

SKRIPSI SARJANA TERAPAN
ANALISIS TERMAL PENINGKATAN SIFAT PCM $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$
BERBASIS CANGKANG TELUR MELALUI PENAMBAHAN
AGEN NUKLEASI $\text{SrCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, NANOPARTIKEL GAMMA
ALUMINA ($\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$), DAN SURFAKTAN CTAB



Disusun sebagai salah satu syarat untuk memperoleh
Gelar Sarjana Terapan Program Studi Teknologi Rekayasa Manufaktur

Oleh:

Alawiah

NIM : 1526422021

UNIVERSITAS NEGERI JAKARTA
FAKULTAS TEKNIK
PROGRAM STUDI SARJANA TERAPAN
TEKNOLOGI REKAYASA MANUFAKTUR
2026

ABSTRAK

Kebutuhan energi global yang meningkat mendorong pengembangan *Thermal Energy Storage* (TES) berbasis *Phase Change Material* (PCM). Kalsium Klorida Heksahidrat ($\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) merupakan PCM anorganik yang memiliki potensi untuk aplikasi suhu rendah ($27\text{--}30^\circ\text{C}$), namun memiliki kendala *supercooling* dan segregasi fasa yang dapat menurunkan kapasitas penyimpanan energi secara bertahap akibat siklus pemanasan dan pendinginan berulang.

Penelitian ini bertujuan mensintesis $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ menggunakan limbah cangkang telur ayam sebagai bahan baku alternatif yang ramah lingkungan dan bernilai ekonomis melalui reaksi dengan HCl 4%. Kemudian sifat termal material ditingkatkan melalui penambahan tiga jenis aditif, yaitu Gamma Alumina ($\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$) sebanyak 1 wt% sebagai peningkat konduktivitas termal, surfaktan Strontium Klorida Heksahidrat ($\text{SrCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) sebanyak 1 wt% untuk menekan *supercooling*, dan *Cetyl Trimethyl Ammonium Bromide* (CTAB) sebanyak 1 wt% sebagai penstabil dispersi nanopartikel. Karakterisasi dilakukan menggunakan *Fourier Transform Infrared Spectroscopy* (FTIR), *X-Ray Diffraction* (XRD), dan *Differential Scanning Calorimetry* (DSC).

Hasil karakterisasi FTIR dan XRD mengkonfirmasi keberhasilan setiap tahap sintesis, mulai dari konversi CaCO_3 cangkang telur menjadi $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ hingga terbentuknya fasa $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, serta membuktikan bahwa CTAB berhasil melapisi permukaan $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$. Hasil pengujian DSC menunjukkan bahwa nanokomposit PCM yang dihasilkan memiliki kalor laten sebesar $156,7 \text{ J/g}$ dengan rentang peleburan sangat sempit (sekitar 3°C) dan kurva DSC berpuncak tunggal, yang mengindikasikan tidak terjadinya segregasi fasa. Temuan ini membuktikan bahwa limbah cangkang telur layak digunakan sebagai sumber bahan baku PCM jenis $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ dan mengonfirmasi bahwa kombinasi $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$, $\text{SrCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, dan CTAB efektif meningkatkan kestabilan fasa serta homogenitas termal sistem. Dengan demikian, nanokomposit PCM $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ -Telur berpotensi diterapkan sebagai material PCM yang andal untuk aplikasi bangunan hemat energi sekaligus mengubah limbah cangkang telur menjadi produk bernilai ekonomis.

Kata Kunci: Cangkang Telur, DSC, FTIR, Kalsium Klorida Heksahidrat, PCM, XRD.

ABSTRACT

The increasing global energy demand has driven the development of Thermal Energy Storage (TES) systems based on Phase Change Materials (PCMs). Calcium chloride hexahydrate ($\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) is a promising inorganic PCM for low-temperature applications (27–30°C) due to its high latent heat of fusion. However, its practical application is limited by two major drawbacks, namely supercooling and phase segregation, which gradually reduce its energy storage capacity during repeated heating and cooling cycles.

This study aimed to synthesize $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ using waste chicken eggshells as an environmentally friendly and cost-effective alternative calcium source through a reaction with 4% hydrochloric acid (HCl). The thermal performance of the synthesized material was subsequently enhanced by incorporating three additives: 1 wt% gamma alumina ($\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$) as a thermal conductivity enhancer, 1 wt% strontium chloride hexahydrate ($\text{SrCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) as a nucleating agent to suppress supercooling, and 1 wt% cetyltrimethylammonium bromide (CTAB) as a surfactant to stabilize nanoparticle dispersion. The synthesized materials were characterized using Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR), X-ray Diffraction (XRD), and Differential Scanning Calorimetry (DSC).

The FTIR and XRD analyses confirmed the successful completion of each synthesis stage, from the conversion of eggshell-derived CaCO_3 into $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ to the formation of the $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ phase. The results also verified that CTAB successfully coated the surface of $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ nanoparticles. DSC analysis revealed that the resulting PCM nanocomposite exhibited a latent heat of 156.7 J/g, a very narrow melting range of approximately 3°C, and a single-peak DSC curve, indicating the absence of phase segregation. These findings demonstrate that waste chicken eggshells are a feasible raw material for the production of $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ -based PCMs and confirm that the combined use $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$, $\text{SrCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, and CTAB effectively improves the phase stability and thermal homogeneity of the system. Therefore, the eggshell-derived $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ PCM nanocomposite shows strong potential as a reliable thermal energy storage material for energy-efficient building applications while simultaneously converting eggshell waste into a value-added product.

Keywords: Calcium Chloride Hexahydrate, DSC, Eggshell, FTIR, PCM, XRD.

LEMBAR PERSETUJUAN PEMBIMBING TUGAS AKHIR

BENTUK: SKRIPSI

LEMBAR PERSETUJUAN PEMBIMBING TUGAS AKHIR

BENTUK: SKRIPSI

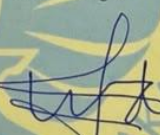
Nama Mahasiswa : Alawiah
NIM : 1526422021
Judul Penelitian : Analisis Termal Peningkatan Sifat PCM $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$
Berbasis Cangkang Telur Melalui Penambahan Agen
Nukleasi $\text{SrCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, Nanopartikel Gamma Alumina
($\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$) dan Surfaktan CTAB

ini telah disetujui dan dinyatakan memenuhi syarat untuk diajukan dalam ujian tugas akhir.

Jakarta, Juli 2026
Pembimbing I

Pembimbing II


Dr. Dyah Arum Wulandari, M.T.
NIDN. 0001087704


Dr. Wardoyo, M.T.
NIDN. 0018087904

LEMBAR PENGESAHAN TUGAS AKHIR

BENTUK : SKRIPSI

LEMBAR PENGESAHAN TUGAS AKHIR BENTUK : SKRIPSI SARJANA TERAPAN

Nama Mahasiswa : Alawiah
NIM : 1526422021
Program Studi/Fakultas : Sarjana Terapan Teknologi Rekayasa
Manufaktur/Teknik
Judul Penelitian : Analisis Termal Peningkatan Sifat PCM
 $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ Berbasis Cangkang Telur Melalui
Penambahan Agen Nukleasi $\text{SrCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$,
Nanopartikel Gamma Alumina ($\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$) dan
Surfaktan CTAB

Ini telah dipertahankan dihadapan dewan penguji dan dinyatakan *Lulus/Tidak Lulus* *. Ujian Tugas Akhir oleh Tim Penguji pada Tanggal 22 Juli 2026

Pembimbing I Dr. Dyah Arum Wulandari, M.T.
NIDN. 0001087704

Pembimbing II Dr. Wardoyo, M.T.
NIDN. 0018087904

Ketua Lukman Arhami, S.Pd., M.T.
NIDN. 0003017903

Sekretaris Reza Febriano Armas, S.Pd., M.T.
NIDN. 0308029801

Penguji Ahli Drs. Syamsuir, M.T.
NIDN. 0015056709

Mengetahui,
Dekan/Direktur
Fakultas Teknik



Prof. Dr. Neneng Siti Silfi Ambarwati, S.Si, Apt., M.Si.
NIDN. 0029027204

Koordinator Program
Studi Sarjana Terapan
Teknologi Rekayasa
Manufaktur

Dr. Wardoyo, M.T.
NIDN. 0018087904

SURAT PERNYATAAN KEASLIAN KARYA

SURAT PERNYATAAN KEASLIAN KARYA

Nama Mahasiswa : Alawiah
NIM : 1526422021
Program Studi : STr Teknologi Rekayasa Manufaktur
Fakultas : Teknik
Judul TA : Analisis Termal Peningkatan Sifat PCM $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$
Berbasis Cangkang Telur Melalui Penambahan Agen
Nukleasi $\text{SrCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, Nanopartikel Gamma Alumina
($\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$) dan Surfaktan CTAB

Menyatakan bahwa Tugas Akhir ini beserta seluruh isinya adalah benar-benar karya saya sendiri. Saya tidak melakukan penjiplakan atau pengutipan dengan cara-cara yang tidak sesuai dengan etika ilmu yang berlaku dalam masyarakat keilmuan. Atas pernyataan ini, saya siap menanggung risiko/sanksi apabila di kemudian hari ditemukan adanya pelanggaran etika keilmuan atau ada klaim dari pihak lain terhadap keaslian karya tulis ilmiah ini.

Jakarta, 29 Juni 2026

Yang menyatakan,



Alawiah

NIM. 1526422021



KEMENTERIAN PENDIDIKAN TINGGI, SAINS DAN TEKNOLOGI
UNIVERSITAS NEGERI JAKARTA
PERPUSTAKAAN DAN KEARSIPAN

Jalan Rawamangun Muka Jakarta 13220
Telepon/Faksimili: 021-4894221
Laman: lib.unj.ac.id

LEMBAR PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI
KARYA ILMIAH UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS

Sebagai sivitas akademika Universitas Negeri Jakarta, yang bertanda tangan di bawah ini, saya:

Nama : Alawiah
NIM : 1526422021
Fakultas/Prodi : Teknik/D4 Teknologi Rekayasa Manufaktur
Alamat email : alawiah2123@gmail.com

Demi pengembangan ilmu pengetahuan, menyetujui untuk memberikan kepada Perpustakaan dan Kearsipan Universitas Negeri Jakarta, Hak Bebas Royalti Non-Eksklusif atas karya ilmiah:

☒ Skripsi ☐ Tesis ☐ Disertasi ☐ Lain-lain (.....)

yang berjudul :

“Analisis Termal Peningkatan Sifat PCM $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ Berbasis Cangkang Telur Melalui Penambahan Agen Nukleasi $\text{SrCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, Nanopartikel Gamma Alumina ($\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$) dan Surfaktan CTAB”

Dengan Hak Bebas Royalti Non-Eksklusif ini Perpustakaan dan Kearsipan Universitas Negeri Jakarta berhak menyimpan, mengalihmediakan, mengelolanya dalam bentuk pangkalan data (*database*), mendistribusikannya, dan menampilkan/mempublikasikannya di internet atau media lain secara *fulltext* untuk kepentingan akademis tanpa perlu meminta ijin dari saya selama tetap mencantumkan nama saya sebagai penulis/pencipta dan atau penerbit yang bersangkutan.

Saya bersedia untuk menanggung secara pribadi, tanpa melibatkan pihak Perpustakaan Universitas Negeri Jakarta, segala bentuk tuntutan hukum yang timbul atas pelanggaran Hak Cipta dalam karya ilmiah saya ini.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Jakarta

Penulis

(Alawiah)

KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan kehadirat Allah Swt. atas segala rahmat, karunia, dan kemudahan yang telah diberikan sehingga skripsi dengan judul "Analisis Termal Peningkatan Sifat PCM $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ Berbasis Cangkang Telur Melalui Penambahan Agen Nukleasi $\text{SrCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, Nanopartikel Gamma Alumina ($\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$) dan Surfaktan CTAB" dapat diselesaikan dengan tepat waktu.

Skripsi ini disusun sebagai salah satu syarat untuk menyelesaikan pendidikan Sarjana Terapan pada Program Studi Teknologi Rekayasa Manufaktur, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Jakarta. Penelitian ini bermula dari keprihatinan terhadap permasalahan energi dan lingkungan yang nyata. Yakni keterbatasan teknologi penyimpanan energi termal yang efisien dan disisi lain ada permasalahan berupa besarnya volume limbah cangkang telur yang belum termanfaatkan secara optimal.

Penulis menyadari sepenuhnya bahwa penelitian ini mustahil dapat diselesaikan tanpa bimbingan luar biasa dari para pendidik yang telah menjadi pembimbing terbaik bagi penulis. Dengan rasa hormat, penulis menyampaikan terima kasih yang sedalam-dalamnya kepada:

1. Ibu Dr. Dyah Arum Wulandari, M.T. selaku Dosen Pembimbing I. Terima kasih telah memberikan kepercayaan penuh, ruang untuk bereksperimen, serta motivasi yang selalu membangkitkan semangat penulis di saat-saat paling sulit. Penulis sangat menghargai waktu dan ilmu yang Ibu dedikasikan di tengah kesibukan Ibu.
2. Bapak Dr. Wardoyo, M.T. selaku Dosen Pembimbing II. Penulis menyampaikan terima kasih atas diskusi-diskusi dan segala masukan teknis serta saran dan rekomendasi pengembangan yang sangat berharga bagi kesempurnaan proposal skripsi ini. Penulis sangat menghargai waktu dan ilmu yang Bapak berikan di tengah kesibukan Bapak.
3. Ayahanda Ahmad dan ketiga kakak penulis yang senantiasa memberikan dukungan doa, moral, maupun material yang tak terhingga.

4. Bapak Koordinator Program Studi dan seluruh Dosen Teknologi Rekayasa Manufaktur UNJ, yang telah membekali penulis dengan fondasi ilmu pengetahuan yang kuat selama masa perkuliahan.
5. Rekan-rekan seperjuangan mahasiswa Teknologi Rekayasa Manufaktur UNJ. Khususnya angkatan 2022, terimakasih telah kebersamaan selama beberapa tahun ini.

Penulis menyadari bahwa proposal skripsi ini masih jauh dari sempurna. Oleh karena itu, kritik dan saran yang membangun sangat penulis harapkan demi perbaikan di masa mendatang. Akhir kata, semoga skripsi ini dapat memberikan manfaat bagi perkembangan ilmu pengetahuan, khususnya di bidang teknologi manufaktur.

Jakarta, 2026

Penulis



Alawiah

DAFTAR ISI

LEMBAR PERSETUJUAN PEMBIMBING TUGAS AKHIR.....	i
LEMBAR PENGESAHAN TUGAS AKHIR	ii
SURAT PERNYATAAN KEASLIAN KARYA.....	iii
KATA PENGANTAR.....	iv
DAFTAR ISI.....	vi
DAFTAR TABEL	ix
DAFTAR GAMBAR.....	x
NOMENKLATUR	xi
DAFTAR LAMPIRAN	xiii
ABSTRAK	xiv
ABSTRACT	xv
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1. Latar Belakang	1
1.2. Rumusan Masalah	4
1.3. Tujuan Penelitian.....	4
1.4. Batasan Masalah.....	5
1.5. Manfaat Penelitian.....	5
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	7
2.1. <i>Thermal Energy Storage</i> (TES).....	7
2.1.1 Penyimpanan Kalor Sensibel (<i>Sensible Heat Storage/SHS</i>)	9
2.1.2 Penyimpanan Kalor Laten (<i>Laten Heat Storage/LHS</i>).....	10
2.1.3 Penyimpanan Energi Termokimia (<i>Thermochemical Energy Storage/TCES</i>).....	12
2.2. <i>Phase Change Material</i> (PCM).....	13
2.2.1 PCM Organik	14
2.2.2 PCM Anorganik.....	14
2.2.3 PCM Eutektik	15
2.3. Kalsium Klorida Heksahidrat ($\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) Sebagai Garam Terhidrasi PCM.....	15
2.3.1 Fenomena dan penyebab <i>supercooling</i>	16
2.3.2 Fenomena dan Penyebab Segregasi Fasa.....	16

2.3.3 Upaya Peningkatan Kinerja PCM Garam Terhidrasi	18
2.4. Cangkang Telur sebagai Sumber Kalsium Klorida	21
2.5. Nanokomposit PCM	23
2.9. Parameter Karakterisasi Termal PCM.....	24
2.9.1 <i>Fourier Transform Infrared Spectroscopy</i> (FTIR)	24
2.9.2 <i>X-Ray Diffraction</i> (XRD).....	25
2.9.3 <i>Differential Scanning Calorimetry</i> (DSC).....	26
2.10. Penelitian Terdahulu yang Relevan.....	27
BAB III METODOLOGI PENELITIAN	30
3.1. Tempat dan Waktu Penelitian	30
3.1.1. Waktu Penelitian.....	30
3.1.2. Tempat Penelitian	30
3.2. Alat dan Bahan Penelitian	30
3.2.1. Alat.....	30
3.2.2. Bahan	31
3.3. Metode Penelitian.....	32
3.4. Diagram Alir Penelitian.....	33
3.5. Teknik dan Prosedur Pengumpulan Data	34
3.5.1. Studi Literatur dan Tinjauan Pustaka.....	34
3.5.2. Persiapan Bahan Baku	34
3.5.3. Preparasi Bubuk Cangkang Telur	34
3.5.4. Ekstraksi $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ dari cangkang telur.....	36
3.5.5. Sintesis $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	37
3.5.6. Preparasi Nanokomposit PCM	38
3.5.7. Uji Karakterisasi (FTIR, XRD, dan DSC).....	40
3.5.8. Analisis Data.....	41
3.5.9. Hasil dan Kesimpulan.....	41
BAB IV HASIL PENELITIAN.....	42
4.1. Hasil Persiapan dan Sintesis Sampel.....	42
4.2. Hasil Karakterisasi Menggunakan <i>Fourier Transform Infrared Spectroscopy</i> (FTIR).....	43
4.2.1. Hasil Karakterisasi FTIR pada Bubuk Cangkang Telur Ayam	43
4.2.2. Hasil Karakterisasi FTIR pada $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ -Telur.....	46
4.2.3. Hasil Karakterisasi FTIR pada $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ -Telur.....	49

4.2.4. Hasil Karakterisasi FTIR pada PCM $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ -Telur Aditif.....	52
4.3. Hasil Karakterisasi Menggunakan <i>X-Ray Diffraction</i> (XRD).....	55
4.3.1. Hasil Karakterisasi XRD pada Bubuk Cangkang Telur Ayam.....	55
4.3.2. Hasil Karakterisasi XRD pada $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ -Telur.....	57
4.4. Hasil Karakterisasi PCM $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ -Telur Aditif Menggunakan Differential Scanning Calorimetry (DSC).....	59
4.5. Pembahasan	64
BAB V KESIMPULAN DAN REKOMENDASI	69
5.1. Kesimpulan.....	69
5.2. Saran	69
DAFTAR PUSTAKA	70
LAMPIRAN.....	75
DAFTAR RIWAYAT HIDUP	98

