

BAB I

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Konsumsi energi global yang terus meningkat dalam beberapa dekade terakhir telah menimbulkan krisis energi yang menjadi tantangan serius bagi kehidupan manusia dimasa depan. Ahmad & Zhang (2020), memperkirakan bahwa konsumsi energi global akan meningkat hingga 30% dalam beberapa dekade mendatang. Sejalan dengan data tersebut, Kwasi-Effah & Okpako (2025) memuat bahwa permintaan energi global pada tahun 2024 meningkat sebesar 2,2%, lebih tinggi dibanding rata-rata pertumbuhan tahunan sebelumnya yang hanya sebesar 1,3%. Meningkatnya kebutuhan energi menyebabkan penggunaan bahan bakar fosil juga terus bertambah karena hingga saat ini masih menjadi sumber energi utama dibanyak negara. Hal tersebut mengakibatkan emisi karbon yang dihasilkan semakin meningkat dan memperburuk iklim. Kondisi ini bertentangan dengan *Sustainable Development Goals* (SDGs), khususnya SDG 7 (Energi Bersih dan Terjangkau) dan SDG 13 (Penanganan Perubahan Iklim), yang menuntut adanya transisi menuju energi terbarukan yang efisien dan berkelanjutan (United Nations, 2025).

Kondisi serupa juga terjadi di Indonesia, dimana kebutuhan energi terus menunjukkan peningkatan. Pada tahun 2024, konsumsi listrik perkapita nasional mencapai 1.411 kWh atau meningkat sebesar 7,78% dibanding dengan tahun sebelumnya (Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia, 2025). Untuk memenuhi kebutuhan energi yang semakin besar sekaligus mengurangi ketergantungan pada bahan bakar fosil, pemanfaatan energi terbarukan menjadi salah satu solusi yang paling menjanjikan (Ahmad & Zhang, 2020). Namun, sumber energi terbarukan seperti tenaga surya dan angin memiliki karakteristik yang tidak stabil karena sangat bergantung pada kondisi cuaca dan waktu. Salah satu teknologi yang berpotensi untuk mendukung pemanfaatan energi terbarukan adalah *Thermal Energy Storage* (TES) berbasis *Phase Change Material* (PCM), teknologi ini mampu meningkatkan efisiensi pemanfaatan energi melalui mekanisme penyimpanan dan pelepasan kalor laten (Jouhara et al., 2020).

Phase Change Material merupakan komponen utama dalam teknologi *Latent Heat Thermal Energy Storage* (LHTES) yang mampu menyimpan dan melepaskan energi dalam jumlah besar melalui proses perubahan fasa pada suhu yang relative konstan (Sharma et al., 2009). Salah satu PCM anorganik yang banyak dikembangkan adalah Kalsium Klorida Heksahidrat ($\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) terutama untuk aplikasi suhu rendah sekitar $27\text{--}30^\circ\text{C}$, seperti pendingin ruangan pasif, panel dinding termal, dan penyimpanan energi surya bangunan (Thakkar et al., 2022; Yang et al., 2024). Material ini memiliki keunggulan berupa entalpi peleburan tinggi ($170\text{--}200 \text{ J/g}$), konduktivitas termal yang relatif lebih baik dibanding PCM organik ($\sim 0,5 \text{ W/m}\cdot\text{K}$). Namun, nilai konduktivitas termalnya masih perlu ditingkatkan agar lebih optimal untuk aplikasi TES yang membutuhkan perpindahan panas secara cepat.

Namun, dibalik keunggulan tersebut, aplikasi luas $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ terkendala dua masalah teknis utama. Yaitu *supercooling* dan segregasi fasa. *Supercooling* terjadi ketika material tetap berada dalam fase cair meskipun suhunya telah melewati titik beku, sehingga kalor laten tidak dapat dilepaskan secara optimal dan efisiensi penyimpanan energi menurun (C. Zhao et al., 2023). Sementara itu, segregasi fasa disebabkan oleh peleburan tidak kongruen (*incongruent melting*), yaitu ketika sebagian garam mengendap didasar wadah dan tidak kembali bercampur dengan air kristal selama proses pendinginan. Kondisi ini menyebabkan kapasitas penyimpanan panas energi terus menurun setelah siklus pemanasan dan pendinginan berulang (Thakkar et al., 2022). Oleh karena itu, kedua masalah tersebut perlu diatasi agar $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ dapat digunakan secara stabil dalam sistem *Thermal Energy Storage* (TES) jangka panjang.

Salah satu cara yang banyak digunakan untuk mengurangi *supercooling* adalah dengan menambahkan agen nukleasi. Senyawa ini membantu pembentukan inti kristal sehingga proses kristalisasi dapat terjadi lebih cepat dan lebih dekat dengan titik beku material (Yang et al., 2024). Dalam penelitian ini, Strontium Klorida Heksahidrat ($\text{SrCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) dipilih sebagai agen nukleasi karena memiliki struktur kristal yang sangat mirip dengan $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$. Kesamaan struktur tersebut memungkinkan proses nukleasi berlangsung lebih mudah melalui mekanisme epitaksi, sehingga derajat *supercooling* dapat ditekan mencapai 2°C (Li et al., 2017;

Thakkar et al., 2022). Selain membantu proses kristalisasi, $\text{SrCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ juga diketahui mampu meningkatkan kestabilan fasa dengan menjaga sistem tetap berada pada kondisi peleburan yang lebih kongruen (Carlsson, 1979)

Selain *supercooling*, masalah segregasi fasa juga perlu ditanganin untuk menjaga kestabilan PCM selama penggunaan berulang. Pada $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, segregasi fasa terjadi akibat terbentuknya $\text{CaCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ yang memiliki massa jenis lebih tinggi sehingga mudah mengendap saat proses peleburan berlangsung (Thakkar et al., 2022). Untuk mengurangi masalah ini, penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa nanopartikel Gamma Alumina ($\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$) juga memiliki konduktivitas termal yang tinggi ($\sim 36 \text{ W/m}\cdot\text{K}$), sehingga mampu meningkatkan laju perpindahan panas pada sistem PCM (Li et al., 2017). Agar nanopartikel dapat terdispersi secara stabil dan tidak mudah menggumpal, surfaktan *Cetyl Trimethyl Ammonium Bromide* (CTAB). Berdasarkan penelitian Li et al. (2017), CTAB memberikan stabilitas disperse yang lebih baik dibanding beberapa surfaktan lain pada PCM berbasis $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$.

Disisi lain, sebagian besar penelitian terdahulu mengenai PCM umumnya menggunakan CaCl_2 komersial sebagai bahan baku tanpa mempertimbangkan keberlanjutan sumber material. Padahal, limbah cangkang telur yang jumlahnya melimpah diketahui mengandung 94-97% kalsium karbonat (CaCO_3) memiliki potensi dimanfaatkan sebagai sumber CaCl_2 untuk sintesis menjadi $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ (Vandeginste, 2021). Di Indonesia, konsumsi telur yang tinggi menghasilkan limbah cangkang telur dalam jumlah besar setiap tahunnya (Jenderal -Kementerian et al., 2022). Melalui rekasi dengan asam klorida (HCl), kandungan CaCO_3 pada cangkang telur dapat dikonversi menjadi CaCl_2 dengan yield yang cukup tinggi (Garnjanagoonchorn & Changpuak, 2007). Namun, keberhasilan pembentukan fase $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ tetap perlu dibuktikan melalui karakterisasi seperti XRD dan FTIR karena struktur kristal yang terbentuk akan sangat memengaruhi sifat termal material.

Berdasarkan hal tersebut, penelitian ini menggabungkan pemanfaatan limbah cangkang telur sebagai sumber bahan baku $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ yang lebih berkelanjutan dengan penambahan $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$, $\text{SrCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, dan CTAB untuk meningkatkan

performa termal PCM. Pendekatan diharapkan tidak hanya menghasilkan material penyimpanan energi yang lebih stabil dan efisien, tetapi juga meningkatkan nilai guna limbah cangkang telur menjadi produk bernilai tambah serta mendukung upaya pengurangan limbah dan pemanfaatan sumber daya yang lebih berkelanjutan, sejalan dengan pencapaian SDG 7, SDG 12 (Konsumsi dan Produksi Bertanggung Jawab), dan SDG 13 (United Nations, 2015). Penelitian pengembangan PCM ini dilakukan dengan metode RnD 4D.

1.2. Rumusan Masalah

Berdasarkan identifikasi masalah dan pembatasan masalah yang telah dipaparkan, rumusan masalah yang ingin dijawab dalam penelitian ini adalah:

1. Bagaimana karakteristik produk yang dihasilkan dari prosedur sintesis $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ dari cangkang telur ayam melalui reaksi dengan larutan HCl ?
2. Bagaimana pengaruh penambahan aditif terhadap sifat termal (entalpi peleburan dan rentang peleburan) nanokomposit PCM $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ berbasis dasar cangkang telur ?
3. Bagaimana pengaruh penambahan aditif $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$, $\text{SrCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, dan CTAB terhadap komposisi kimia nanokomposit PCM $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ berbasis dasar cangkang telur ?

1.3. Tujuan Penelitian

Penelitian ini memiliki tujuan, berupa:

1. Melakukan sintesis $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ dari limbah cangkang telur sebagai bahan baku PCM alternatif yang bernilai ekonomis dan ramah lingkungan, serta membuktikan fasa dihidrat ($\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) dan heksahidrat ($\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) melalui karakterisasi XRD dan FTIR.
2. Menganalisis karakteristik termal nanokomposit PCM $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ berbasis dasar cangkang telur melalui pengujian DSC, meliputi suhu leleh, entalpi peleburan, dan stabilitas fasa material.
3. Mengevaluasi pengaruh penambahan aditif nanopartikel $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$, Agen Nukleasi $\text{SrCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, dan Surfaktan CTAB terhadap stabilitas fasa

PCM, khususnya dalam mencegah terjadinya segregasi fasa pada $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ berbasis cangkang telur.

1.4. Batasan Masalah

Untuk menjaga fokus penelitian dan mempertimbangkan sumber daya yang tersedia, penelitian ini dibatasi pada hal-hal berikut:

1. Bahan baku cangkang telur yang digunakan bersumber dari telur ayam ras yang diperoleh dari UMKM sekitar.
2. Pembuktian fasa kristal yang terbentuk (CaCO_3 dan $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) dilakukan melalui analisis XRD dengan membandingkan pola difraksi terhadap data standar JCPDS, serta analisis FTIR untuk konfirmasi gugus fungsi pada semua sampel (Bubuk cangkang telur, $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, Nanokomposit PCM $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ -Telur)
3. Karakterisasi sifat termal PCM dilakukan menggunakan DSC, mencakup pengukuran suhu leleh, entalpi peleburan, dan pengamatan stabilitas fasa. Pengujian *supercooling* dan konduktivitas termal tidak dilakukan dalam penelitian ini.

1.5. Manfaat Penelitian

Hasil penelitian ini diharapkan memberikan manfaat pada beberapa aspek berikut:

1. Secara praktis, penelitian ini memberikan solusi pengelolaan limbah cangkang telur yang selama ini kurang termanfaatkan, sekaligus menyediakan rute produksi PCM yang lebih ekonomis dan berkelanjutan.
2. Secara teknis, nanokomposit PCM $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}/\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ yang dihasilkan diharapkan memiliki sifat termal yang lebih unggul dibandingkan $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ tanpa modifikasi, sehingga dapat diaplikasikan pada sistem TES.
3. Secara ilmiah, penelitian ini memberikan kontribusi berupa data orisinal mengenai karakteristik termal nanokomposit PCM berbasis

$\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ dari limbah biomassa, yang dapat menjadi acuan bagi penelitian selanjutnya.

4. Secara lingkungan, pemanfaatan cangkang telur sebagai bahan baku mendukung prinsip ekonomi sirkular dan berkontribusi pada pengurangan timbulan limbah pangan industri.

