

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang Masalah

Kebutuhan energi di Indonesia terus meningkat seiring pertumbuhan populasi, urbanisasi, dan industrialisasi. Berdasarkan data dari *Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral (ESDM 2023)*, konsumsi energi final nasional tumbuh rata-rata 3–5% per tahun, sementara pasokan minyak bumi domestik terus menurun. Produksi minyak Indonesia saat ini hanya sekitar 600 ribu barel per hari, jauh di bawah kebutuhan nasional yang mencapai lebih dari 1,6 juta barel per hari (*Energy Institute 2023*). Kondisi ini menyebabkan ketergantungan tinggi terhadap impor minyak, sehingga diperlukan upaya diversifikasi energi untuk menjaga ketahanan energi nasional.

Sebagai respons terhadap krisis energi dan perubahan iklim, Indonesia berkomitmen menuju *Net Zero Emission (NZE)* pada tahun 2060 sebagaimana dinyatakan dalam *Long-Term Strategy for Low Carbon and Climate Resilience (LTS-LCCR) 2050* yang disahkan oleh pemerintah. Komitmen ini menuntut peralihan dari energi fosil menuju energi hijau (*green energy*) seperti energi surya, panas bumi, biomassa, air, dan angin (International Energy Agency (IEA) 2022). Namun demikian, tantangan besar muncul karena sebagian besar sumber energi hijau bersifat intermiten — bergantung pada kondisi cuaca dan waktu. Energi surya misalnya, hanya efektif pada siang hari, sementara energi angin sangat bergantung pada kondisi atmosfer.

Keterbatasan ini dapat diatasi melalui pengembangan sistem penyimpanan energi (*energy storage system*), salah satunya berupa *thermal energy storage (TES)*. Sistem ini berfungsi menyimpan kelebihan energi dalam bentuk panas untuk digunakan saat dibutuhkan, misalnya pada sistem *solar water heater* atau pembangkit listrik tenaga surya. TES terbagi menjadi dua kategori utama, yakni *sensible heat storage* (penyimpanan kalor laten) dan *latent heat storage* (penyimpanan kalor peleburan).

Pada *sensible heat storage*, energi panas disimpan dengan menaikkan suhu material tanpa mengubah fasanya. Material yang umum digunakan antara lain air,

minyak, batu, dan pasir. Kelebihan metode ini adalah kesederhanaannya dan biaya rendah, namun kelemahannya terletak pada kapasitas penyimpanan energi yang relatif kecil (*Sharma et al. 2009*).

Sementara itu, *latent heat storage* menggunakan bahan perubahan fasa atau *phase change material (PCM)* seperti lilin parafin atau garam hidrat, yang memiliki densitas energi tinggi. Akan tetapi, PCM cenderung memiliki konduktivitas termal rendah dan stabilitas termal yang terbatas, serta memerlukan sistem pengemasan yang kompleks (*Zalba et al. 2003*).

Salah satu pendekatan yang menjanjikan untuk meningkatkan efisiensi TES adalah dengan menggunakan pasir sebagai media penyimpan panas. Pasir memiliki beberapa keunggulan: mudah diperoleh, murah, stabil pada suhu tinggi, dan ramah lingkungan (*Khare et al. 2013*). Namun, kelemahan utamanya adalah konduktivitas termal yang relatif rendah, sehingga perlu dilakukan upaya peningkatan melalui rekayasa komposisi dan ukuran partikel (*Tetteh et al. 2024*).

Indonesia memiliki kekayaan jenis pasir yang sangat beragam, antara lain pasir silika (SiO_2) di Bangka Belitung, pasir besi di pantai selatan Jawa, pasir vulkanik di daerah Merapi dan Bromo, pasir kuarsa di Kalimantan dan Sumatera, pasir gunung Banten putih dan hitam, serta pasir Malang (*Perhapi 2022*). Variasi komposisi kimia dan morfologi ini berpotensi mempengaruhi karakteristik termal pasir sebagai media penyimpanan energi panas. (*Purwanto et al. 2019*).

Menyadari potensi besar pasir sebagai media penyimpan energi, berbagai penelitian difokuskan untuk mengatasi kelemahan utamanya, yaitu konduktivitas termal yang rendah. Salah satu metode yang paling banyak diteliti adalah pembuatan komposit dengan cara mencampurkan pasir dengan material lain yang lebih konduktif. Pendekatan ini bertujuan menciptakan jalur perambatan panas yang lebih efisien di antara butiran pasir.

Optimasi media penyimpanan energi termal (TES) berbasis pasir sering kali berfokus pada modifikasi material untuk mengatasi konduktivitas termal yang rendah. (*Tetteh et al. 2024*) menggunakan pasir silika coklat dengan metode penambahan limbah serpihan logam melalui teknik *layering* (lapis) dan *uniform*

mixture (campuran seragam). Hasilnya, metode *layering* dengan kuningan memberikan peningkatan laju panas tertinggi (1,79 kali lipat), sedangkan metode campuran seragam dengan 20% volume aluminium meningkatkan laju panas sebesar 1,70 kali lipat. Namun, kelemahannya adalah penurunan kapasitas panas spesifik sistem secara keseluruhan karena logam menyimpan panas lebih sedikit dibanding pasir. Sejalan dengan itu, (Yousef et al. 2025) menggunakan pasir gurun (UAE) dengan campuran serutan tembaga (10-30%). Meskipun konduktivitas meningkat signifikan (~85%), studi ini juga mencatat penurunan kapasitas penyimpanan energi. Di sisi lain, (Ananth and Selvakumar 2025) berfokus pada pemilihan jenis pasir tanpa aditif, membandingkan *M-Sand* (Pasir Pabrik) dengan pasir sungai menggunakan penukar panas tipe *serpentine*. *M-Sand* terbukti unggul dengan konduktivitas 0.252 W/mK dan kapasitas panas 1024 J/kgK, namun metode ini hanya mengandalkan sifat alami pasir sehingga peningkatan perpindahan panasnya tidak seagresif metode komposit logam.

Dari aspek rekayasa struktural, (Niksiar et al. 2024) menggunakan pasir silika halus dan memodifikasi pipa pusat dengan sirip (*fins*) tembaga radial. Metode ini berhasil memangkas waktu pelepasan energi (*discharging*) hingga 78,50% pada konfigurasi 8 sirip dibandingkan tanpa sirip. Namun, pendekatan ini memerlukan fabrikasi pipa yang rumit dan mahal, serta tidak memperbaiki konduktivitas pada area pasir yang jauh dari sirip. Sementara itu, (Saini et al. 2025) menguji sistem *solar geyser* menggunakan pasir halus dengan pipa spiral (*circular heat exchanger*) berdiameter 0,5 inci pada debit rendah (0,67 LPM), yang menghasilkan efisiensi *discharging* 90%. Kekurangan dari studi ini adalah penggunaan pasir murni tanpa peningkatan konduktivitas, sehingga sangat bergantung pada durasi kontak air yang lama (debit sangat rendah) untuk menyerap panas. Terakhir, (Xia et al. 2025) menggabungkan PCM dan sirip pada tiang energi dengan pipa spiral yang menunjukkan distribusi suhu lebih seragam, namun penggunaan PCM (*Phase Change Material*) memiliki kompleksitas dan biaya yang jauh lebih tinggi dibandingkan sistem *Sensible Heat* berbasis pasir murni.

Dari penelitian sebelumnya, menunjukkan bahwa meskipun konduktivitas termal pasir yang rendah sehingga menjadi tantangan signifikan, terdapat berbagai strategi menjanjikan untuk mengatasinya melalui penambahan aditif konduktif terutama memanfaatkan material limbah dan melalui desain sistem yang cerdas. Namun demikian, perlu dicatat adanya pertimbangan dengan berkurangnya kapasitas panas spesifik dan pentingnya karakterisasi jenis pasir lokal yang spesifik. Oleh karena itu, penelitian yang mendalam mengenai optimalisasi metode peningkatan konduktivitas pada pasir lokal Indonesia untuk aplikasi spesifik seperti pemanas air tetap sangat relevan dan krusial. Meskipun penelitian-penelitian tersebut telah membuktikan keberhasilan berbagai metode peningkatan konduktivitas termal, studi yang mendalam mengenai perbandingan efektivitas metode-metode tersebut pada jenis pasir lokal Indonesia yang beragam masih terbatas. Selain itu, optimalisasi komposisi campuran untuk mencapai keseimbangan antara peningkatan konduktivitas termal dan penurunan kapasitas panas spesifik masih menjadi tantangan yang perlu dijawab.

Melihat celah penelitian di mana metode *layering* logam terbukti efektif meningkatkan konduktivitas namun belum dioptimalkan terhadap geometri pipa yang kompleks, serta penggunaan pipa spiral yang terbukti efisien namun sering terkendala oleh lambatnya suplai panas dari pasir murni, penelitian ini mengusulkan pendekatan hibrida baru. Oleh karena itu penelitian ini akan menerapkan metode *layering* serpihan tembaga yang disusun secara spesifik mengikuti geometri sistem: lapisan logam akan didistribusikan secara horizontal sejajar dengan pipa spiral *water heater* untuk memaksimalkan penyerapan panas oleh air, dan secara vertikal di sekeliling *water pipe* utama untuk mempercepat distribusi panas aksial dari sumber ke seluruh media penyimpanan.

1.2 Identifikasi Masalah

Berdasarkan penjelasan latar belakang yang telah disampaikan sebelumnya, peneliti dapat mengidentifikasi masalah berikut:

1. Pemanfaatan energi hijau di Indonesia belum optimal karena karakteristiknya yang intermiten

2. *Thermal Energy Storage* (TES) berbasis pasir memiliki konduktivitas termal efektif yang rendah.
3. Ada beragam macam pasir di Indonesia yang belum ada *propertiesnya*.
4. Semakin tinggi peningkatan konduktivitas termal efektif mengakibatkan penurunan kapasitas termal.
5. Upaya peningkatan konduktivitas termal efektif pasir melalui rekayasa material dan desain struktural telah diteliti, tetapi masih terbatas pada jenis pasir tertentu dan belum banyak diterapkan untuk pasir lokal Indonesia.

1.3 Pembatasan Masalah

Agar penelitian ini fokus dan dapat dilakukan secara sistematis, maka ruang lingkup penelitian dibatasi sebagai berikut:

1. Sistem diteliti adalah sistem penyimpanan energi panas untuk pengaplikasian *water heater*.
2. Metode peningkatan konduktivitas termal efektif pada TES berbasis pasir hanya menggunakan penambahan campuran 10% wt serpihan logam (baja karbon rendah dan aluminium).
3. Parameter yang diukur hanya meliputi laju pengisian energi, penyimpanan energi termal, pelepasan energi termal dan efisiensi pengisian kalor pada air.
4. Daya *heater* yang digunakan adalah 600 W

1.4 Perumusan Masalah

Berdasarkan identifikasi dan pembatasan masalah di atas, maka perumusan masalah dalam penelitian ini dapat dinyatakan sebagai berikut:

1. Bagaimana kinerja termal dari TES berbasis pasir?
2. Bagaimana pengaruh penambahan serpihan logam terhadap peningkatan kinerja termal TES berbasis pasir ?
3. Bagaimana pengaruh konfigurasi penataan serpihan logam terhadap kinerja termal TES berbasis pasir ?
4. Bagaimana efektivitas *water heater* pada TES ?

1.5 Tujuan Penelitian

Tujuan yang ingin dicapai dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Menganalisis kinerja TES berbasis pasir.
2. Menganalisis pengaruh penambahan serpihan logam terhadap kinerja TES pasir.
3. Menganalisis pengaruh konfigurasi penataan serpihan logam terhadap kinerja termal TES berbasis pasir.
4. Menganalisis efektivitas *water heater* pada TES.

1.6 Manfaat Penelitian

1. Sebagai literatur pada penelitian sejenis mengenai pengembangan teknologi khususnya di sistem TES(*Thermal Energy Storage*) berbasis pasir.
2. Sebagai informasi bagi pengembangan sistem penyimpanan energi panas yang dimanfaatkan untuk *Water Heater*.
3. Sebagai informasi untuk meningkatkan pengetahuan bagi peneliti dalam bidang pengujian sistem penyimpanan panas berbasis teknologi *Sand Thermal Energy Storage* (STES) dan *Water Heater* menggunakan *Coil*.