

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang Masalah

Indonesia menghadapi tantangan dalam sektor energi yang berkembang pesat. Tren ini didorong oleh permintaan dan kondisi dari luar negeri serta meningkatnya permintaan energi domestik (Sunarsip, 2022). Bahan bakar fosil, yang merupakan sumber energi tak terbarukan dan menghasilkan emisi dalam jumlah besar yang mempercepat pemanasan global menjadi sumber energi utama Indonesia (Wirajaya et al., 2024). Mengingat Indonesia salah satu negara dengan emisi karbon terbesar dan memiliki potensi untuk menjadi salah satu penyerap karbon terbesar di dunia, tuntutan global tersebut tentunya perlu diatasi. Selain itu, Indonesia juga diharuskan memenuhi komitmen globalnya terkait perubahan iklim (*climate change*) dan mengurangi emisi karbon agar mencapai *net zero emission* (NZE) di tahun 2050 (Sunarsip, 2022). Transisi energi yang menyeimbangkan aktivitas manusia dengan keseimbangan alam dapat mengarah pada *Net Zero Emission* (NZE). Peralihan dari bahan bakar fosil ke penggunaan bahan bakar fosil bersih, karbon rendah serta ramah lingkungan, dikenal sebagai transisi energi (Wirajaya et al., 2024).

Sumber penggunaan energi terbesar di dunia adalah industri bangunan. Data dari *International Energy Agency* (2023), bangunan menyumbang 39% dari emisi karbon dioksida (CO₂) global dan 36% dari konsumsi energi akhir. Bangunan berfungsi sebagai filter, mencegah unsur-unsur alam yang tidak nyaman. Bangunan sering menggunakan teknologi mekanis untuk menyaring variabel iklim yang tidak diinginkan. Dengan menggunakan unit AC, bangunan dapat mengubah udara panas di luar menjadi udara dingin. Dalam hal ini, mengoperasikan AC memerlukan energi listrik (Wahyuni et al., 2025). Hal ini didukung oleh data Kementerian ESDM yang menunjukkan bahwa penggunaan energi pada bangunan komersial terus meningkat setiap tahun, dengan penerangan, sistem HVAC, dan peralatan elektronik sebagai penyumbang terbesar. Kenaikan ini menimbulkan tantangan bagi pengelolaan sumber daya yang lebih berkelanjutan dan efisiensi energi (Awal et al., 2025; Ma'rifat & Suraharta, 2024).

Kemampuan teknologi *thermal energy storage* (TES) untuk menyimpan dan melepaskan energi dalam jumlah besar guna menutupi kesenjangan antara pasokan dan permintaan energi membuat teknologi ini semakin penting. Terutama akibat perubahan iklim dan pertumbuhan ekonomi. *Thermal energy storage* (TES) menggunakan *phase change material* (PCM) berbasis *latent heat storage* padat-ke-cair lebih disukai dibandingkan metode *sensible heat storage* dan *thermochemical heat storage* karena volumenya yang kecil, pengoperasian isoterma, serta biaya per satuan energi yang disimpan yang rendah (Rajagopalan & Sukhishvili, 2025).

Thermal energy storage (TES) dalam bentuk *latent heat* pada *phase change materials* (PCM) merupakan opsi yang menarik untuk aplikasi energi pada rentang suhu rendah hingga menengah. *Phase Change Material* (PCM) memiliki kemampuan berubah fase serta melepaskan atau menyerap energi untuk menghasilkan pemanasan atau pendinginan. Panas laten material PCM sangat tinggi. Material PCM memiliki keunikan karena mampu menyimpan dan melepaskan energi selama proses perubahan fase, serta mencair dan membeku pada suhu tertentu (Veva et al., 2023).

Penerapan *phase change material* (PCM) sebagai *thermal energy storage* (TES) pasif pada selubung bangunan seperti dinding dan atap terbukti mampu menurunkan konsumsi energi tahunan sebesar 15–45%, dengan beberapa studi melaporkan reduksi emisi CO₂ hingga 50% (Laafer et al., 2026). Penelitian menyoroti potensi *phase change material* (PCM) dalam mengurangi emisi gas rumah kaca melalui pengurangan konsumsi energi. Beberapa studi yang diacu oleh Laafer et al. (2026) telah mengukur penurunan emisi CO₂ hingga 50% di iklim tertentu.

PCM dibagi menjadi PCM organik, PCM anorganik, dan PCM eutektik berdasarkan sifat inheren bahan-bahannya. Garam terhidrasi anorganik, sebagai wakil dari PCM anorganik, telah menjadi bidang penelitian yang populer karena biaya rendah, ketersediaan yang mudah, tidak mudah terbakar, dan densitas penyimpanan energi yang tinggi. Garam hidrat anorganik memiliki sifat nukleasi yang buruk dan mudah meleleh secara tidak seragam. Untuk mengatasi dua masalah utama ini, langkah umum yang diambil adalah menambahkan agen nukleasi dan pengental (He et al., 2018).

Kalsium klorida heksahidrat ($\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) memiliki banyak keunggulan, seperti suhu transisi fasa yang sesuai, nilai entalpi yang tinggi, kinerja ekonomi yang baik, aman, dan tidak beracun. Bahan ini memiliki potensi besar di bidang penyimpanan energi suhu rendah (Cao et al., 2022). Namun garam hidrat anorganik seperti $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ memiliki kelemahan, yaitu pemisahan fasa dapat menyebabkan hidrat garam berhenti berfungsi setelah komposisinya berubah. Cara-cara untuk mengurangi pemisahan fasa salah satunya dengan menambahkan bahan pengental seperti *Carboxy methyl cellulose* (CMC) (Zhang et al., 2018). Menurut He et al. (2018) penambahan 20% $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ - 1% $\text{SrCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ dan 0.5% *Carboxymethyl Cellulose* (CMC) pada $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ menghasilkan panas laten rata-rata sebesar 120,62 J/g setelah 100 siklus pada pengujian *t-history*. Penggunaan agen nukleasi seperti $\text{SrCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ yang dikombinasikan dengan pengental CMC terbukti mampu menghasilkan PCM yang stabil secara termal dan memiliki kinerja kristalisasi yang unggul untuk sistem penyimpanan energi suhu ruang.

Pada Satuan Pelayanan Pemenuhan Gizi (SPPG) Jatirasa yang berlokasi di Jl. Villa Jatirasa No.100, RT.002/RW.007 Kec. Jatiasih, Kota Bks, Jawa Barat 17423. Kuantitas penggunaan telur ayam sebagai salah satu bahan Makan Bergizi Gratis (MBG) untuk anak sekolah mencapai 2000 - 3000 butir per hari. Kebutuhan yang cukup banyak ini tentu meninggalkan limbah telur ayam berupa cangkang telur yang cukup banyak. Menurut Luna et al. (2025) limbah cangkang telur terutama terdiri dari fase anorganik (~94–97%) kalsium karbonat (CaCO_3) dalam bentuk kalsit dan fase organik (~3–4%) yang sesuai dengan membran bagian dalam cangkang telur. Pemanfaatan cangkang telur sebagai material pendukung dalam teknologi *Thermal Energy Storage* (TES) hingga saat ini masih sangat terbatas dan jarang dieksplorasi. Tingginya kadar CaCO_3 dari limbah biomassa ini merupakan potensi besar untuk dikembangkan menjadi komponen PCM $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ berbahan dari limbah cangkang telur ayam. Di sisi lain material ini memiliki kelemahan berupa derajat *supercooling* yang tinggi dan pemisahan fase. Oleh karena itu, penelitian ini mengadopsi formulasi dari He et al. (2018) dengan menambahkan $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ untuk menyesuaikan suhu transisi fase sesuai kenyamanan termal manusia di dalam ruangan, $\text{SrCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ sebagai agen nukleasi untuk menekan

supercooling, dan CMC sebagai pengental untuk mencegah pemisahan fase PCM yang berasal dari limbah cangkang telur ayam.

Penelitian ini menggunakan metode *research and development* (R&D) dengan model *Four-D* (4D) yang terdiri atas tahap *define*, *design*, *develop*, dan *disseminate* (Maydiantoro, 2020). Pemilihan model 4D didasarkan pada karakteristik penelitian ini yang berupa proses pengembangan produk material bertahap, mulai dari sintesis bubuk cangkang telur ayam menjadi $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ dan $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, hingga formulasi campuran eutektik dengan $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, $\text{SrCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ dan CMC, di mana setiap tahap sintesis harus identik terhadap parameter yang ditetapkan sebelum dilanjutkan ke tahap berikutnya. Karakteristik ini sejalan dengan prinsip metode 4D yang bersifat berurutan dan saling berkaitan, di mana keberhasilan pada satu tahap menjadi prasyarat untuk melanjutkan ke tahap selanjutnya (Bahosin Sihombing et al., 2024). Selain itu, model 4D dipilih karena tahapannya relatif tidak terlalu kompleks dan tidak membutuhkan waktu pengembangan yang lama dibandingkan model R&D lain seperti Borg and Gall, sehingga sesuai dengan cakupan penelitian skripsi yang berfokus pada sintesis dan karakterisasi material melalui pengujian XRD, FTIR dan DSC, tanpa memerlukan uji coba lapangan berskala luas seperti pada model pengembangan produk pembelajaran.

1.2 Perumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang diatas, maka dapat ditentukan perumusan masalah sebagai berikut :

1. Bagaimana karakteristik struktur material bubuk cangkang telur ayam dan kalsium klorida berbahan dasar limbah cangkang telur ayam ?
2. Bagaimana efektivitas kalsium klorida dari limbah cangkang telur ayam sebagai material pendukung PCM untuk *thermal energy storage* (TES) ?
3. Bagaimana karakteristik struktur material dan sifat termal material PCM $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ berbahan dasar limbah cangkang telur ayam dengan penambahan 20wt% $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ – 1wt% $\text{SrCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ – 0.5wt% *Carboxy methyl cellulose* (CMC)?

1.3 Tujuan Penelitian

Dari latar belakang dan rumusan masalah yang ada, tujuan penelitian ini adalah :

1. Mengetahui keberhasilan pembuatan bubuk cangkang telur ayam dan sintesis bubuk cangkang telur ayam menjadi $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ serta $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$
2. Mengetahui karakteristik bubuk cangkang telur ayam, $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ dan $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ dari limbah cangkang telur ayam.
3. Mengetahui karakteristik struktur material dan sifat termal material PCM $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ berbahan dasar limbah cangkang telur ayam dengan penambahan 20wt% $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ – 1wt% $\text{SrCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ – 0.5wt% *Carboxy methyl cellulose* (CMC).

1.4 Manfaat Penelitian

Dengan penambahan $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, $\text{SrCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, dan *Carboxy methyl cellulose* (CMC) sebagai PCM untuk *Thermal Energy Storage*, penelitian ini diharapkan dapat menghasilkan pengetahuan ilmiah mengenai sintesis dan potensi penerapan $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ yang berasal dari limbah cangkang telur ayam.

1.5 Batasan Masalah

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

1. Penelitian ini membatasi penggunaan bahan baku pada fase $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ dalam sintesis PCM $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, berbeda dengan penelitian He et al. (2018) yang digunakan sebagai referensi pada penelitian ini. He et al menggunakan bahan fase CaCl_2 anhidrat. Penggunaan bentuk $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ini didasarkan pada eksperimental di mana hasil perhitungan *yield* dan perbandingan massa molar menunjukkan bahwa senyawa yang terbentuk secara optimal pada proses pembuatan adalah dalam fase $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$.
2. Kekentalan atau viskositas bahan *carboxy methyl cellulose* (CMC) yang digunakan sebesar 1500-3000 mPa.s.
3. Karakterisasi material menggunakan XRD hanya pada sampel bubuk cangkang telur ayam dan $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ -telur. Tidak dilakukan pada sampel

$\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ -telur dan $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ -telur - $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ – $\text{SrCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ – *Carboxy methyl cellulose* (CMC).

4. Uji termal pada sampel $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ -telur - $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ – $\text{SrCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ – *Carboxy methyl cellulose* (CMC) hanya dilakukan pengujian DSC untuk mendapatkan titik leleh dan entalpi panas laten, tidak dilakukan uji siklus *t-history* untuk mendapatkan data derajat *supercooling* .

