
Penulis,

Nikmah Turohmah
NPM. 2117041024

SANWACANA

Puji Syukur saya panjatkan kepada Allah SWT atas segala rahmat dan hidayah-Nya, sehingga saya dapat menyelesaikan skripsi ini yang berjudul **“Pengaruh Komposisi dan Sifat Garam NaNO_2 , NaNO_3 , dan KNO_3 Meliputi Titik Leleh, Transisi Gelas, Kapasitas Panas Spesifik Untuk Aplikasi Pendingin Pada Reaktor Nuklir”** Skripsi ini dapat diselesaikan berkat dukungan dan bantuan dari berbagai pihak. Dengan penuh rasa hormat dan rendah hati, saya ingin menyampaikan rasa terima kasih yang sebesar-besarnya kepada:

1. Kedua orang tuaku, Ayah Kuswoyo dan Ibu Ida Rahayu yang tiada henti memberikan cinta, doa, dan dukungan di setiap langkah kehidupan penulis. Terima kasih atas segala pengorbanan yang telah Ayah dan Ibu berikan, baik dalam bentuk materi, tenaga, waktu, maupun dukungan moral yang begitu besar artinya. Doa-doa yang tulus, semangat yang terus diberikan, serta kasih sayang yang tidak pernah surut menjadi kekuatan utama penulis dalam menyelesaikan skripsi ini. Segala pencapaian ini tidak akan mungkin terwujud tanpa restu dan ridha dari Ayah dan Ibu. Semoga Allah SWT membalas semua kebaikan, kasih sayang, dan ketulusan Ayah dan Ibu dengan limpahan rahmat, kesehatan, dan kebahagiaan dunia akhirat.
2. Ibu Dr. Yanti Yulianti, S.Si., M.Si., sebagai pembimbing utama yang telah memberikan bimbingan, motivasi, nasihat serta ilmunya dalam penyelesaian skripsi.
3. Bapak Drs. Syafriadi, M.Si., sebagai pembimbing kedua yang telah memberikan saran, masukan dalam penulisan skripsi ini.
4. Bapak Gurum Ahmad Pauzi, S.Si., M.T., sebagai dosen penguji yang telah memberi masukan dan koreksi dalam penyelesaian skripsi ini.

5. Bapak Pulung Karo Karo, S.Si., M.Si., selaku Pembimbing Akademik yang memberikan masukan serta nasihat selama masa studi di Jurusan Fisika.
6. Bapak Dr. Eng. Heri Satria, S.Si., M.Si., selaku Dekan FMIPA Universitas Lampung.
7. Bapak Arif Surtono, S.Si., M.Si., M.Eng., sebagai Ketua Jurusan Fisika FMIPA Universitas Lampung.
8. Seluruh dosen Jurusan Fisika FMIPA Universitas Lampung yang telah memberikan banyak ilmu selama menjadi mahasiswa di Universitas Lampung.
9. Para Tenaga Kependidikan Jurusan Fisika yang telah membantu memenuhi kebutuhan administrasi penulis.
10. Adikku Daffa Fadhila yang selalu hadir sebagai sumber semangat dan keceriaan di tengah perjalanan penulis dalam menyelesaikan skripsi ini. Terima kasih atas doa yang tak henti-hentinya dipanjatkan, serta perhatian dan dukungan sederhana namun begitu berarti. Terima kasih karena telah menjadi adik yang pengertian, selalu memberi semangat dengan caramu sendiri, dan tak pernah lelah mendukung kakakmu dalam meraih impian.
11. Sahabat saya selama masa perkuliahan Lusya Prastica dan Anastia Inayah yang telah menjadi bagian penting dalam perjalanan akademik dan kehidupan pribadi penulis. Terima kasih atas kebersamaan yang begitu berarti, atas kehadiran kalian yang selalu setia menemani di saat senang maupun susah. Terima kasih atas setiap nasihat yang menenangkan, setiap saran yang membangun, dan terutama atas pengingat yang penuh kasih untuk selalu mendekat kepada Allah SWT dalam situasi dan kondisi apa pun. Persahabatan ini bukan hanya menjadi pelengkap hari-hari di bangku kuliah, tetapi juga menjadi penguat dalam perjalanan panjang ini.
12. Sahabat saya dikosan Adelia Putri dan Faza Aulia yang telah menjadi bagian penting dalam keseharian penulis selama masa perkuliahan. Terima kasih atas segala bentuk semangat yang selalu kalian berikan, atas tawa dan canda yang menjadi penghibur di tengah penatnya tugas dan kegiatan perkuliahan. Kebersamaan di kosan yang sederhana namun penuh makna ini telah memberikan warna tersendiri dalam perjalanan penulis. Terima kasih karena selalu ada saat penulis menghadapi kesulitan, baik dalam hal akademik maupun

kehidupan sehari-hari. Kehadiran kalian telah menjadi tempat berbagi, tempat bercerita, dan tempat kembali saat lelah menghampiri.

13. Seluruh teman-teman saya semasa kuliah, teman-teman satu bimbingan, teman-teman PKL, teman-teman KKN terimakasih telah baik kepada saya.
14. Teruntuk diri saya sendiri, terima kasih atas segala perjuangan yang telah dilalui hingga titik ini. Terima kasih karena telah memilih untuk terus melangkah meski jalan terkadang terasa berat dan melelahkan. Terima kasih telah bertahan di saat-saat penuh keraguan, kegelisahan, bahkan keputusasaan, namun tetap memilih untuk tidak menyerah. Terima kasih karena sudah berani menghadapi segala tantangan, tetap berusaha meskipun rasa lelah sering datang, dan tetap percaya bahwa setiap langkah yang diambil akan membawa hasil. Perjalanan ini tidak mudah, namun diri ini mampu melewatinya satu per satu dengan penuh tekad dan keyakinan. Semoga ke depan, diri ini selalu diberi kekuatan, keikhlasan, dan keberanian untuk terus tumbuh, belajar, dan menjadi versi terbaik dari diri sendiri.

Bandar Lampung, 23 Juni 2025
Penulis

Nikmah Turohmah
NPM. 2117041024

DAFTAR ISI

	Halaman
ABATRAK	i
<i>ABSTRACT</i>	ii
HALAMAN JUDUL	iii
LEMBAR PERSETUJUAN	iv
LEMBAR PENGESAHAN	v
LEMBAR PERNYATAAN	vi
RIWAYAT HIDUP	vii
MOTTO	viii
PERSEMBAHAN	ix
KATA PENGANTAR	x
SANWACANA	xi
DAFTAR ISI	xiv
DAFTAR GAMBAR	xvii
DAFTAR TABEL	xix
DAFTAR SIMBOL	xx
DAFTAR SINGKATAN	xxi

I. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	7
1.3 Tujuan Penelitian.....	7
1.4 Manfaat Penelitian	8
1.5 Batasan Masalah.....	8

II. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Reaktor Nuklir.....	9
2.2 <i>Molten Salt Reactor</i>	10
2.3 Penggunaan Garam Cair	13
2.4 <i>Differential Scanning Calorimetry (DSC)</i>	16
2.5 Pengukuran Pada <i>Differential Scanning Calorimetry (DSC)</i>	19
2.6 Penentuan Data Pada <i>Differential Scanning Calorimetry (DSC)</i>	21
2.7 Penentuan Data Kapasitas Panas Spesifik Pada <i>Differentian Scanning Calorimetry</i>	25

III. METODE PENELITIAN

3.1 Waktu dan Tempat.....	27
3.2 Alat dan Bahan.....	27
3.3 Prosedur Penelitian.....	29
3.3.1 Penentuan Komposisi Variasi Sampel.....	29
3.3.2 Preparasi Sampel.....	29
3.3.3 Karakterisasi Sampel Menggunakan <i>Differential Scanning Calorimetry (DSC)</i>	32
3.3.4 Pengolahan Data Yang Diperoleh Dari Karakterisasi <i>Differential Scanning Calorimetry (DSC)</i>	32
3.4 Diagram Alir.....	34

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Analisis Titik Leleh.....	35
4.1.1 Analisis Titik Leleh Sampel 1	35
4.1.2 Analisis Titik Leleh Sampel 2	37
4.1.3 Analisis Titik Leleh Sampel 3	40
4.1.4 Analisis Titik Leleh Sampel 4.....	42

4.2 Analisis Transisi Gelas	45
4.2.1 Analisis Transisi Gelas Sampel 1	45
4.2.2 Analisis Transisi Gelas Sampel 2	46
4.2.3 Analisis Transisi Gelas Sampel 3	47
4.2.4 Analisis Transisi Gelas Sampel 4	48
4.3 Analisis Kapasitas Panas Spesifik.....	50
4.3.1 Analisis Kapasitas Panas Spesifik Sampel 1	50
4.3.2 Analisis Kapasitas Panas Spesifik Sampel 2.....	51
4.3.3 Analisis Kapasitas Panas Spesifik Sampel 3.....	52
4.3.4 Analisis Kapasitas Panas Spesifik Sampel 4.....	53
V. KESIMPULAN DAN SARAN	
5.1 Kesimpulan	56
5.2 Saran.....	56
DAFTAR PUSTAKA.....	58
LAMPIRAN.....	62

DAFTAR GAMBAR

Gambar	Halaman
2.1 <i>Molten Salt Reactor</i>	11
2.2 Modul Dasar DSC	19
2.3. Proses Pemanasan Sampel dan Material Referensi.....	21
2.4 Pencairan Sampel	22
2.5 Sampel Meleleh.....	22
2.6 Grafik Hubungan Antara Jumlah Panas dan Suhu	23
2.7 Pengukuran PET dan Makromolekul	24
3.1 Garam.....	30
3.2 Sampel yang telah dioven	31
3.3 Sampel yang telah dimasukkan ke dalam wadah	31
3.4 Diagram Alir Penelitian.....	34
4.1 Hasil Karakterisasi Sampel 1 (35% NaNO_2 , 10% NaNO_3 , 55% KNO_3	35
4.2 Hasil Titik Leleh dan Transisi Gelas Sampel 1 (35% NaNO_2 , 10% NaNO_3 , 55% KNO_3)	36
4.3 Hasil Karakterisasi Sampel 2 (30% NaNO_2 , 15% NaNO_3 , 55% KNO_3)	38
4.4 Hasil Titik Leleh dan Transisi Gelas Sampel 2 (30% NaNO_2 , 15% NaNO_3 , 55% KNO_3)	38

4.5 Hasil Karakterisasi Sampel 3 (40% NaNO₂, 5% NaNO₃, 55% KNO₃)	40
4.6 Hasil Titik Leleh dan Transisi Gelas Sampel 3 (40% NaNO₂, 5% NaNO₃, 55% KNO₃)	41
4.7 Hasil Karakterisasi Sampel 4 (32% NaNO₂, 18% NaNO₃, 50% KNO₃)	42
4.8 Hasil Titik Leleh dan Transisi Gelas Sampel 4 (32% NaNO₂, 18% NaNO₃, 50% KNO₃)	43

DAFTAR TABEL

Tabel	Halaman
3.1 Komposisi Garam Pada Masing-Masing Sampel	30
4.2 Kapasitas Panas Spesifik Sampel 1	50
4.3 Kapasitas Panas Spesifik Sampel 2	51
4.4 Kapasitas Panas Spesifik Sampel 3	52
4.5 Kapasitas Panas Spesifik Sampel 4	53

DAFTAR SIMBOL

Simbol	Keterangan
C_p	Kapasitas panas spesifik (J/g°C)
T_g	Transisi gelas (°C)
T_m	Titik Leleh (°C)
q	Aliran panas (mJ)
Δt	Kenaikan suhu (°C)
m	Massa sampel (mg)

DAFTAR SINGKATAN

Singkatan	Keterangan	Muncul Pertama pada Halaman
MSR	<i>Molten Salt Reactor</i>	1
PWR	<i>Pressurized Water Reactor</i>	2
BWR	<i>Boiling Water Reactor</i>	2
DSC	<i>Differential Scanning Calorimetry</i>	8
FBR	<i>Fast Breeder Reactor</i>	9
ORNL	<i>Oak Ridge National Laboratory</i>	10
LMFBR	<i>Liquid Metal Fast Breeder Reactor</i>	10
GCFBR	<i>Gas-Cooled Fast Breeder Reactor</i>	10
PHWR	<i>Pressurized Heavy Water Reactor</i>	10
AGCR	<i>Advanced Gas-Cooled Reactor</i>	10
GCR	<i>Grafit Bereflector Reactor</i>	10
HTGR	<i>High Temperature Gas Cooled Reactor</i>	10
AEC	<i>Atomic Energy Commission</i>	10
MSRE	<i>Molten Salt Reactor Experiment</i>	10
MS-ESS	<i>Molten Salt Energy Storage System</i>	11
LFTR	<i>Liquid Fluoride Thorium Reactor</i>	14
TEI	<i>Terrestrial Energy Inc</i>	15
IMSR	<i>Integral Molten Salt Reactor</i>	15
DOE	<i>Departement of Energy</i>	15
INL	<i>Idaho National Laboratorium</i>	15
NRG	<i>Nuclear Research & Consulting Group</i>	16

I. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Energi nuklir memainkan peran penting dalam memenuhi kebutuhan energi global yang terus meningkat, terutama karena kontribusinya terhadap transisi energi bersih dan berkelanjutan. Menurut *International Atomic Energy Agency* (IAEA), teknologi reaktor nuklir modern menawarkan keunggulan signifikan dalam hal efisiensi, keamanan dan keberlanjutan lingkungan (International Energy Agency, 2021). Reaktor generasi baru, seperti *Molten Salt Reactor* (MSR) dirancang untuk meningkatkan efisiensi operasional dan meminimalkan risiko kecelakaan dengan memiliki keselamatan pasif. MSR menggunakan konsep *Full-Passive Safety System* dan *Inherent Safe* untuk menjamin keselamatan reaktor (Dwijayanto, 2015).

MSR merupakan suatu reaktor yang menggunakan garam *fluoride* sebagai pendinginnya dan merupakan satu-satunya jenis reaktor yang memiliki dua desain utama yang berbahan bakar cair dan berbahan bakar padat (Sabharwall *et al.*, 2019). MSR adalah teknologi reaktor canggih yang menjanjikan karena beroperasi pada suhu tinggi, meningkatkan efisiensi listrik, dan memiliki tekanan operasi rendah, yang meningkatkan keselamatan. MSR menghasilkan lebih sedikit limbah radioaktif tingkat tinggi dan tidak memerlukan bahan bakar padat. Reaktor ini mendukung berbagai siklus bahan bakar nuklir seperti *Uranium-Plutonium* dan *Thorium-Uranium*, serta dapat berfungsi sebagai pembakar limbah nuklir atau *breeder*. Panas tinggi yang dihasilkan juga dapat dimanfaatkan untuk pembangkitan listrik dan proses industri (IAEA, 2023).

Dalam sistem MSR bahan bakar dapat berfungsi juga sebagai pendingin, yaitu berupa garam cair. Penggunaan garam cair memberikan beberapa keuntungan, seperti efisiensi termal yang lebih tinggi dan risiko kecelakaan yang lebih rendah dibandingkan dengan reaktor konvensional yang menggunakan bahan bakar padat (Suhaemi, 2018). MSR menggunakan campuran garam cair sebagai bahan bakar serta pendingin, yang memungkinkan operasi pada suhu tinggi dengan tekanan rendah, sehingga mengurangi risiko kecelakaan yang terkait dengan tekanan tinggi (Limbaran *et al.*, 2021). MSR mampu beroperasi pada suhu tinggi, yaitu sekitar 700 °C -750 °C, dengan tekanan hampir setara dengan tekanan atmosfer, yang mengurangi kebutuhan akan bejana bertekanan tinggi (Abram, 2002).

Sistem pendingin di dalam MSR berbeda dari reaktor nuklir konvensional karena MSR tidak menggunakan air sebagai pendingin. Sistem MSR memanfaatkan garam cair sebagai pendingin primer, yang juga berfungsi sebagai medium transportasi untuk produk fisi (Suhaemi, 2018). Proses pendinginan dilakukan dengan cara mengalirkan garam cair ke dalam penukar panas, di mana panas dari bahan bakar ditransfer ke pendingin sekunder. Hal ini memungkinkan pengaturan suhu reaktor secara efektif dan menghindari risiko terjadinya ledakan uap yang sering terjadi pada reaktor berbahan bakar air (Dwijayanto, 2024). Keunggulan lain dari sistem pendingin MSR adalah kemampuannya untuk mengatur daya reaktor secara dinamis. Dengan mengubah laju aliran garam cair, operator dapat meningkatkan atau menurunkan daya reaktor sesuai kebutuhan. Penurunan laju aliran pendingin akan menurunkan suhu reaktor dan meningkatkan reaktivitas, sedangkan peningkatan laju aliran akan memiliki efek sebaliknya (Noha & Widiarto, 2012).

Tantangan dalam pemilihan material pendingin untuk reaktor nuklir sangat kompleks dan beragam. Sejarah penggunaan material pendingin dimulai dengan air, yang digunakan dalam banyak reaktor konvensional seperti PWR (*Pressurized Water Reactor*) dan BWR (*Boiling Water Reactor*). Air memiliki kemampuan yang baik dalam menyerap panas dan moderasi neutron, tetapi dapat mengalami masalah seperti korosi dan radiolisis yang dapat mempengaruhi kinerja reaktor (Ahied, 2015). Selain itu, air juga beroperasi di bawah tekanan tinggi, yang menambah tantangan desain dan keselamatan. Dengan meningkatnya kebutuhan akan efisiensi

dan keselamatan, para peneliti mulai mencari alternatif yang lebih baik. Garam cair menjadi alternatif para peneliti untuk dijadikan sebagai bahan bakar dan pendingin di reactor nuklir.

Natrium nitrit (NaNO_2) adalah senyawa anorganik yang berbentuk padatan kristal berwarna putih kekuningan dan larut dalam air. Dalam bidang teknik termal, NaNO_2 digunakan sebagai komponen dalam campuran garam cair karena memiliki titik leleh yang relatif rendah sekitar 271°C , yang membantu menurunkan titik leleh total campuran garam. Sifat ini sangat penting dalam aplikasi sebagai media transfer panas di sistem termal seperti reaktor nuklir generasi lanjut (Yao, *et al.*, 2014).

Natrium nitrat (NaNO_3) adalah garam anorganik berbentuk kristal putih yang sangat larut dalam air dan memiliki titik leleh sekitar 308°C . NaNO_3 sering digunakan dalam campuran garam karena memiliki kestabilan termal yang baik dan kemampuan menyimpan energi panas yang tinggi. Di dalam aplikasi teknologi termal seperti sistem penyimpanan energi termal atau reaktor nuklir pendingin garam cair, NaNO_3 berfungsi sebagai penstabil suhu tinggi karena struktur ioniknya memungkinkan konduksi panas yang efisien (Bradshaw *et al.*, 1982).

Kalium nitrat (KNO_3) merupakan senyawa kristalin putih dengan titik leleh sekitar 334°C dan merupakan komponen penting dalam berbagai campuran garam eutektik. KNO_3 dikenal karena kemampuannya menurunkan viskositas campuran dan meningkatkan efisiensi perpindahan panas. Dalam sistem pendingin reaktor nuklir atau penyimpanan panas konsentrat surya, KNO_3 berperan sebagai bahan yang dapat menstabilkan suhu tinggi dan menjaga sifat termofisik garam tetap ideal pada rentang operasi yang luas. Selain itu, KNO_3 memiliki kestabilan kimia yang baik terhadap dekomposisi termal, menjadikannya komponen penting dalam desain garam cair yang optimal (Vidal *et al.*, 2006).

Pemilihan campuran garam NaNO_2 , NaNO_3 , dan KNO_3 sebagai garam cair untuk pendingin di reaktor nuklir didasarkan pada kombinasi sifat termofisika yang sangat mendukung kinerja sistem pendingin. Ketiga garam ini membentuk campuran eutektik yang dapat menurunkan titik leleh secara signifikan, bahkan hingga di

bawah 150 °C, sehingga cocok digunakan dalam sistem pendinginan yang membutuhkan suhu operasi menengah ke tinggi (Yao *et al.*, 2014). Selain itu, ketiganya memiliki kapasitas panas spesifik yang tinggi, konduktivitas termal yang memadai, serta kestabilan kimia yang baik pada rentang suhu operasi reaktor. NaNO_2 berperan dalam menurunkan titik leleh campuran, NaNO_3 menambah kestabilan kimia, sementara KNO_3 meningkatkan efisiensi transfer panas. Ketiganya juga relatif mudah didapat dan lebih aman secara kimia dibandingkan garam fluoride yang digunakan pada reaktor generasi lanjut seperti MSR. Oleh karena itu, campuran NaNO_2 - NaNO_3 - KNO_3 menjadi pilihan yang efisien dan ekonomis sebagai media pendingin dalam pengembangan teknologi reaktor nuklir masa depan (Vidal *et al.*, 2006).

Garam cair merupakan suatu fluida yang memiliki transfer panas yang baik karena mempunyai kapasitas panas yang tinggi, titik didih yang tinggi serta stabilitas kimianya yang baik. Dalam reaktor berbahan bakar cair dan unit pemrosesan ulang bahan bakar bekas, garam cair membawa bahan bakar penghasil panas dalam keadaan cair (Jeong *et al.*, 2018). Penggunaan utama garam cair dalam teknologi energi yaitu untuk produksi daya dan penyimpanan energi. Garam tetap berada dalam fase cair tunggal bahkan pada suhu sangat tinggi dan tekanan atmosfer, menjadikannya sangat cocok untuk teknologi energi canggih, seperti reaktor garam cair atau sistem energi hibrida (Roper *et al.*, 2022).

Garam cair memiliki kapasitas panas yang tinggi, memungkinkan efisiensi termal yang lebih baik dan kemampuan untuk menyerap panas berlebih secara efektif. Ini sangat relevan dalam konteks keselamatan *pasca-shutdown*, di mana sistem pendinginan pasif dapat beroperasi tanpa intervensi aktif, menjaga suhu reaktor dalam batas aman (Suhaemi, 2018). Sistem ini juga mengurangi kemungkinan terjadinya *steam explosion*, sebuah risiko yang umum pada reaktor yang menggunakan air sebagai pendingin. Dalam MSR, produk fisi dan aktinida dapat dikeluarkan secara online selama operasi, meningkatkan efisiensi bahan bakar dan mengurangi limbah radioaktif (Harto, 2011). Dengan karakteristik *inherent safety*, seperti koefisien umpan balik daya negatif, MSR secara otomatis menurunkan

reaktivitas saat suhu meningkat, sehingga memberikan lapisan tambahan perlindungan terhadap potensi kegagalan (Suhaemi, 2018).

Penelitian mengenai penggunaan garam cair sebagai pendingin reaktor nuklir semakin berkembang dalam dekade terakhir. LeBlanc (2015) mengulas potensi teknologi *Molten Salt Reactors* (MSR) sebagai solusi untuk meningkatkan efisiensi dan keselamatan reaktor nuklir generasi berikutnya. MSR memiliki keunggulan dalam hal pengurangan risiko pelepasan radioaktif, karena garam cair yang digunakan sebagai pendingin juga berfungsi sebagai bahan bakar yang dapat solidifikasi dalam kondisi darurat, sehingga mengurangi potensi insiden serius.

Andreades *et al.*, (2016) melakukan analisis mengenai pengembangan MSR dengan fokus pada teknologi *Thorium-fueled Molten Salt Reactor*. Hasil penelitian mereka menunjukkan bahwa MSR dengan bahan bakar thorium memiliki potensi untuk menghasilkan energi yang lebih bersih dan efisien dibandingkan reaktor konvensional, sambil mengurangi limbah radioaktif jangka panjang. Penelitian oleh Chen *et al.*, (2018) juga mengungkapkan bahwa garam cair memiliki kapasitas yang sangat baik dalam menyimpan energi panas, menjadikannya ideal untuk reaktor suhu tinggi yang dioperasikan secara terus-menerus. Mereka juga menemukan bahwa variasi komposisi garam cair dapat mempengaruhi sifat termal, seperti titik leleh dan viskositas, yang sangat penting untuk desain reaktor.

Williams (2006) menjelaskan tentang garam yang dapat digunakan sebagai pendingin transfer panas, garam tersebut yaitu campuran garam LiF-NaF-KF memiliki titik leleh 454 °C, KF-ZrF₄ memiliki titik leleh 390 °C, LiF-NaF-ZrF₄ memiliki titik leleh 436 °C, LiCl-KCl memiliki titik leleh 355 °C, LiCl-RbCl memiliki titik leleh 313 °C, KCl-MgCl₂ memiliki titik leleh 426 °C, NaF-NaBF₄ memiliki titik leleh 385 °C. Kawakami *et al* (2004) dalam penelitiannya tentang Pengukuran kapasitas panas dari NaNO₃-NaNO₂-KNO₃ cair menggunakan kalorimetri tetes dihasilkan kapasitas panas NaNO₃ murni, NaNO₂, dan KNO₃ masing-masing adalah 0,129, 0,110, dan 0,142 kJ/mol/K.

Campuran garam nitrat NaNO₂, NaNO₃, dan KNO₃ banyak digunakan sebagai fluida kerja dalam sistem penyimpanan energi termal dan juga sebagai media

pendingin pada aplikasi suhu tinggi, termasuk reaktor nuklir garam cair. Wu *et.al* (2020) memanfaatkan campuran *molten nitrate salt* NaNO_2 , NaNO_3 , dan KNO_3 untuk aplikasi pendinginan fluida kerja pada *loop* sirkulasi alami dengan *double heat exchanger*. Kudariyawar *et.al* (2016) memanfaatkan NaNO_3 dan KNO_3 dengan rasio perbandingan 60:40 sebagai fluida kerja loop sirkulasi alami dengan orientasi pemanas vertikal pendingin horizontal.

Meskipun teknologi ini menjanjikan, penelitian lebih lanjut diperlukan untuk memastikan keberlanjutan dan keandalan jangka panjang dari sistem pendingin berbasis garam cair. Brendebach *et al* (2020) menekankan perlunya kajian lebih lanjut dalam desain reaktor dan pemilihan material paduan yang dapat bertahan di bawah kondisi korosi yang ekstrim akibat paparan garam cair. Kajian ini menyoroti tantangan utama yang masih dihadapi dalam pengembangan reaktor nuklir berbasis garam cair, termasuk dalam pengoptimalan material dan pemahaman menyeluruh mengenai perilaku termofisikanya.

Berdasarkan permasalahan yang telah diidentifikasi dalam penggunaan garam cair sebagai pendingin reaktor nuklir, penelitian ini bertujuan untuk mengkarakterisasi sifat termofisika campuran garam cair NaNO_2 , NaNO_3 , dan KNO_3 , yang meliputi titik leleh, transisi gelas, dan kapasitas panas spesifik. Pemahaman yang lebih mendalam mengenai sifat-sifat ini sangat penting untuk mendukung pengembangan MSR, yang diketahui memiliki potensi besar dalam meningkatkan efisiensi dan keselamatan reaktor nuklir. Fokus utama pada penelitian ini adalah mencari komposisi garam cair yang dapat mencapai titik leleh yang dapat digunakan sebagai eksperimen pada pendingin di reaktor garam cair. Dengan demikian, hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi penting dalam pengembangan material yang dapat digunakan sebagai pendingin reaktor nuklir.

Berdasarkan penelitian terdahulu, campuran garam cair NaNO_2 , NaNO_3 , dan KNO_3 menunjukkan potensi besar sebagai pendingin reaktor nuklir, terutama dalam MSR, karena sifat termal yang stabil dan kapasitas penyimpanan energi yang tinggi (Chen *et al.*, 2019). Studi awal mengindikasikan bahwa komposisi optimal dari garam-garam ini dapat menurunkan titik leleh dan meningkatkan kapasitas panas spesifik,

sehingga memungkinkan reaktor beroperasi pada suhu tinggi dengan lebih efisien (LeBlanc, 2010).

Dengan demikian, jawaban sementara dari penelitian ini menunjukkan bahwa campuran garam cair NaNO_2 , NaNO_3 , dan KNO_3 dapat menjadi solusi yang menjanjikan untuk meningkatkan efisiensi termal dan keselamatan operasional reaktor, dengan syarat material pipa yang tahan korosi dikembangkan lebih lanjut (Brendebach *et al.*, 2020). Namun, diperlukan eksperimen lebih lanjut untuk memastikan keandalan dan ketahanan garam cair ini di berbagai kondisi operasional ekstrem yang dihadapi oleh reaktor nuklir.

1.2 Rumusan Masalah

Rumusan masalah pada penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Bagaimana pengaruh variasi komposisi garam NaNO_2 , NaNO_3 , dan KNO_3 terhadap titik leleh?
2. Bagaimana pengaruh variasi komposisi garam NaNO_2 , NaNO_3 , dan KNO_3 terhadap transisi gelas?
3. Bagaimana kapasitas panas spesifik dari komposisi garam NaNO_2 , NaNO_3 , dan KNO_3 ?

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan dilakukannya penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Mengetahui pengaruh variasi komposisi garam NaNO_2 , NaNO_3 , dan KNO_3 terhadap titik leleh.
2. Mengetahui pengaruh variasi komposisi garam NaNO_2 , NaNO_3 , dan KNO_3 terhadap transisi gelas.
3. Mengetahui kapasitas panas spesifik dari masing-masing komposisi campuran garam.

1.4 Manfaat Penelitian

Manfaat penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Mampu menciptakan komposisi garam NaNO_2 , NaNO_3 , dan KNO_3 yang baik untuk aplikasi pendingin reaktor nuklir.
2. Mampu mengetahui komposisi garam NaNO_2 , NaNO_3 , dan KNO_3 yang baik untuk digunakan sebagai pendingin reaktor nuklir.
3. Mampu menganalisis sifat termal komposisi garam NaNO_2 , NaNO_3 , dan KNO_3 .

1.5 Batasan Masalah

Batasan masalah pada penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Penelitian ini dilaksanakan pada 1 Januari 2025 sampei dengan 1 April 2025.
2. Preparasi sampel pada penelitian ini dilakukan di Laboratorium Fisika Material, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Lampung.
3. Karakterisasi pada penelitian ini dilakukan menggunakan alat *Differential Scanning Calorimetry* (DSC) dan karakterisasi dilakukan di Universitas Sumatra Utara.
4. Penelitian ini difokuskan pada pencampuran garam NaNO_2 , NaNO_3 , dan KNO_3 dengan perbandingan (35, 30, 40, 32 : 10, 15, 5, 18 : 55, 55, 55, 50).
5. Penelitian ini menggunakan 4 variasi campuran garam yaitu sampel 1 NaNO_2 35%, NaNO_3 10%, KNO_3 55%, sampel 2 NaNO_2 30%, NaNO_3 15%, KNO_3 55%, sampel 3 NaNO_2 40%, NaNO_3 5%, KNO_3 55%, sampel 4 NaNO_2 32%, NaNO_3 18%, KNO_3 50%.
6. Penelitian ini difokuskan pada karakterisasi sifat termal dari campuran garam yang meliputi titik leleh, transisi gelas, kapasitas panas spesifik.
7. Penggunaan campuran garam yang dikembangkan dalam penelitian ini hanya dibatasi untuk aplikasi pendingin di reaktor nuklir garam cair.

II. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Reaktor Nuklir

Reaktor nuklir merupakan suatu instalasi yang beroperasi berdasarkan reaksi fisi, yaitu proses pembelahan inti atom yang terjadi secara berantai dan terkendali. Reaksi fisi berlangsung di bagian inti reaktor, yang disebut teras reaktor. Teras ini terdiri dari beberapa komponen utama seperti bahan bakar, moderator, reflektor, dan sumber neutron. Berdasarkan fungsinya, reaktor nuklir dibedakan menjadi dua jenis utama yaitu reaktor penelitian dan reaktor daya. Reaktor penelitian digunakan untuk keperluan pendidikan, pelatihan, penelitian bahan, produksi radioisotop, serta pengujian material, di mana neutron yang dihasilkan digunakan dan panas yang dihasilkan dibuang.

Disisi lain reaktor daya dirancang untuk menghasilkan energi panas yang dimanfaatkan untuk menghasilkan energi listrik. Energi panas yang dihasilkan reaktor digunakan untuk memanaskan air sehingga menghasilkan uap yang menggerakkan turbin dan pada akhirnya menghasilkan listrik. Reaktor daya biasanya memiliki kapasitas termal yang besar, berkisar antara 2.000 MW hingga 5.000 MW, yang mampu menghasilkan daya listrik antara 600 MW hingga 1.700 MW.

Selain berdasarkan fungsinya, reaktor nuklir juga dapat diklasifikasikan berdasarkan jenis neutron yang digunakan serta parameter operasinya. Berdasarkan jenis neutron, reaktor dapat dibagi menjadi reaktor cepat dan reaktor termal. Contoh reaktor cepat meliputi *fast breeder reactor* (FBR), *liquid metal fast breeder reactor*

(LMFBR), dan *gas-cooled fast breeder reactor* (GCFBR). Sedangkan contoh reaktor termal antara lain yaitu *pressurized water reactor* (PWR), *boiling water reactor* (BWR), *pressurized heavy water reactor* (PHWR), dan *advanced gas-cooled reactor* (AGCR). Jenis reaktor berdasarkan parameter atau bagian reaktor yang lain yaitu *reactor berefektor grafit* (GCR), *Advance GCR* (AGCR), reaktor berpendingin air ringan, PWR, BWR, dan reaktor yang beroperasi pada suhu tinggi, *high temperature gas cooled reactor* (HTGR).

Pada reaktor nuklir reaksi fisi dirancang dengan sangat terkendali sehingga tidak mungkin dapat meledak. Prinsipnya ada tiga langkah yaitu pertama pemasangan sistem batang kendali yang andal yaitu dengan menggunakan bahan absorber atau penyerap neutron yang sangat kuat seperti boron, grafit, atau kadmium, yang dilengkapi dengan sistem yang tidak memungkinkan untuk keluar dari bahan bakar sehingga tidak mungkin terjadi reaksi fisi di luar kendali. Kedua, reaktor dilengkapi dengan sistem pendingin yang selalu cukup pada segala kondisi untuk menjaga keutuhan atau integritas bahan bakar, dengan demikian zat radioaktif yang timbul tetap terjaga di dalam bahan bakar. Ketiga, reaktor dilengkapi dengan sistem pengungkung radiasi secara berlapis-lapis untuk mencegah terjadinya pelepasan zat radioaktif ke lingkungan (Kuntoro, 2023).

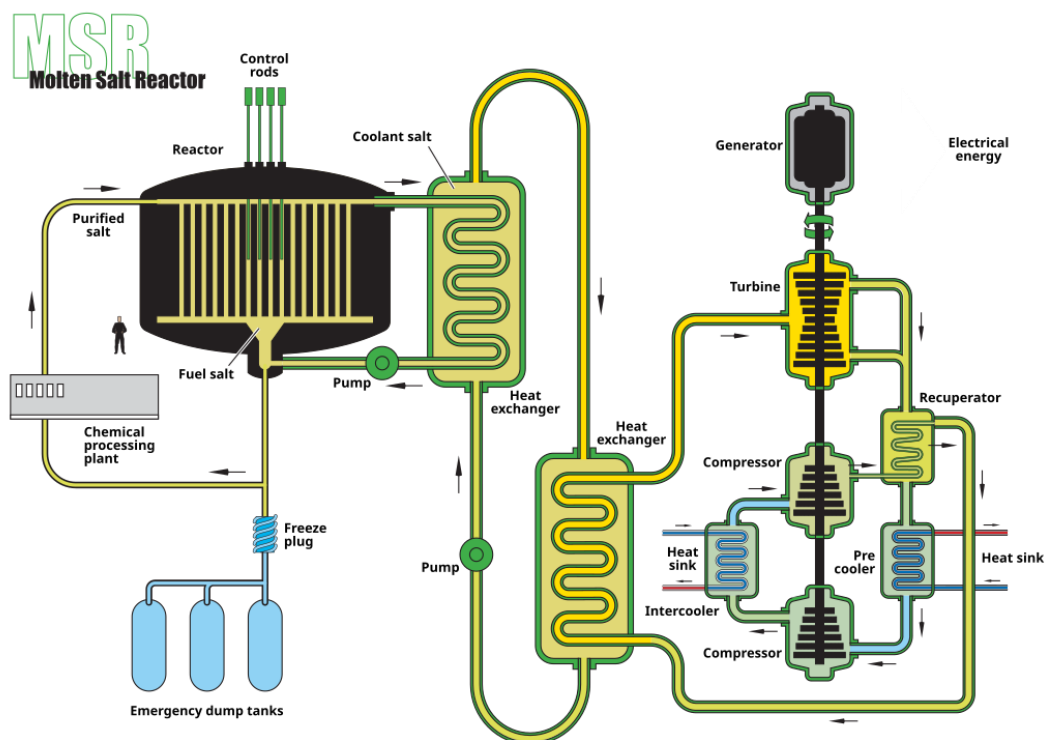
2.2 Molten Salt Reactor

Tahun 1950 merupakan tahun dimulainya penggunaan garam cair, dimana ketika *Oak Ridge National Laboratory* (ORNL) mulai mengembangkan dan menguji mesin pesawat bertenaga nuklir yang menggunakan garam cair. Kemudian, pada tahun 1954 ORNL mulai mengalihkan fokusnya dari garam cair untuk mesin pesawat ke reaktor nuklir. Stabilitas termal garam cair sangat menarik dalam pengembangan reaktor nuklir karena garam ini tidak akan terurai ketika terpapar suhu tinggi yang terkait dengan reaktor nuklir. *U.S Atomic Energy Commission* (AEC) tertarik untuk mempelajari berbagai konsep reaktor pembiakan.

Sebuah reaktor pembiakan garam cair uji yang relatif berhasil dikembangkan pada tahun 1960-an di ORNL. Namun, pada saat itu, *Molten Salt Reactor Experiment*

(MSRE) bersaing langsung dengan proyek reaktor nuklir lain yaitu proyek *Liquid Metal Fast Breeding Reactor* (LMFBR) (ORNL, 1976).

Reaktor garam cair pertama yang dibangun oleh ORNL selesai pada tahun 1954 dan beroperasi selama beberapa hari, dengan suhu maksimum 1.620 °F. Konsep awal reaktor garam cair adalah reaktor non-pembiakan yang menggunakan berbagai fluorida cair, termasuk *fluorida uranium* (UF₄) dan *fluorida torium* (ThF₄). Namun, pada tahun 1959, semua minat AEC terhadap reaktor garam cair hanya terfokus pada konsep reaktor pembiakan. Oleh karena itu, MSRE diajukan kepada AEC untuk mengembangkan dan menguji reaktor pembiakan garam cair. Reaktor pembiakan adalah reaktor yang menghasilkan lebih banyak bahan fisi yang dapat diolah daripada yang dikonsumsi.



Gambar 2.1 *Molten Salt Reactor (Oak Ridge National Laboratory)*

Gambar 2.1 menunjukkan diagram skematik dari MSR, reaktor ini memiliki beberapa komponen utama, termasuk *fuel salt* (bahan bakar garam cair) yang menjadi sumber energi melalui reaksi fisi nuklir, *coolant salt* (garam pendingin)

yang mentransfer panas dari reaktor ke *heat exchanger*, serta *control rods* yang mengatur laju reaksi dengan menyerap neutron. Untuk keamanan, terdapat *freeze plug*, sumbat beku yang dapat mencair dalam keadaan darurat, memungkinkan bahan bakar mengalir ke *emergency dump tanks*, yang secara otomatis menghentikan reaksi.

Panas yang dihasilkan dari reaksi fisi dalam bahan bakar ditransfer ke fluida kerja melalui *heat exchanger*. Fluida kerja ini kemudian diarahkan ke sistem konversi energi, di mana panasnya digunakan untuk menggerakkan *turbine*, yang selanjutnya menggerakkan generator untuk menghasilkan listrik. Sistem ini juga dilengkapi dengan *recuperator*, *compressor*, *heat sink*, dan *intercooler*, yang berfungsi untuk meningkatkan efisiensi termodinamika dalam proses konversi energi. Selain itu, *chemical processing plant* bertugas untuk memurnikan bahan bakar dengan menghilangkan produk sampingan fisi, sehingga reaktor dapat beroperasi lebih efisien dan menghasilkan limbah radioaktif yang lebih sedikit dibandingkan reaktor konvensional.

Bagian *Coolant Salt* (garam pendingin) dalam diagram MSR berperan penting dalam memindahkan panas dari bahan bakar ke sistem pembangkit listrik. Garam pendingin ini berada dalam sirkuit sekunder yang terpisah dari *Fuel Salt* (garam bahan bakar), sehingga mencegah kontaminasi langsung dengan produk fisi radioaktif. Ketika *Fuel Salt* dalam inti reaktor mengalami reaksi fisi dan menghasilkan panas, panas ini dipindahkan ke *Coolant Salt* melalui *Heat Exchanger*. Garam pendingin yang telah menyerap panas kemudian mengalirkannya ke sistem pembangkit listrik, di mana energi termal diubah menjadi energi mekanik melalui turbin, dan akhirnya menjadi listrik melalui generator. Setelah melepaskan panasnya, garam pendingin kembali ke *heat exchanger* dalam kondisi lebih dingin untuk mengulangi siklus perpindahan panas, menjaga sistem tetap berjalan dengan efisien.

2.3 Penggunaan Garam Cair

Fitur terbesar dari garam cair adalah kemampuannya untuk mengalirkan panas. Ini adalah karakteristik yang menentukan untuk teknologi garam cair baik dalam MSR maupun *molten salt energy storage systems* (MS-ESS). Garam cair juga dapat digunakan untuk menghantarkan listrik, yang berguna dalam penguraian garam cair (Hoglund, 1997). Seperti yang disebutkan sebelumnya, garam cair pertama kali digunakan untuk mengembangkan reaktor nuklir. Reaktor ini menggunakan bahan bakar garam cair, biasanya yaitu fluorida yang dicampur dengan torium, uranium, litium, atau berilium. Campuran ini berbeda dengan bahan bakar padat yang digunakan dalam reaktor nuklir tradisional.

MSR dikenal karena keselamatannya yang tiada tanding dibandingkan dengan berbagai jenis reaktor lainnya. Dibandingkan dengan reaktor nuklir lainnya, reaktor nuklir garam cair tidak dapat mengalami pelelehan karena bahan bakarnya sudah dalam keadaan cair sejak awal. Fitur keselamatan dari reaktor nuklir garam cair adalah jika fisi yang dihasilkan menyebabkan *overheating* di dalam reaktor, yang dapat melebihi 700 °C, bahan bakar akan tumpah keluar dari reaktor, biasanya dengan melelehkan penyumbat tumpahan, ke dalam sirkulasi yang diisi dengan air. Hal ini kemudian mengurangi fusi dalam tangki, dan sebagai hasilnya tangki akan mendingin. Selain itu, dalam hal terjadinya kebocoran tangki, bahan bakar hanya akan membeku pada suhu atmosfer. Hal ini terjadi karena bahan bakar tidak tertekan seperti reaktor tradisional, radiasi tidak akan menyebar ke atmosfer selama kebocoran.

Reaktor nuklir garam cair juga menghasilkan limbah nuklir yang lebih sedikit dibandingkan reaktor tradisional. Dalam reaktor tradisional, fusi yang dihasilkan oleh batang uranium menciptakan *xenon*, yang dapat menyebabkan keretakan pada batang keramik. Dengan reaktor garam cair, bahan bakar berada dalam bentuk cair dan oleh karena itu tidak menggunakan batang keramik. Adapun gas yang dihasilkan dalam reaktor garam cair selama fusi, gas tersebut hanya naik ke bagian atas tangki di mana dapat ditangkap dan dihilangkan.

Karena keselamatannya yang melekat, reaktor nuklir garam cair lebih murah dibandingkan reaktor tradisional karena reaktor garam cair memerlukan lebih sedikit langkah keselamatan dan redundansi dibandingkan reaktor tradisional. Terakhir, reaktor garam cair dapat membatasi proliferasi senjata nuklir karena sebagian besar bahan bakar yang sebenarnya, yaitu aktinida, dikonsumsi oleh reaktor itu sendiri, sehingga mengurangi jumlah limbah yang tersedia untuk proliferasi. Selain itu, reaktor dapat menggunakan limbah nuklir dari reaktor tradisional sebagai bahan bakar, yang dapat mengurangi limbah yang tersedia untuk proliferasi (Williams, 2017).

Salah satu manfaat terbesar dari reaktor nuklir garam cair dan sistem penyimpanan energi garam cair yaitu reaktor garam cair tidak mengeluarkan karbon seperti pembangkit listrik berbahan bakar batubara dan gas alam. Beberapa konsep reaktor nuklir garam cair, seperti *liquid fluoride thorium reactor* (LFTR), dapat mengonsumsi 99% dari bahan bakarnya. Produk limbah yang dihasilkan hanya perlu dikubur selama 300 tahun dibandingkan dengan minimum 10.000 tahun untuk sebagian besar reaktor tradisional. LFTR dapat dibuat lebih kecil dibandingkan reaktor tradisional, memungkinkan untuk lebih banyak aplikasi. Selain itu, karena LFTR beroperasi pada suhu yang lebih tinggi dibandingkan reaktor tradisional, LFTR dapat memanfaatkan siklus konversi yang lebih efisien dalam mengubah panas menjadi listrik (Mosher, 2017).

Fitur paling unik dari garam cair dibandingkan dengan reaktor lainnya adalah bahwa garam cair dapat berfungsi sebagai bahan bakar dan pendingin untuk reaktor. Selain itu, garam cair bersifat *inert* secara kimia, artinya baik udara maupun air tidak akan menyebabkan mereka terbakar. Suhu operasi dari reaktor garam cair yaitu 973 K dimana suhu ini jauh lebih rendah daripada titik lebur garam cair, yang setidaknya 1.670 K. Satu-satunya kekhawatiran untuk reaktor nuklir garam cair adalah bahwa tidak ada analisis kecelakaan terbaru yang dilakukan pada konsep reaktor ini untuk memberikan wawasan tentang bagaimana kecelakaan reaktor garam cair akan terjadi. Ini dapat menimbulkan tantangan bagi regulator dalam mencoba menilai risiko penuh dari reaktor garam cair. Namun, seperti yang

disebutkan sebelumnya, garam cair bersifat mandiri dalam hal terjadinya insiden atau kecelakaan (Elsheikh, 2013).

Pertimbangan ini dapat membantu membalikkan tren di mana tidak hanya pengembangan reaktor nuklir di Amerika Serikat terhenti, tetapi beberapa reaktor yang ada saat ini sedang dinonaktifkan. Namun, karena Amerika Serikat waspada terhadap pengembangan reaktor nuklir, negara lain sedang menjajaki pengembangan MSR, termasuk Cina, Kanada, dan Belanda (Chen, 2017).

Pemerintah pusat Cina sedang membiayai pengembangan dua reaktor nuklir garam cair di Cina utara untuk membantu memenuhi permintaan listrik Cina. Reaktor tersebut diharapkan akan beroperasi pada tahun 2020 dengan bahan bakar utama untuk reaktor ini adalah garam berbasis torium. Alasan utama untuk ini adalah karena abundansi torium di Cina. Namun, reaktor nuklir garam cair ini juga akan mampu mengkonsumsi garam berbasis uranium yang ada. Tantangan utama yang mempengaruhi pengembangan reaktor ini adalah efek garam cair pada pipa yang digunakan untuk reaktor. Implementasi reaktor yang sukses dapat mengarah pada pengembangan reaktor nuklir garam cair untuk penggunaan militer. Drone bertenaga nuklir garam cair dan reaktor di kapal angkatan laut dan kapal induk Cina sedang dipertimbangkan (Martin, 2016).

Regulator Kanada saat ini sedang menilai desain MSR oleh *Terrestrial Energy Inc* (TEI). TEI sedang mengembangkan proyek yang disebut *Integral Molten Salt Reactor* (IMSR). IMSR menggunakan garam uranium cair untuk mendinginkan reaktor dan berfungsi sebagai bahan bakar di dalam reaktor. Pendinginan dicapai melalui peluruhan panas, di mana panas dipindahkan melalui konveksi alami di dalam tangki, dan kemudian cukup diserap oleh dinding tangki.

Jika konsep ini lolos dari pemeriksaan regulasi, langkah selanjutnya adalah mencari lokasi untuk membangun proyek tersebut, yang mencakup Laboratorium Nasional Kanada di Chalk River, Ontario. Pengembangan konsep serupa telah diundang oleh *Departement of Energy AS* (DOE) ke program jaminan pinjaman mereka, yang menjanjikan bahwa DOE akan membiayai pembangunan proyek di *Idaho National Laboratory* (INL) (Conca, 2017).

Di Belanda, eksperimen MSR berbasis torium pertama di dunia dalam 40 tahun sedang dilakukan di *Nuclear Research & Consulting Group* (NRG). Konsep reaktor ini akan menggunakan senyawa yang terdiri dari garam fluorida torium dan fluorida litium yang ditempatkan dalam empat crucible untuk menghasilkan energi. Jika berhasil, konsep reaktor kedua yang menggunakan senyawa fluorida beryllium dan fluorida litium akan diuji. Selain MSR, pengembangan MS-ESS telah dipercepat di seluruh dunia. Setelah pengembangan *Solar Two* pada tahun 1993, teknologi MS-ESS telah berkembang, saat ini terdapat 44 pabrik MS-ESS yang sedang beroperasi atau dalam tahap konstruksi, serta 24 pabrik lagi dalam tahap perencanaan. Perkembangan ini dibahas lebih lanjut dalam “Pengembangan Teknologi Garam Cair di Seluruh Dunia dalam Produksi dan Penyimpanan Energi” (Ladkany *et al.*, 2018).

2.4 *Differential Scanning Calorimetry (DSC)*

Differential Scanning Calorimetry (DSC) atau kelorimeter pemindaian termal merupakan suatu alat karakterisasi termal yang berfungsi sebagai pengukur panas sampel relatif terhadap referensi. DSC adalah teknik yang digunakan untuk membandingkan perubahan suhu dari sampel dengan material referensi yang inert saat terjadi perubahan suhu yang telah diprogram. Jika tidak ada perubahan termal, suhu sampel dan referensi akan sama. Namun, ketika terjadi peristiwa termal seperti pelelehan, dekomposisi, atau perubahan struktur kristal, suhu sampel bisa lebih rendah (jika endotermik) atau lebih tinggi (jika eksotermik) dibandingkan suhu referensi.

Dalam teknik ini, sampel dipanaskan atau didinginkan, dan perubahan kapasitas panasnya dilacak sebagai perubahan aliran panas. Hal ini memungkinkan deteksi berbagai transisi termal, seperti pelelehan, transisi gelas, perubahan fase, dan kristalisasi. Karena kemampuannya dalam mendeteksi berbagai jenis transisi, DSC banyak digunakan dalam berbagai industri, termasuk farmasi, polimer, makanan, percetakan, pertanian, semikonduktor, dan elektronik.

Salah satu kelebihan utama dari DSC adalah kemudahan dan kecepatannya dalam mendeteksi transisi dalam suatu material. Jika pengguna bekerja dengan bahan polimer misalnya, transisi gelas adalah aspek penting yang harus dipahami. Selain itu, dalam bahan kristal cair, logam, obat-obatan, dan organik murni, DSC memungkinkan analisis perubahan fase atau polimorf, serta mempelajari kemurnian bahan. Pengetahuan tentang kapasitas panas dan perubahan entalpi suatu material sangat penting untuk mengevaluasi efisiensi proses industri, seperti pemrosesan atau distilasi, yang menjadikan DSC sebagai alat yang sering digunakan dalam laboratorium penelitian, pengembangan, dan kontrol kualitas.

Istilah "kalorimetri pemindaian diferensial" merujuk pada teknik pengukuran perubahan kalor yang terjadi selama pemindaian suhu, serta jenis instrumen yang digunakan. Secara historis, teknik analisis termal mulai dikembangkan secara serius pada abad ke-19 di industri keramik dengan menggunakan *Differential Thermal Analysis* (DTA). Pada masa awal, termometer ditempatkan di dalam bahan yang dipanaskan di dalam oven, namun metode ini menghadapi masalah dalam menghasilkan data yang konsisten. Masalah ini diatasi oleh S. L. Boersma dengan pengembangan termokopel tetap untuk analisis termal diferensial, yang menjadi dasar bagi desain alat DTA modern.

Pada 1960-an, Mike O'Neill dari Perkin Elmer memperkenalkan versi pertama dari DSC yang dikendalikan daya, yang mampu mengukur aliran panas secara langsung. Alat ini memungkinkan pengukuran entalpi dan kapasitas panas dengan sangat akurat, serta memberikan kontrol suhu yang presisi. Teknik ini sering disebut sebagai "DSC aliran panas". Selain itu, dengan kalibrasi yang tepat, DTA juga dapat digunakan untuk menghitung aliran panas, yang menjadikannya alternatif untuk teknik DSC.

Dalam DSC fluks panas, puncak endotermik akan terlihat mengarah ke atas, karena instrumen perlu menyuplai lebih banyak energi untuk menjaga suhu sampel dan referensi tetap sama. Sebaliknya, puncak eksotermik akan mengarah ke bawah. *The International Conference on Thermal Analysis and Calorimetry* (ICTAC) telah menetapkan standar bahwa kurva DSC harus mengikuti pola ini, namun perangkat

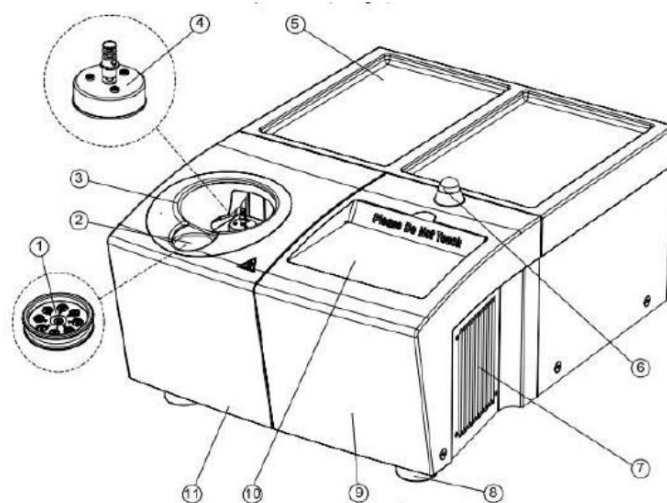
lunak modern memungkinkan pengguna untuk mengubah arah kurva sesuai kebutuhan.

Kapasitas panas spesifik (C_p) mengacu pada jumlah energi yang dapat diserap oleh suatu material per satuan kenaikan suhu. Sebagai contoh, kita bisa membayangkan sekaleng sup kacang polong pada suhu kamar yang memiliki konsistensi padat. Ketika dipanaskan, sup tersebut menjadi lebih cair dan kapasitas panasnya meningkat. Bahan apa pun akan menunjukkan peningkatan kapasitas panas seiring kenaikan suhu, dan satuan C_p biasanya dinyatakan dalam joule per gram (J/g) atau kalori per gram dalam satuan Inggris.

Ketika kapasitas panas material meningkat dengan suhu, kurva DSC dari sampel nyata akan menunjukkan kemiringan ke atas menuju suhu yang lebih tinggi. Selama proses pelelehan, ada perubahan besar pada garis dasar karena kapasitas panas material dalam fase cair lebih tinggi daripada dalam fase padat. Jika tidak ada perubahan ini, hal tersebut bisa menjadi indikasi adanya manipulasi data. Meskipun demikian, puncak transisi yang besar kadang-kadang dapat menyamarkan perbedaan kecil ini.

Meskipun C_p sering dianggap sebagai konsep akademis, memiliki pengetahuan tentang kapasitas panas sangat penting dalam aplikasi praktis. Misalnya, dalam industri polimer atau makanan, memahami C_p dapat membantu mengoptimalkan efisiensi proses produksi. C_p juga digunakan dalam perhitungan energi yang dibutuhkan untuk proses distilasi atau pemrosesan, serta dalam memprediksi energi yang diperlukan untuk mempertahankan suhu suatu material.

Sebagai standar untuk kapasitas panas, air sering digunakan karena memiliki C_p sebesar 1 J/g°C. Namun, dalam aplikasi praktis, safir lebih sering digunakan sebagai standar kalibrasi karena merupakan padatan yang sangat stabil dan tidak mudah terkontaminasi (Azhari *et al.*, 2022).



Gambar. 2.2 Modul Dasar DSC (Azhari *et al.*,2022)

Gambar 2.2 merupakan modul dasar dari DSC yang memiliki beberapa komponen. Komponen 1 merupakan nampan wadah, komponen 2 merupakan permukaan untuk baki wadah, komponen 3 merupakan pemanas, komponen 4 merupakan tutup pemanas manual, komponen 5 merupakan modul atas, komponen 6 merupakan indicator status operasi, komponen 7 merupakan saluran masuk udara, komponen 8 merupakan kaki sekrup, komponen 9 merupakan penutup kanan depan, komponen 10 merupakan penutup kaca dengan kertas catatan di bawahnya, komoponen 11 merupakan penutup kiri depan.

2.5 Pengukuran Pada *Differential Scanning Calorimetry* (DSC)

Sel pengukur pada alat DSC terdiri dari pemanas dan sensor yang berfungsi untuk mendeteksi perubahan panas. Pada sel pengukur ini, terdapat sensor sensitivitas tinggi HSS7 dengan 120 termokopel emas-emas/palladium, yang memiliki resolusi digital untuk pengukuran sinyal di bawah 0,04 W. Dengan penggunaan konverter analog/digital 24-bit, alat ini dapat membaca lebih dari 16 juta titik pengukuran. Pemanas terbuat dari perak murni dan ditekan ke isolator berbentuk piringan melalui rakitan pemanas yang menggunakan pegas. Sebuah sensor suhu Pt100 menghasilkan sinyal suhu untuk pemanas.

Sensor DSC dipasang pada piringan kaca keramik yang langsung bersentuhan termal dengan pelat pemanas perak. Dengan tambahan opsi pendinginan, panas dari pemanas dapat dipindahkan melalui resistor termal berbentuk cakram menuju unit pendingin. Unit ini terhubung ke perangkat pendingin lainnya. Aliran gas pembersih sebanyak 80 ml/menit masuk dari bagian bawah pemanas dan dipanaskan hingga mencapai suhu sel, kemudian dialirkan ke ruang sampel dan akhirnya keluar melalui lubang di tutup pemanas. Karena sel pengukur tidak kedap gas, tidak terjadi penumpukan tekanan di outletnya.

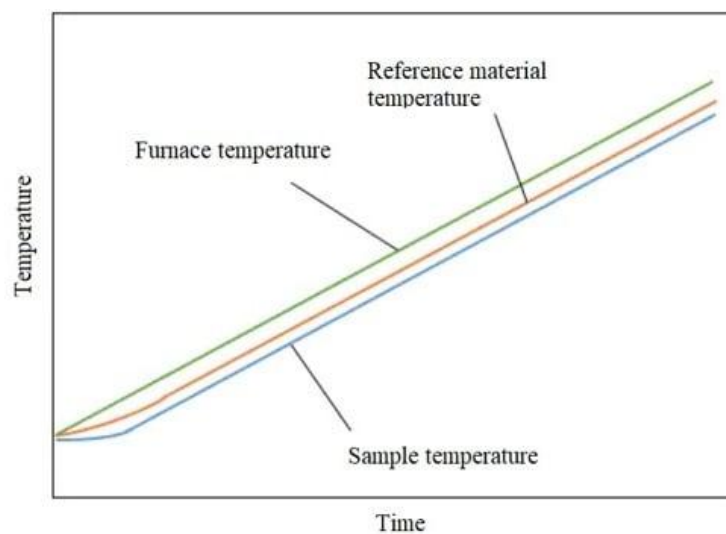
Kipas internal membantu mendinginkan sel pengukur hingga mencapai suhu kamar, meskipun terdapat opsi pendinginan tambahan seperti *Cryostat*, *IntraCooler*, dan pendinginan menggunakan nitrogen cair. Saat menggunakan pendingin ini, ruang antara pemanas dan rumah pemanas perlu dibersihkan untuk mencegah terjadinya kondensasi. Gas pembersih juga keluar bersamaan dengan gas pembersih sampel. Isolasi tambahan dipasang untuk mencegah pembekuan atau kondensasi.

Pengukuran dalam DSC didasarkan pada prinsip fluks panas Boersma, di mana data eksperimental dimasukkan ke dalam PC yang mengontrol program suhu untuk setiap segmen pengukuran. Selama pengukuran, data dikirimkan terus menerus dari modul DSC ke PC dan ditampilkan secara real-time sebagai kurva di Modul Jendela Kontrol. Dengan penguat daya 400 W, alat ini memiliki rentang pengukuran dari -100 °C hingga 700 °C, dengan laju pemanasan maksimum 250 K/menit pada suhu kamar atau 100 K/menit pada 700 °C.

Kalor endotermik adalah panas yang diserap oleh sampel, sementara kalor eksotermik adalah panas yang dilepaskan dari sampel. DSC mampu mengukur perbedaan entalpi yang diperlukan untuk meningkatkan suhu sampel dan referensi sebagai fungsi dari temperatur. Teknik ini merupakan metode termoanalitik yang mengukur perbedaan jumlah panas yang dibutuhkan untuk menaikkan suhu sampel dan referensi (Azhari *et al.*, 2022).

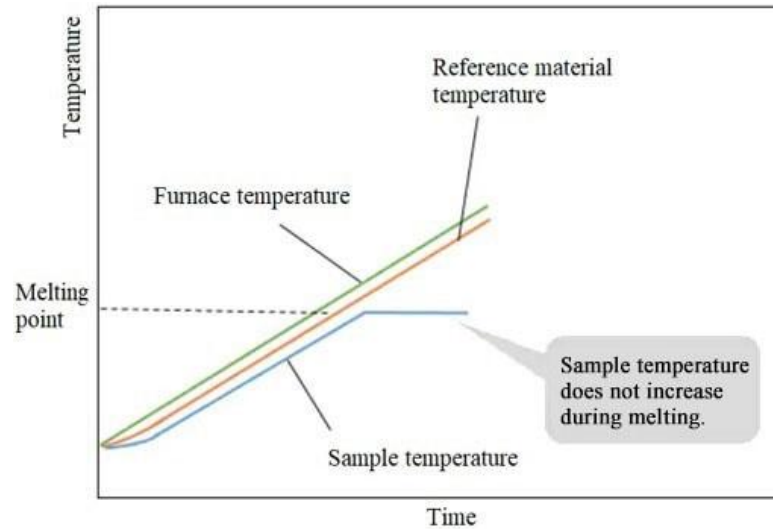
2.6 Penentuan Data Pada *Differential Scanning Calorimetry* (DSC)

Dalam pengujian DSC, sampel dan material referensi ditempatkan pada program suhu yang dikendalikan yang secara bertahap meningkatkan atau menurunkan suhu. Sampel dan referensi ditempatkan di ruang terpisah yang terisolasi untuk mengukur dan membandingkan respons termal masing-masing secara akurat. Saat suhu berubah, DSC memonitor perbedaan aliran panas antara sampel dan referensi, yang mengindikasikan karakteristik termal dari sampel.



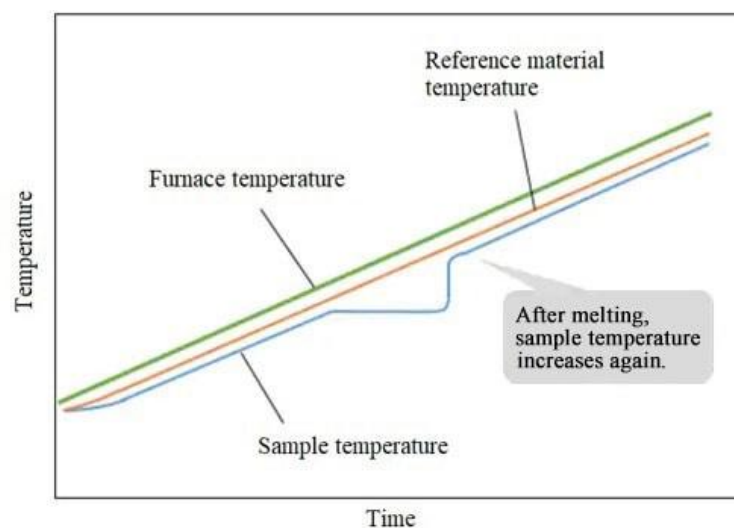
Gambar 2.3. Proses Pemanasan Sampel dan Material Referensi (Shimadzu, 2024)

Gambar 2.3 menunjukkan grafik hubungan antara suhu dan waktu pada proses pemanasan di dalam tungku, di mana suhu dari tungku, sampel, dan material referensi dipantau secara bersamaan. Kurva suhu tungku menunjukkan bahwa tungku dipanaskan terlebih dahulu dan mencapai suhu yang lebih tinggi dibandingkan dengan sampel dan material referensi. Sementara itu, kurva suhu sampel dan material referensi cenderung berada di bawah kurva suhu tungku dan memiliki gradien yang hampir sama, namun dengan posisi sedikit lebih rendah. Hal ini menunjukkan bahwa baik sampel maupun material referensi memanaskan dengan laju yang sedikit lebih lambat dibandingkan dengan suhu tungku.



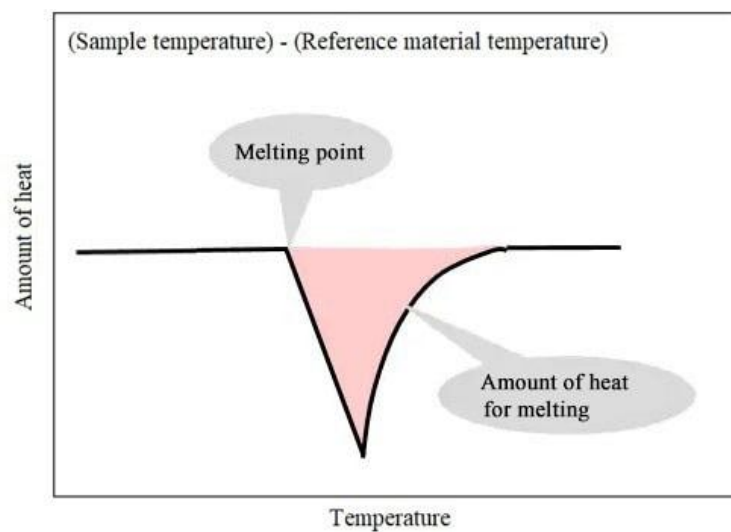
Gambar 2.4 Pencairan Sampel (Shimadzu, 2024)

Gambar 2.4 menggambarkan fenomena yang terjadi ketika suatu sampel mengalami proses pencairan. Pada awalnya, suhu sampel, suhu material referensi, dan suhu tungku mengalami peningkatan secara bersamaan. Pada titik tertentu, ketika suhu mencapai titik leleh sampel, terlihat perubahan pada kurva suhu sampel yang mendatar. Hal ini menunjukkan bahwa meskipun panas terus diberikan, suhu sampel tidak bertambah. Fenomena ini terjadi karena panas yang diterima oleh sampel digunakan untuk mengubah fase dari padat menjadi cair, bukan untuk meningkatkan suhu.



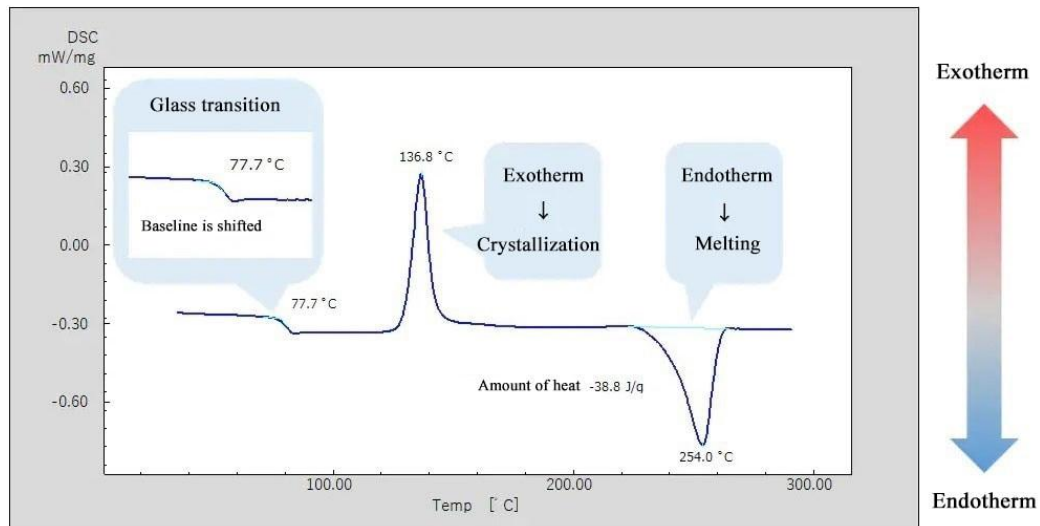
Gambar 2.5 Sampel Meleleh (Shimadzu, 2024)

Gambar 2.5 menunjukkan ketika suatu sampel telah meleleh, suhu pada suatu sampel akan naik mengikuti suhu yang digunakan pada tungku untuk proses pemanasan. Setelah proses pencairan selesai, suhu sampel kembali meningkat seiring dengan suhu tungku. Hal ini dapat terlihat pada **Gambar 2.5**, dimana setelah garis suhu sampel mendatar selama proses pencairan, garis tersebut mulai naik lagi. Ketika seluruh sampel telah beralih ke fase cair, panas yang diberikan tidak lagi digunakan untuk perubahan fase, melainkan untuk meningkatkan suhu sampel yang sudah mencair.



Gambar 2.6 Grafik Hubungan Antara Jumlah Panas dan Suhu (Shimadzu, 2024)

Gambar 2.6 menunjukkan grafik hubungan antara jumlah panas dan suhu, yang digunakan untuk menganalisis titik lebur serta jumlah panas yang diperlukan untuk proses peleburan suatu material. Pada grafik di **Gambar 2.6** menunjukkan penurunan jumlah panas pada titik tertentu, yang ditandai sebagai titik lebur. Titik lebur ini adalah suhu di mana material mulai meleleh, dan ditandai oleh penurunan yang tajam pada grafik. Area di bawah kurva yang membentuk cekungan merupakan jumlah panas yang diperlukan untuk peleburan material. Ini menunjukkan energi yang diserap oleh material selama proses perubahan fase dari padat ke cair.



Gambar 2.7 Pengukuran PET dan Makromolekul (Shimadzu, 2024)

Suatu bahan makromolekul memiliki sifat termal dan mekanik yang bervariasi dan bergantung pada riwayat termal dari berbagai sampel. **Gambar 2.7** menunjukkan hasil dari pengukuran PET dan makromolekul yang telah dipanaskan dan dipadatkan. Pada **Gambar 2.7** sumbu x menunjukkan suhu dalam °C, sedangkan sumbu y menunjukkan aliran panas dalam satuan mW/mg. Grafik ini menunjukkan tiga peristiwa utama yaitu transisi gelas (*glass transition*) merupakan peristiwa di mana suatu bahan *amorf* (tidak berstruktur kristal) berubah dari keadaan padat yang kaku menjadi keadaan yang lebih lunak atau fleksibel tanpa melalui peleburan. Pada titik ini, tidak terjadi perubahan fasa yang jelas, melainkan perubahan sifat mekanik dan termal. Dalam grafik DSC, transisi gelas terlihat sebagai perubahan mendadak pada baseline kurva, biasanya tanpa puncak, dan menunjukkan penurunan atau kenaikan kapasitas panas spesifik. Kristalisasi eksotermik (*exothermic crystallization*) adalah proses di mana suatu bahan berubah dari keadaan amorf atau semi-kristalin menjadi struktur kristalin yang lebih teratur. Proses ini melepaskan energi panas karena molekul-molekul menyusun diri dalam formasi yang lebih stabil. Dalam grafik DSC, peristiwa ini ditandai dengan munculnya puncak mengarah ke bawah (untuk sistem eksotermik) karena pelepasan panas ke lingkungan. Peleburan endotermik (*endothermic melting*) adalah proses perubahan dari padat ke cair yang membutuhkan energi panas. Dalam peristiwa ini, bahan menyerap panas untuk memutuskan ikatan antar molekul dalam fasa padat,

sehingga bisa berpindah ke fasa cair. Dalam kurva DSC, peleburan terlihat sebagai puncak besar mengarah ke atas (untuk sistem endotermik), menunjukkan penyerapan energi. Ini merupakan titik penting dalam karakterisasi material karena menunjukkan suhu leleh aktual dari bahan tersebut.

Dari **Gambar 2.7** dapat disimpulkan bahwa pada suhu sekitar 77,7 °C sampel mengalami transisi kaca, yang ditandai dengan pergeseran garis dasar. Transisi ini menunjukkan perubahan sifat material dari kondisi padat yang kaku menjadi kondisi yang lebih elastis, mirip dengan kaca. Titik beku dari sampel yang ditampilkan pada **Gambar 2.7** berada di suhu 136,8 °C. Titik beku terjadi saat puncak eksotermik terbentuk, dimana suatu material melepaskan energi saat membentuk struktural kristal. Titik leleh dari sampel yang ditampilkan pada **Gambar 2.7** berada di suhu 254,0 °C. Titik leleh terjadi saat terbentuknya puncak endotermik yang menunjukkan proses peleburan suatu material, dimana energi diserap untuk mengubah material dari padat ke cair.

2.7 Penentuan Data Kapasitas Panas Spesifik Pada *Differential Scanning Calorimetry* (DSC)

Kapasitas panas spesifik adalah sifat termofisik fundamental yang menunjukkan kemampuan suatu material dalam menyerap energi panas saat mengalami perubahan suhu. Pengukuran kapasitas panas spesifik penting dalam berbagai bidang, terutama dalam desain material termal, seperti garam cair untuk sistem pendingin di reaktor nuklir. DSC bekerja berdasarkan prinsip membandingkan aliran panas yang diberikan kepada sampel dan referensi selama proses pemanasan atau pendinginan. Sampel dan referensi ditempatkan dalam wadah terpisah dan dipanaskan dengan laju pemanasan ($\Delta T/\Delta t$) yang konstan. Ketika sampel mengalami kenaikan suhu, transisi fasa, atau perubahan, perangkat mencatat jumlah panas yang diperlukan untuk menjaga kestabilan suhu antara sampel dan referensi. Perbedaan aliran panas ini memberikan informasi yang digunakan untuk menentukan C_p material, serta parameter termal lainnya seperti titik leleh (T_m) dan suhu transisi gelas (T_g).

Penentuan data C_p menggunakan DSC dimulai dengan kalibrasi instrumen, selanjutnya sampel dengan massa tertentu ditempatkan dalam wadah khusus, kemudian dipanaskan pada laju pemanasan yang konstan. Data aliran panas yang diperoleh selama pemanasan dicatat dan digunakan untuk menghitung kapasitas panas spesifik dengan rumus:

$$C_p = \frac{q}{m \Delta T} \quad (2.1)$$

Dengan q adalah aliran panas yang diukur (mJ), m adalah massa sampel (mg), dan ΔT adalah kenaikan suhu ($^{\circ}\text{C}$).

Akurasi pengukuran C_p sangat bergantung pada beberapa faktor. Laju pemanasan harus dijaga konstan untuk mencegah ketidakstabilan data. Selain itu, massa sampel harus disesuaikan agar cukup besar untuk menghasilkan sinyal yang signifikan namun tidak terlalu besar sehingga mengurangi sensitivitas alat. Wadah sampel (*crucible*) juga memegang peranan penting, karena material dan konduktivitas termalnya memengaruhi transfer panas selama pengujian.

III. METODE PENELITIAN

3.1 Waktu dan Tempat

Penelitian ini bertempat di Laboratorium Fisika Material Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Lampung untuk persiapan pembuatan sampel. Karakterisasi menggunakan *Differential Scanning Calorimetry* dilakukan di Laboratorium Terpadu Universitas Sumatera Utara. Penelitian ini dilaksanakan pada tanggal 1 Januari 2025 sampai dengan 1 April 2025.

3.2 Alat dan Bahan

Alat yang digunakan dalam penelitian ini yaitu sebagai berikut.

1. Neraca analitik

Neraca analitik adalah alat laboratorium yang digunakan untuk mengukur massa bahan dengan akurasi tinggi, biasanya dalam kisaran sub-miligram. Alat ini dapat mengukur massa dengan ketelitian hingga 0,0001 gram. Neraca analitik pada penelitian ini digunakan untuk menimbang sampel sesuai dengan komposisi yang akan digunakan.

2. Mortar dan alu

Mortar dan alu digunakan untuk menghaluskan sampel serta membuat sampel menjadi homogen.

3. Botol

Botol digunakan untuk menyimpan sampel yang digunakan dalam penelitian ini.

4. DSC (*Differential Scanning Calorimetry*)

Differential Scanning Calorimetry adalah teknik analisis termal yang digunakan untuk mengukur perubahan energi yang terjadi pada sampel saat dipanaskan atau didinginkan. Teknik ini sangat berguna dalam menentukan sifat termal seperti titik lebur, titik didih, dan transisi fase. Pada penelitian ini DSC digunakan untuk uji karakterisasi sampel yang bertujuan untuk menghasilkan data titik beku, transisi gelas, dan kapasitas panas spesifik dari sampel.

Bahan yang digunakan dalam penelitian ini yaitu

1. NaNO_2 (Natrium Nitrit)

Natrium Nitrit adalah senyawa anorganik yang berbentuk bubuk kristalin berwarna putih hingga kekuningan, sangat larut dalam air dan memiliki titik leleh pada suhu $271\text{ }^{\circ}\text{C}$. Pada penelitian ini menggunakan NaNO_2 dengan kemurnian 98%.

2. NaNO_3 (Natrium Nitrat)

Natrium Nitrat adalah senyawa kimia yang berbentuk kristal putih dan larut dalam air. Senyawa ini juga dikenal sebagai garam nitrat dan memiliki titik leleh pada suhu $308\text{ }^{\circ}\text{C}$. Pada penelitian ini menggunakan NaNO_3 dengan kemurnian 99%.

3. KNO_3 (Kalium Nitrat)

Kalium Nitrat adalah senyawa kimia yang juga dikenal sebagai garam potasium dari asam nitrat dan memiliki titik leleh pada suhu $334\text{ }^{\circ}\text{C}$. Pada penelitian ini menggunakan KNO_3 dengan kemurnian 99%.

3.3 Prosedur Penelitian

Prosedur penelitian ini dilakukan menggunakan beberapa tahapan yaitu:

3.3.1 Penentuan Komposisi Variasi Sampel

Penentuan komposisi variasi sampel dimulai dari mencari titik leleh dari masing-masing garam. NaNO_2 memiliki titik leleh pada suhu 271°C , NaNO_3 memiliki titik leleh pada suhu 308°C , KNO_3 memiliki titik leleh pada suhu 334°C . setelah mengetahui titik leleh dari masing-masing garam, selanjutnya mencari informasi dari jurnal mengenai ketiga garam tersebut. Campuran garam NaNO_2 , NaNO_3 , dan KNO_3 atau dapat disebut dengan HITEC dapat memiliki titik leleh pada suhu 142°C dengan komposisi NaNO_2 40%, NaNO_3 7%, KNO_3 53%, sedangkan pada penelitian Wang *et al.*, 2024 campuran garam Na_2SO_4 1.69%, NaNO_3 42.01%, KNO_3 56.30% memiliki titik leleh pada suhu 220.97°C . Dari dua penelitian tersebut maka diperoleh 4 variasi sampel untuk penelitian ini. Sampel 1 NaNO_2 35%, NaNO_3 10%, KNO_3 55%, sampel 2 komposisi NaNO_2 30%, NaNO_3 15%, KNO_3 55%, sampel 3 komposisi NaNO_2 40%, NaNO_3 5%, KNO_3 55%, dan sampel 4 komposisi NaNO_2 32%, NaNO_3 18%, KNO_3 50%.

3.3.2 Preparasi Sampel

Penelitian ini dilakukan dengan mencampurkan garam cair NaNO_2 , NaNO_3 , KNO_3 , langkah-langkah preparasi pada penelitian ini yaitu sebagai berikut:

- a) Garam NaNO_2 dengan kemurnian 98%, NaNO_3 dengan kemurnian 99%, KNO_3 dengan kemurnian 99% disiapkan sebagai bahan penelitian.
- b) Garam NaNO_2 , NaNO_3 , KNO_3 dioven dengan suhu 100°C selama 60 menit. Hal ini dilakukan untuk menghilangkan kadar air yang terkandung di dalam masing-masing garam. Garam yang telah dioven dimasukkan ke dalam plastik *ziplock* berukuran 6×8 cm, ditunjukkan pada **Gambar 3.1**.



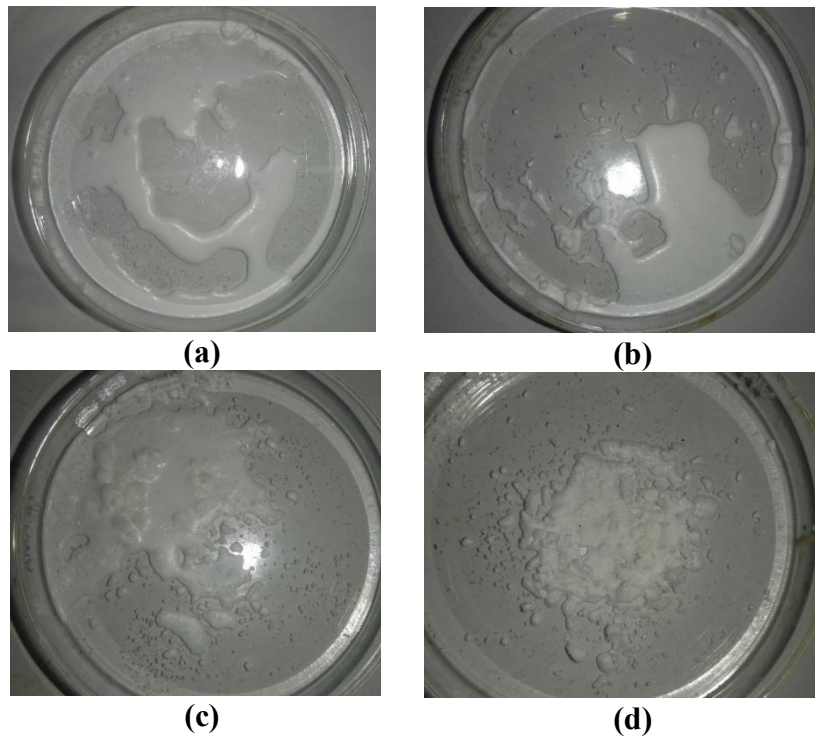
Gambar 3.1 Garam (a) NaNO_2 , (b) NaNO_3 , (c) KNO_3

- c) Garam ditimbang dengan komposisi yang telah ditentukan, pada penelitian ini terdapat 4 variasi sampel dengan masing-masing sampel memiliki berat 5 gram. Komposisi garam pada masing-masing sampel dapat dilihat pada **Tabel 3.1**.

Tabel 3.1 Komposisi Garam Pada Masing-Masing Sampel

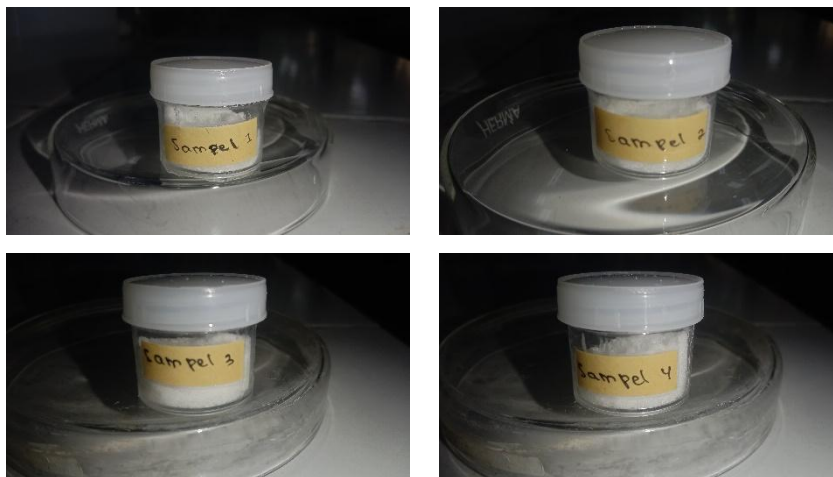
	NaNO_2	NaNO_3	KNO_3
Sampel 1	35% (1,75 g)	10% (0,5 g)	55% (2,75 g)
Sampel 2	30% (1,5 g)	15% (0,75 g)	55% (2,75 g)
Sampel 3	40% (2 g)	5% (0,25 g)	55% (2,75 g)
Sampel 4	32% (1,6 g)	18% (0,9 g)	50% (2,5 g)

- d) Sampel dihaluskan dengan menggunakan mortal dan alu. Hal ini dilakukan supaya garam menjadi homogen.
- e) Sampel dioven dengan suhu $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ selama 30 menit. Hal ini dilakukan untuk mengurangi kadar air yang terkandung di dalam sampel campuran garam cair. Hasil sampel yang telah dioven ditunjukkan pada **Gambar 3.2**.



Gambar 3.2 Sampel yang telah dioven (a) Sampel 1 (35% NaNO_2 , 10% NaNO_3 , 55% KNO_3), (b) Sampel 2 (30% NaNO_2 , 15% NaNO_3 , 55% KNO_3), (c) Sampel 3 (40% NaNO_2 , 5% NaNO_3 , 55% KNO_3), (d) Sampel 4 (32% NaNO_2 , 18% NaNO_3 , 50% KNO_3)

- f) Sampel yang telah dioven dihaluskan kembali menggunakan mortal dan alu, kemudian sampel dimasukkan ke dalam wadah kedap udara dengan ukuran 10 ml, ditunjukkan pada **Gambar 3.3**.



Gambar 3.3 Sampel yang telah dimasukkan ke dalam wadah

3.3.3 Karakterisasi Sampel Menggunakan DSC

Karakterisasi sampel menggunakan DSC dimulai dengan sampel ditimbang dengan berat 20 mg di wadah *crucible aluminium*, kemudian sampel yang telah ditimbang dan dimasukkan ke *crucible aluminium* dimasukkan ke dalam ruang pengukuran DSC. Selanjutnya, parameter uji pada DSC diatur sesuai kebutuhan pengujian dimana *range suhu* yang digunakan yaitu 30 °C-400 °C untuk sampel 1 dan 2 dan 30 °C-325 °C, *heating rate* 5 °C/menit-10 °C/menit, serta menggunakan gas nitrogen dengan *flow gas* 50 ml/menit, setelah itu alat DSC dijalankan untuk melakukan pengukuran pada sampel.

3.3.4 Pengolahan data yang diperoleh dari karakterisasi DSC

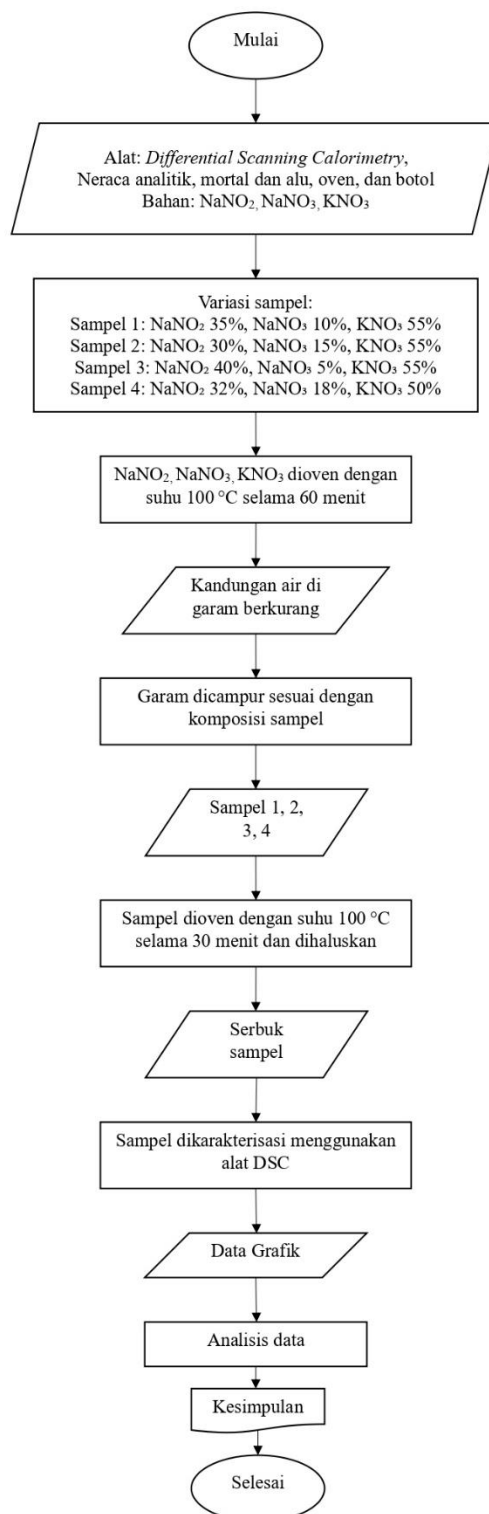
Interpretasi kurva termogram hasil pengujian DSC dilakukan dengan menganalisis hubungan antara suhu dan perbedaan energi yang terdeteksi. Titik leleh diidentifikasi pada suhu dengan peningkatan energi yang signifikan, menandakan perubahan fase dari padat ke cair. Transisi gelas diperoleh dari awal terjadinya efek termal pada saat pengukuran. Kapasitas panas spesifik dihitung dengan mengamati area di bawah kurva yang terkait dengan proses pemanasan atau pendinginan. Data yang diperoleh kemudian dianalisis untuk mengungkap informasi termofisik sampel, termasuk titik leleh, transisi gelas, dan kapasitas panas spesifik dalam rentang suhu tertentu. Hasil dari karakterisasi DSC akan berupa grafik yang memiliki *Baseline Type* yang menunjukkan efek termal yang terjadi pada saat karakterisasi DSC. *Baseline Type* yang dihasilkan dari karakterisasi DSC yaitu sebagai berikut (Adzari *et al.*, 2022):

- a) *Integral* pada hasil karakterisasi DSC menunjukkan jumlah energi yang terlibat dalam suatu transisi, dimana semakin besar nilai absolutnya maka semakin besar pula energi yang diserap atau dilepaskan selama transisi.
- b) *Normalized* pada hasil karakterisasi DSC menunjukkan integral yang sudah dinormalisasi terhadap massa sampel.

- c) *Onset* pada hasil karakterisasi DSC merupakan titik awal transisi, onset menunjukkan saat transisi mulai terjadi dimana perubahan entalpi mulai terdeteksi.
- d) *Peak* pada hasil karakterisasi DSC merupakan puncak transisi, *peak* menunjukkan suhu dimana laju perubahan energi paling tinggi, pada titik leleh *peak* merupakan titik dimana sampel menyerap energi paling banyak dan pelelehan terjadi paling intens.
- e) *Endset* pada hasil karakterisasi DSC merupakan titik akhir transisi, serta suhu dimana transisi dianggap selesai dan kurva kembali ke *baseline* normal.
- f) *Left bl Limit* pada hasil karakterisasi DSC menunjukkan titik referensi sebelum transisi termal mulai terjadi, DSC menggunakan titik ini untuk menghitung energi yang terserap atau dilepaskan.
- g) *Right bl Limit* pada hasil karakterisasi DSC merupakan titik referensi setelah transisi termal selesai, titik ini digunakan bersama *Left bl Limit* untuk menentukan area dibawah kurva DSC yang menunjukkan jumlah total energi yang terlibat dalam transisi.

3.4 Diagram Alir

Diagram alir pada penelitian ini ditunjukkan pada **Gambar 3.4**.



Gambar 3.4 Diagram Alir Penelitian

V. KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan penelitian yang telah dilaksanakan, dapat diambil beberapa kesimpulan berikut:

1. Titik leleh dipengaruhi oleh komposisi NaNO_2 , NaNO_3 , dan KNO_3 , komposisi terbaik yaitu sampel 4 (NaNO_2 32%, NaNO_3 18%, KNO_3 50%) dengan titik leleh 217,00 °C dan komposisi terburuk yaitu sampel 1 (NaNO_2 35%, NaNO_3 10%, KNO_3 55%) dengan titik leleh 134,05 °C. Peningkatan titik leleh dipengaruhi oleh peningkatan kandungan NaNO_3 , penurunan titik leleh disebabkan oleh peningkatan NaNO_2 .
2. Transisi gelas terbesar dihasilkan oleh sampel 1 (NaNO_2 35%, NaNO_3 10%, KNO_3 55%) yaitu 35,95 °C, transisi gelas terendah dihasilkan oleh sampel 2 (NaNO_2 30%, NaNO_3 15%, KNO_3 55%) yaitu 32,04 °C. Suhu transisi gelas tinggi dipengaruhi oleh tingginya kandungan NaNO_2 , suhu transisi gelas rendah dipengaruhi oleh tingginya kandungan NaNO_3 .
3. Kapasitas panas spesifik terbaik yaitu pada sampel 4 yaitu 0,85 J/g°C hingga 0,90 J/g°C. Kapasitas panas spesifik yang dihasilkan lebih sempit yang menunjukkan kestabilan karakteristik termal yang lebih baik daripada sampel yang lain.

5.2 Saran

Saran untuk penelitian selanjutnya yaitu melakukan optimasi komposisi campuran garam NaNO_2 , NaNO_3 , dan KNO_3 secara lebih rinci guna memperoleh titik leleh yang sesuai dengan suhu operasi reaktor serta kapasitas panas spesifik yang tinggi

dan stabil. Penelitian lanjutan juga sebaiknya mencakup pengujian sifat-sifat termal lainnya, seperti viskositas dan konduktivitas termal, untuk mendukung penilaian terhadap kinerja garam sebagai fluida pendingin. Uji kestabilan pada suhu tinggi dalam waktu yang lebih lama juga perlu dilakukan guna mengetahui ketahanan termal campuran garam dalam kondisi mendekati operasi reaktor sebenarnya.

DAFTAR PUSTAKA

- Abram, T., 2002. *A Technology Roadmap for Generation-IV Nuclear Energy System*, United States: United States Departement of Energy.
- Ahied, M. 2015. Efisiensi Material Pada Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir LWR (Light Water Reactor) Dan PHWR (Pressurized Heavy Water Reactor). *Jurnal Pena Sains*, 2(1), 1-6.
- Azhari., Karolina, R., Ritonga, S, I. 2022. *Karakterisasi Termal Material Menggunakan Differential Scanning Calorimetry (DSC)*. PT Nasya Expanding Management. Jawa Tengah.
- Benes, O., Koning, J.M. 2012. Molten Salt Reactor Fuel and Coolant. *Elsevier Ltd. All rights reserved*, 356-389.
- Bradshaw, R. W., Dawson, D. B., De la Rosa, W., Gilbert, R., Goods, S. H., Hale, M. J., Jacobs, P., Jones, S. a., Kolb, G. J., Pacheco, J. E., Prairie, M. R., Reilly, H. E., Showalter, S. K., & Vant-Hull, L. L. 2002. *Final Test and Evaluation Results from the Solar Two Project*. Sandia National Laboratories. Callifornia.
- Chen, S. 2017. *China Hopes Cold War Nuclear Energy Tech Will Power Warships, Drones*. South China Morning Post. [Online]
Available at: <https://www.scmp.com/news/china/society/article/2122977/china-hoes-cold-war-nuclear-energy-tech-will-power-warships>
[Diakses 20 Oktober 2024]
- Chen, X., Wu, Y., Zhang, L., Wang, X., Ma, C. 2018. Thermophysical Properties of Molten Salt Mixtures for High-temperature Thermal Energy Storage. *Journal Solar Energy Materials and Solar Cells*, 191, 209-217.
- Conca, J. 2017. *A Successful Nuclear Step for New Molten Salt Reactors*. [Online]
Available at: <https://www.forbes.com/sites/jamesconca/2017/11/10/a-successful-nuclear-step-for-new-molten-salt-reactors/#267735a67e32>
[Diakses 20 Oktober 2024]

- Contor, S., Cooke, J.W., Dworkin, A.S., Robbins, G.D., Thoma, R.E., Watson, G.M. 1968. *Physical Properties of Molten Salt Reactor Fuel, Coolant and Flush Salts*. ORNL-TM-2316.
- Dwijayanto, R, A, P., 2015. *Molten Salt Reactor: Prospek Cerah Reaktor Maju Berbahan Bakar Thorium*. Jogjakarta: Universitas Gajah Mada.
- Dwijayanto, R, A, P., Harto, A, W., 2024. Neutronic Design Modification of Passive Compact-Molten Salt Reactor. *Atom Indonesia*, 50(1), 9-17.
- Elsheikh, B. M. 2013. Safety assessment of molten salt reactors in comparison with light water reactors. *Journal of Radiation Research and Applied Sciences*, 6(2), 63–70.
- Harto, A. W. 2011. Reaktor Innovative Molten Salt (IMSR) Dengan Sistem Keselamatan Pasif Menyeluruh. *Jurnal Teknik Reaktor Nuklir* 13(1), 10–20.
- Hoglund, B. 1997. *What Are Molten Salts?* [Online]
Available at: <http://moltenSalt.org/whatIsMoltenSalt.html>.
[Diakses 20 Oktober 2024]
- IAEA. 2023. *Status of Molten salt Reactor Technology*, Austria: International Atomic Energy Agency.
- IEA. 2021. *Net Zero by 2050: A Roadmap for the Global Energy Sector*, Prancis: International Energy Agency.
- Jeong, Y. S., Seo, S. Bin, & Bang, I. C. 2018. Natural convection heat transfer characteristics of molten salt with internal heat generation. *International Journal of Thermal Sciences*, 129, 181–192.
- Kudariyawar, J. Y., Srivastava, A.K., Vaidya, A.M., Maheshwari, N. K., and Satyamurthy, P. 2016. Computational and experimental investigation of steady state and transient characteristics of molten salt natural circulation loop. *Applied Thermal Engineering*, 99, 560-571.
- Kuntoro, I. 2023. *Keselamatan Reaktor Nuklir: Reaktor Serba Guna G.A Siwabesy (RSG-GAS)*. Penerbit BRIN. Jakarta.
- Ladkany, S., Culbreth, W., and Loyd, N. 2018. Worldwide Molten Salt Technology Developments in Energy Production and Storage. *Journal of Energy and Power Engineering*, 12(2018), 533-544.

- LeBlanc, D. 2010. Molten salt reactors: A new beginning for an old idea. *Nuclear Engineering and Design*, 240(6), 1644–1656.
- Limbaran, B. G., Harto, A. W., & Sihana, S. 2021. Analisis Sistem Pendingin Pasif Pasca Shutdown Dengan Skenario Severe Accident pada Innovative Molten Salt Reactor (IMSR). *Teknofisika*, 24(1), 29–34.
- Martin, R. 2016. *Fail-Safe Nuclear Power*. MIT Technology Review. [Online] Available at: <https://www.technologyreview.com/s/602051/fail-safe-nuclear-power/>. [Diakses 20 Oktober 2024]
- Mosher, D. 2017. *A Forgotten War Technology Could Safely Power Earth for Millions of years. Here's Why We Aren't Using It*. [Online] Available at: <http://www.businessinsider.com/thorium-molten-salt-reactors-sorensen-lftr-2017-2>. [Diakses 20 Oktober 2024]
- Noha, I. S., & Widiharto, A. 2012. Analisis Pengendalian Daya Reaktor PSMSR Dengan Pengaturan Laju Alir Pendingin. *Jurnal Teknik Reaktor Nuklir*, 14(2), 91-107.
- Ouyang, Z., *et al* . 2021. Corrosion Behavior of Alloys in Molten Salt Systems for Nuclear Applications. *Corrosion Science*, 179, 109-115.
- Perry, A. M., & Weinberg, A. M. 1972. Thermal Breeder Reactors. *Annual Review of Nuclear Science*, 22(1), 317–354.
- Roper, R., Harkema, M., Sabharwall, P., Riddle, C., Chisholm, B., Day, B., & Marotta, P. 2022. molten salt for advanced energy applications: a review. *Annals of Nuclear Energy*, 169, 108924.
- Sabharwall, P., Aufiero, M., & Fratoni, M. 2019. Heat transfer and computational fluid dynamics for molten salt reactor technologies. Samaan Ladkany, William Culbreth, & Nathan Loyd. 2018. Molten Salts and Applications III: Worldwide Molten Salt Technology Developments in Energy Production and Storage. *Journal of Energy and Power Engineering*, 12(11), 533–544.
- Suhaemi, T. 2018. Prospek Desain Reaktor Berbahan Bakar Cair Molten Salt Reactor. *Prosiding Seminar Nasional Teknoka*, 3(2502), 64.

- Williams, S. 2017. *How Molten Salt Reactors Might Spell a Nuclear Energy Revolution*. [Online]
Available at: <https://www.zmescience.com/ecology/what-is-molten-salt-reactor-424343/>.
[Diakses 20 Oktober 2024]
- Wu, Y., Cai, C., Wang, K., Jiao, X., Yang, Q., He, Z., and Chen, K. 2020. Experimental and numerical studies on natural circulation behavior of heat exchanger for molten salt loop. *Journal of Nuclear Science and Technology*, 57(3), 236-242.