

# BAB I

## PENDAHULUAN

### 1.1. Latar Belakang Masalah

Pemanasan global telah menyebabkan peningkatan suhu permukaan bumi yang signifikan dalam beberapa dekade terakhir. Berdasarkan data dari *International Energy Agency* (IEA), tahun 2024 tercatat sebagai tahun dengan suhu rata-rata tertinggi yakni  $1,5^{\circ}\text{C}$  di atas level pra-industri (IEA, 2025b). Fenomena ini memicu lonjakan konsumsi energi listrik global, terutama yang bersumber dari bahan bakar fosil, di mana sektor bangunan menyumbang sekitar 60% dari total pertumbuhan konsumsi listrik (IEA, 2025a). Sebagian besar energi tersebut dialokasikan untuk sistem pendingin ruangan guna menghadapi suhu ekstrem, yang pada akhirnya meningkatkan emisi gas rumah kaca dan memperburuk krisis iklim.

Teknologi penyimpanan energi termal atau *Thermal Energy Storage* (TES) menawarkan solusi efektif untuk masalah krisis iklim dan krisis energi. TES adalah salah satu jenis penyimpanan energi yang umumnya dilakukan dengan mengubah temperatur media penyimpanan dengan memanaskan atau mendinginkannya, sehingga energi panas yang tersimpan dapat digunakan kembali (Jouhara et al., 2020). Selain membantu efisiensi sistem energi, penyimpanan energi termal juga mampu mengurangi konsumsi energi, biaya, dan emisi karbon dioksida (Dincer dkk., 1997 dan Rosen dkk., 2000, diacu dalam Ermiş & Findik, 2020). TES dibagi menjadi tiga jenis yakni penyimpanan panas sensible atau *sensible heat storage* (SHS), penyimpanan panas laten atau *latent heat storage* (LHS), dan penyimpanan panas termokimia atau *thermochemical storage* (TCS) (Elias & Stathopoulos, 2019; IRENA, 2020).

Penyimpanan panas laten atau *latent heat storage* (LHS) merupakan salah satu jenis penyimpanan energi termal yang menggunakan media penyimpanan berupa material berubah fase atau *phase change material* (PCM) sebagai media

penyimpanan panasnya (Elias & Stathopoulos, 2019). Sifat termofisik dari PCM menjadikan material tersebut memiliki kemampuan untuk meningkatkan efisiensi sistem dari berbagai jenis sektor, mulai dari sektor bangunan dan elektronik hingga teknologi energi solar dan pendinginan (Sadeq, 2025). Tidak seperti SHS yang mengandalkan perubahan temperatur agar dapat menyimpan panas, PCM memanfaatkan panas laten dengan temperatur konstan atau hampir konstan yang menawarkan densitas energi yang tinggi dengan regulasi termal yang lebih baik. Kepadatan energi LHS mencapai 5-14 kali lipat lebih tinggi yang menjadikan sistemnya lebih kecil dibandingkan SHS, dan lebih sederhana dibandingkan dengan TCS (Kumar & Shukla, 2015; Roger-Lund et al., 2024).

PCM dapat diklasifikasikan menjadi PCM organik, anorganik, dan eutektik (Sadeq, 2025). PCM eutektik merupakan PCM yang terdiri dari dua atau lebih PCM sehingga temperatur leleh dapat diatur dengan mengatur komposisi dari PCM tersebut (Elias & Stathopoulos, 2019). PCM organik secara umum terdiri dari parafin dan non-parafin, sementara PCM anorganik terdiri dari logam dan garam terhidrasi. Di antara berbagai jenis PCM, kalsium klorida heksahidrat ( $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ) merupakan salah satu PCM garam terhidrasi yang populer diteliti sejak puluhan tahun yang lalu (Thakkar et al., 2022).  $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  memiliki sifat tidak mudah terbakar dan memiliki karakteristik temperatur leleh sekitar  $29^\circ\text{C}$  dan panas laten yang tinggi (Carlsson, 2009; Wang et al., 2024). Karakteristik termalnya menjadikan  $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  ideal untuk diaplikasikan sebagai PCM dalam suhu ruang untuk membantu meregulasi temperatur dan mengurangi beban pada pendingin ruangan.

Produksi  $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  secara komersial adalah memiliki tantangan berupa ketergantungan pada penambangan batu kapur sebagai sumber kalsium karbonat. Proses penambangan batu kapur memberikan dampak lingkungan yang signifikan, mulai dari degradasi sumber daya alam, polusi udara dan air, hingga kerusakan habitat (Murodif et al., 2025). Selain itu, semakin tinggi tingkat kemurnian produksi

suatu bahan, maka biayanya akan semakin mahal. Di sisi lain, limbah organik seperti cangkang telur ayam memiliki potensi besar sebagai sumber kalsium. Cangkang telur mengandung kalsium karbonat ( $\text{CaCO}_3$ ) sebesar 93,6% (Neunzehn et al., 2015). Secara global, produksi telur ayam mengalami peningkatan dari 73,9 juta metrik ton pada tahun 2016 menjadi 82,17 juta metrik ton pada tahun 2019 (Awogbemi et al., 2022). Pemanfaatan limbah ini sebagai sumber kalsium dan mengganti peran batu kapur dapat membantu mendukung konsep ekonomi sirkuler dan mengurangi dampak terhadap lingkungan.

Saat ini, penelitian mengenai PCM berbahan  $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  yang berasal dari telur ayam belum dilakukan karena umumnya kalsium pada material tersebut berasal dari batu kapur atau *limestone*. Mengingat banyaknya limbah cangkang telur akibat tingginya konsumsi telur ayam di Indonesia dan rendahnya pemanfaatan limbah cangkang telur tersebut, maka diperlukan cara untuk memanfaatkannya kembali. Salah satu caranya adalah dengan mengekstraksi kandungan kalsium dari cangkang telur menjadi bahan untuk PCM yang juga berguna sebagai cara untuk menghemat dan memanfaatkan kembali energi agar penggunaannya lebih hemat dan efisien untuk melestarikan lingkungan.

Penelitian mengenai sintesis kalsium klorida ( $\text{CaCl}$ ) dari cangkang telur ayam telah banyak dilakukan, begitu pula penelitian mengenai  $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  sebagai PCM. Namun penggunaan limbah cangkang telur ayam sebagai material untuk menghasilkan  $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  sebagai PCM merupakan pendekatan yang belum pernah dilakukan sebelumnya dalam literatur akademik terkait. Keberhasilan penelitian ini memberikan dua kontribusi utama untuk perkembangan teknologi material. Pertama, reduksi biaya produksi material PCM secara signifikan melalui penggantian bahan baku kimia murni dengan limbah yang tersedia secara melimpah. Kedua, penyediaan solusi teknologi hijau yang mampu menekan beban akibat aktivitas penambangan mineral. Melalui analisis terhadap struktur kristal dan performa termal, penelitian ini diharapkan dapat membuktikan bahwa material

berbasis limbah memiliki kualitas teknis yang setara dengan material standar industri, sekaligus menjadi landasan bagi pengembangan efisiensi energi.

## 1.2. Identifikasi Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah dijelaskan sebelumnya, maka diidentifikasi masalah dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Urgensi solusi terhadap krisis iklim dan krisis energi, terutama akibat peningkatan konsumsi energi listrik secara global pada sektor bangunan akibat ketergantungan terhadap sistem pendingin ruangan.
2. Dampak negatif dari aktivitas penambangan batu kapur sebagai sumber utama kalsium karbonat, yang menyebabkan polusi dan kerusakan habitat.
3. Besarnya volume limbah cangkang telur berdasarkan produksinya dan minimnya pemanfaatan limbah tersebut.
4. Kurangnya informasi mengenai karakteristik cangkang telur ayam sebagai bahan baku dalam sintesis material penyimpanan energi.
5. Adanya tantangan dalam konversi kimia dari cangkang telur ayam menjadi kalsium klorida, terutama dalam memastikan keberhasilan sintesis menjadi fase dihidrat ( $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) dan heksahidrat ( $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ).
6. Kurangnya informasi mengenai kemurnian fase kristalin pada  $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  hasil sintesis dibandingkan dengan referensi standar industri.
7. Pentingnya pengujian sifat termal  $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  berbahan dasar cangkang telur ayam untuk memastikan material tersebut memiliki titik leleh dan entalpi yang sesuai untuk aplikasi *Thermal Energy Storage* (TES).
8. Kurangnya pembuktian ilmiah mengenai perbandingan antara performa termal antara PCM berbasis limbah dengan PCM komersial.

### 1.3. Pembatasan Masalah

Berdasarkan pada identifikasi masalah di atas, peneliti menetapkan batasan masalah dalam penelitian ini dengan tujuan untuk memaksimalkan penyusunan laporan penelitian.

1. Bahan dasar yang digunakan pada penelitian ini adalah cangkang telur ayam.
2. Penelitian ini bersifat rekayasa teknik.
3. Pengujian karakteristik material yang dilakukan berupa *X-Ray Diffraction* (XRD) dan *Fourier Transform Infrared* (FTIR) pada setiap sampel.
4. Pengujian sifat termal yang dilakukan berupa *Differential Scanning Calorimetry* (DSC) pada sampel  $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ -telur, sebanyak satu kali dari rentang suhu  $25^\circ\text{C}$  (2,0 K/min)  $\rightarrow -15^\circ\text{C}$  (2,0 K/min)  $\rightarrow 60^\circ\text{C}$ .

### 1.4. Perumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang dan identifikasi masalah, maka dapat ditentukan rumusan masalah sebagai berikut:

1. Bagaimana karakteristik cangkang telur,  $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ -telur, dan  $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ -telur?
2. Bagaimanakah keberhasilan sintesis dari cangkang telur menjadi  $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ -telur dan  $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ -telur?
3. Bagaimanakah sifat termal  $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ -telur?
4. Bagaimana kelayakan  $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  sebagai PCM berdasarkan sifat termalnya?

*Intelligentia - Dignitas*

### 1.5. Tujuan Penelitian

Berdasarkan latar belakang, identifikasi masalah dan rumusan masalah yang ada, maka tujuan dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Mengetahui karakteristik bubuk cangkang telur,  $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ -telur, dan  $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ -telur
2. Mengetahui keberhasilan sintesis dari bubuk cangkang telur menjadi  $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ -telur dan  $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ -telur
3. Mengetahui sifat termal  $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ -telur.
4. Menganalisis sifat termal  $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ -telur untuk mengetahui kelayakannya sebagai PCM.

### 1.6. Manfaat Penelitian

Manfaat yang diharapkan dari penelitian ini adalah dapat menambah wawasan, baik tentang proses sintesis maupun tentang potensi pemanfaatan  $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  berbahan dasar limbah cangkang telur ayam sebagai PCM untuk penyimpanan energi termal.

*Intelligentia - Dignitas*