

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Energi menjadi aspek penting dalam mencapai pembangunan yang berkelanjutan (Khan *et al.*, 2020). Energi memiliki tiga peranan penting di Indonesia, antara lain sebagai bahan bakar untuk memenuhi kebutuhan nasional, sebagai bahan baku industri, dan sebagai komoditas perdagangan. Oleh karena itu, pengaturan sektor energi harus bersifat menyeluruh dan terintegrasi dengan sektor lain, seperti transportasi, industri, kehutanan, dan perdagangan. Dalam upaya memenuhi kebutuhan energi yang terus meningkat sekaligus mengurangi ketergantungan terhadap energi fosil, pengembangan energi baru dan terbarukan (EBT) menjadi salah satu langkah strategis yang perlu dilakukan (ESDM, 2016).

Indonesia terletak di kawasan khatulistiwa memiliki iklim tropis, serta potensi radiasi rata-rata matahari sebesar 4,8 Kwh/m² yang dapat dimanfaatkan dan dikembangkan untuk EBT melalui pembangkit listrik tenaga surya (PLTS) (ESDM, 2023). PLTS menjadi salah satu EBT yang menjanjikan karena memiliki keunggulan, yaitu tidak menghasilkan polusi, tidak memerlukan bahan bakar, dan biaya pemeliharaan yang relatif rendah. Namun demikian, sifat berkala dari sumber daya energi terbarukan ini menjadi tantangan utama dalam memanfaatkan energi sepanjang hari (Nair *et al.*, 2022).

Dalam mengatasi sifat berkala tersebut, diperlukan sistem penyimpanan energi yang mampu menjembatani ketidaksesuaian antara ketersediaan energi dan kebutuhan energi. *Thermal energy storage* (TES) merupakan salah satu dari berbagai sistem penyimpanan energi yang telah banyak dikembangkan. TES hemat biaya, masa operasional pakai yang panjang, densitas energi yang tinggi dibandingkan dengan teknologi penyimpanan lainnya (Aktaş & Kirçiçek, 2021). TES berperan sebagai teknologi pendukung utama yang dapat mendorong penyebaran sumber energi terbarukan secara luas di berbagai sektor, seperti bangunan, distrik, dan industri (Frazzica *et al.*, 2023). Secara umum, TES dibagi menjadi 3 jenis, yaitu *sensible heat storage*, *latent heat storage*, dan *thermochemical storage* yang masing-masing memanfaatkan proses fisik berbeda untuk menyimpan dan melepaskan energi termal. Pada TES sensibel, media

penyimpanan yang sering digunakan adalah air karena memiliki keandalan yang tinggi, biaya yang relatif rendah, serta kapasitas panas spesifik yang besar (Miliozzi *et al.*, 2025). Namun, pada temperatur di atas 100°C, air akan menjadi gas sehingga dibutuhkan penyimpanan bertekanan yang menjadikannya mahal (Okello *et al.*, 2014). Meskipun begitu, pengembangan inovatif untuk TES masih terus diupayakan.

Material pasir menjadi salah satu material yang berpotensi digunakan sebagai media penyimpanan panas sensibel. Pasir memiliki titik leleh yang tinggi, sekitar 1700°C, sehingga mampu beroperasi pada rentang temperatur yang lebih luas. Selain itu, pasir memiliki kapasitas panas spesifik yang tinggi umumnya berkisar 0,703 – 0,84 J/g.°C, bersifat ramah lingkungan, serta mudah diperoleh sehingga menjadi material penyimpanan panas yang berkelanjutan. Namun, TES berbasis pasir memiliki keterbatasan dalam konduktivitas termal yang rendah akibat bentuk butiran dan kontak titik antara butiran pasir sehingga memengaruhi tingkat pengisian/pengosongan energi termal (Tetteh *et al.*, 2024). Oleh karena itu, berbagai pendekatan telah dilakukan untuk meningkatkan kinerja konduktivitas termal TES berbasis pasir, seperti menambahkan komposit material geram/serpihan logam (Tetteh *et al.*, 2024).

Di samping meningkatkan konduktivitas termal, upaya untuk meningkatkan kapasitas energi TES terus dikembangkan. Penggabungan TES berbasis pasir dengan PCM menjadi salah satu pendekatan yang banyak diteliti beberapa tahun terakhir (Faraj *et al.*, 2021). Pemanfaatan PCM mampu menyimpan energi panas dalam jumlah lebih besar melalui proses perubahan fase pada temperatur tertentu sehingga dapat meningkatkan kapasitas penyimpanan energi. Meskipun demikian, PCM umumnya memiliki konduktivitas termal yang relatif rendah sehingga dapat menghambat proses perpindahan panas. Berbagai metode telah dikembangkan untuk mengatasi permasalahan tersebut, seperti penggunaan busa logam, material berpori, sirip logam, maupun teknik makro-enkapsulasi PCM untuk memperluas area perpindahan panas (Cieśliński *et al.*, 2023).

Salah satu metode yang digunakan dalam pengembangan sistem TES adalah melalui penerapan makro-enkapsulasi PCM yang ditempatkan di dalam tangki penyimpanan panas (Frazzica *et al.*, 2022). Metode ini memungkinkan PCM tetap

terisolasi dari media pasir sehingga tidak tercampur serta meningkatkan stabilitas sistem selama proses penyimpanan dan pelepasan panas. Makro-enkapsulasi PCM dapat dirancang dengan bentuk yang berbeda, seperti persegi panjang, silinder, dan bola yang menyesuaikan dengan kondisi aplikasi (Vérez *et al.*, 2021). Selain itu, pemilihan jenis PCM yang tepat menjadi faktor penting dalam menentukan kinerja sistem TES. Kriteria pemilihan PCM dilihat dari segi titik leleh yang sesuai untuk aplikasi, tidak mudah terbakar, stabilitas kimia yang tinggi, dan konduktivitas termal yang tinggi.

Penggunaan PCM berbasis garam anorganik seperti natrium nitrat (NaNO_3) dan kalium nitrat (KNO_3) menjadi material yang banyak dipilih karena memiliki karakteristik termal yang baik, seperti kapasitas panas yang tinggi ($1.5 - 1.6 \text{ kJ/kg.K}$), kestabilan kimia yang baik. Selain itu, rentang temperatur operasi yang sesuai untuk aplikasi penyimpanan energi termal yang digunakan dalam penelitian ini berkisar $200 - 300^\circ\text{C}$ diantara *heater* dan *tube* tembaga spiral (Liu *et al.*, 2017). Salah satu campuran yang paling banyak digunakan adalah kombinasi NaNO_3 dan KNO_3 yang dikenal sebagai *solar salt* dengan komposisi umum 60% NaNO_3 dan 40% KNO_3 . Campuran ini memiliki titik leleh sekitar 222°C dengan rentang temperatur operasi sekitar 200°C hingga 600°C dan siklus penggunaan >20.000 kali sehingga banyak dimanfaatkan dalam sistem penyimpanan energi termal bertemperatur tinggi (Kwasi-Effaha & Okpako, 2025).

Mengintegrasikan PCM ke dalam sistem TES telah terbukti dapat meningkatkan kapasitas energi. Frazzica *et al.* (2023) mengembangkan sistem TES hibrida sensibel-laten untuk penyediaan air panas domestik yang menggunakan konfigurasi *tank-in-tank*, yaitu wadah tertutup berisi air yang dilapisi oleh tangki yang lain berisi media penyimpan panas sensibel. PCM yang digunakan adalah garam hidrat dengan temperatur leleh di angka 58°C yang terenkapsulasi di dalam tabung untuk meningkatkan kepadatan penyimpanan. Hasil yang diperoleh adalah terjadi peningkatan kapasitas penyimpanan energi hingga 16% ketika temperatur pengisian dijaga sedikit di atas temperatur leleh PCM. Namun dibalik penggunaan PCM tersebut, konfigurasi *tank-in-tank* memiliki keterbatasan berupa struktur sistem yang kompleks serta biaya pembuatan yang tangki yang mahal.

Penelitian lain yang dilakukan oleh Keilany *et al.*, (2022) membuat sistem TES skala pilot satu tangki yang menggabungkan penyimpanan panas laten dan sensibel, serta menggunakan minyak sintetis sebagai *heat transfer fluid* (HTF). Bola-bola alumina digunakan sebagai material penyimpan panas sensibel, sedangkan PCM sebagai panas laten yang digunakan adalah NaNO_3 . Kesimpulan pada penelitian tersebut adalah perlu dilakukan peningkatan kinerja termal lapisan PCM dengan cara meningkatkan perpindahan panas antara PCM dan HTF menggunakan metode yang tepat.

Disamping itu, penelitian yang dilakukan oleh Xia *et al.* (2025) untuk meningkatkan efisiensi perpindahan panas menggunakan PCM parafin dan sirip logam menunjukkan bahwa konfigurasi tipe spiral memiliki kinerja perpindahan panas yang unggul, pemanfaatan PCM yang optimal, dan keseragaman temperatur yang unggul. Oleh karena itu, mengintegrasikan PCM dengan sirip logam menawarkan pendekatan yang menjanjikan untuk meningkatkan kinerja termal.

Meskipun berbagai penelitian telah menunjukkan bahwa integrasi PCM dalam sistem TES mampu meningkatkan kapasitas penyimpanan energi, penelitian sebelumnya masih menggunakan konfigurasi sistem yang relatif kompleks, seperti *tank-in-tank* maupun penggunaan sirip logam pada tabung. Selain itu, penelitian yang mengombinasikan media pasir sebagai penyimpan panas sensibel dengan PCM berbasis garam nitrat, khususnya campuran NaNO_3 dan KNO_3 pada konfigurasi makro-enkapsulasi dengan penambahan serpihan logam campuran (*mixed metal*) untuk aplikasi pemanas air domestik masih belum ditemukan. Oleh karena itu, diperlukan penelitian lebih lanjut untuk mengembangkan dan menganalisis sistem TES yang lebih sederhana namun tetap efektif dalam meningkatkan kinerja penyimpanan energi termal baik dari sisi konduktivitas, maupun kapasitas energi.

Berdasarkan permasalahan tersebut, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis performa sistem TES untuk *water heater* berbasis media pasir dengan variasi PCM NaNO_3 dan KNO_3 yang dienkapsulasi dengan penambahan lapisan geram *mixed metal* pada pasir. Melalui pendekatan ini, diharapkan dapat meningkatkan kapasitas dan konduktivitas termal.

1.2 Identifikasi Masalah

1. Sumber energi terbarukan seperti energi surya memiliki sifat berkala sehingga tidak dapat dimanfaatkan secara optimal tanpa adanya sistem penyimpanan energi yang memadai.
2. Sistem TES masih memiliki keterbatasan dalam kapasitas penyimpanan energi sehingga diperlukan pengembangan untuk meningkatkan densitas energi.
3. Media pasir sebagai material penyimpanan panas memiliki keunggulan dari segi ketersediaan dan stabilitas temperatur tinggi, namun memiliki kelemahan berupa konduktivitas termal yang rendah sehingga mempengaruhi proses perpindahan panas.
4. Penggunaan PCM mampu meningkatkan kapasitas penyimpanan energi, namun memiliki keterbatasan berupa konduktivitas termal yang relatif rendah sehingga memerlukan metode peningkatan yang tepat dalam sistem TES.

1.3 Pembatasan Masalah

1. Penelitian ini berfokus pada sistem TES berbasis media pasir yang dikombinasikan dengan PCM berupa campuran NaNO_3 dan KNO_3 dalam bentuk makro-enkapsulasi menggunakan tabung vertikal berbahan *stainless steel 304*.
2. Variabel penelitian dibatasi pada variasi komposisi PCM NaNO_3 dan KNO_3 , tanpa mempertimbangkan variasi jenis material lain pada media penyimpanan.
3. Geram *mixed metal* yang digunakan pada penelitian ini merupakan limbah hasil laboratorium produksi Tower A UNJ dengan ukuran rata-rata potongan 50 mm.
4. Sumber panas dalam penelitian disimulasikan menggunakan elemen pemanas listrik (*heater*) 600 W dan 1000 W sehingga tidak menggunakan panel surya secara langsung.
5. Fluida kerja yang digunakan dalam proses *discharging* adalah air dengan laju aliran yang dijaga konstan oleh pompa.
6. Kondisi lingkungan selama pengujian dianggap konstan dan pengaruh kehilangan panas ke lingkungan diminimalkan dengan penggunaan isolasi termal.

1.4 Perumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang, identifikasi, dan pembatasan masalah yang telah dijelaskan, rumusan masalahnya adalah “Bagaimana performa TES berbasis media pasir dengan variasi PCM NaNO_3 dan KNO_3 dalam batang tabung vertikal?”

1.5 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Menganalisis pengaruh penambahan PCM NaNO_3 dan KNO_3 , serta geram *mixed metal* dalam sistem TES berbasis media pasir.
2. Menganalisis komposisi PCM yang optimal.
3. Menganalisis kinerja *thermal energy storage*.

1.6 Manfaat Penelitian

1.6.1 Bagi Penulis

Manfaat penelitian ini bagi penulis adalah sebagai berikut:

1. Memperdalam pemahaman mengenai konsep TES, khususnya sistem berbasis media pasir dan PCM.
2. Menambah pengalaman dalam perancangan, pembuatan, dan pengujian sistem TES secara eksperimental.
3. Meningkatkan kemampuan dalam menganalisis kinerja termal terkait kapasitas penyimpanan energi, dan efisiensi sistem.
4. Mengaplikasikan ilmu yang telah diperoleh selama perkuliahan ke dalam permasalahan nyata di bidang energi terbarukan.

1.6.2 Bagi Pembaca

Manfaat penelitian ini bagi pembaca adalah sebagai berikut:

1. Memberikan referensi terkait pengembangan sistem TES berbasis pasir dan PCM.
2. Menambah wawasan mengenai upaya peningkatan kinerja termal pada sistem penyimpanan energi.
3. Menjadi acuan bagi penelitian selanjutnya dalam mengembangkan sistem TES yang lebih sederhana, efisien, dan aplikatif.
4. Memberikan gambaran penerapan TES pada sistem pemanas air berbasis energi terbarukan.