BAB VI
KESIMPULAN DAN SARAN

6.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil perancangan, pembuatan, pengujian, dan analisis prototipe *Thermal Energy Storage* berbasis pasir silika dengan sumber energi dari panel surya, diperoleh kesimpulan sebagai berikut.

1. Prototipe *Thermal Energy Storage* berbasis pasir silika telah berhasil dirancang dan dibangun dengan mengintegrasikan dua panel surya berkapasitas masing-masing 545 Wp, dua elemen pemanas bertegangan 42 V dan berdaya 500 W, pasir silika sebanyak 57 kg berukuran 30 sampai 50 mesh, dua thermocouple tipe K, serta isolasi berupa rockwool dan aluminium foil. Energi listrik dari panel surya disalurkan secara langsung menuju elemen pemanas dan dikonversi menjadi energi termal yang disimpan dalam pasir silika melalui mekanisme panas sensibel.
2. Sistem monitoring berbasis ESP32 dan Arduino Nano berhasil digunakan untuk membaca, mengolah, menampilkan, dan mencatat temperatur pasir, tegangan, arus, daya, serta indeks estimasi penyinaran. Data ditampilkan melalui LCD 20 × 4 dan Blynk, sedangkan pencatatan data dilakukan melalui *Google Spreadsheet* dengan interval lima menit. Blynk digunakan sebagai media monitoring daring dan tidak digunakan untuk mengendalikan proses pemanasan.
3. Pengembangan konfigurasi sistem memberikan pengaruh terhadap temperatur pasir. Konfigurasi pertama menghasilkan rata-rata temperatur maksimum sebesar 99,54°C dengan temperatur tertinggi 103,63°C. Konfigurasi kedua menghasilkan rata-rata temperatur maksimum sebesar 194,88°C dengan temperatur tertinggi 195,13°C. Konfigurasi ketiga menghasilkan rata-rata temperatur maksimum sebesar 203,63°C dengan temperatur tertinggi 230,13°C. Hasil tersebut menunjukkan bahwa penambahan panel surya dan elemen pemanas meningkatkan kemampuan pemanasan, sedangkan konfigurasi ketiga menghasilkan temperatur tertinggi dari seluruh pengujian.

4. Pasir silika mampu mempertahankan sebagian energi termal setelah daya yang diterima elemen pemanas menurun hingga mendekati nol. Konfigurasi pertama mempertahankan temperatur pagi rata-rata sebesar 41,88°C, konfigurasi kedua sebesar 84,29°C, dan konfigurasi ketiga sebesar 100,09°C. Berdasarkan asumsi temperatur lingkungan sebesar 28°C, konstanta pendinginan konfigurasi pertama, kedua, dan ketiga masing-masing sebesar 0,102 jam^{-1}, 0,072 jam^{-1}, dan 0,052 jam^{-1}. Konstanta pendinginan konfigurasi ketiga lebih rendah 27,78% dibandingkan konfigurasi kedua, yang menunjukkan bahwa pemasangan rockwool dan aluminium foil pada seluruh sisi, termasuk bagian penutup, membantu memperlambat pelepasan panas.
5. Data panel referensi menunjukkan hubungan positif antara kondisi penyinaran dan daya panel utama. Koefisien korelasi Pearson pada 1 sampai 3 Agustus 2026 berada pada rentang 0,963 sampai 0,992, sehingga peningkatan indeks estimasi penyinaran cenderung diikuti oleh peningkatan daya panel. Namun, data panel referensi belum dapat dinyatakan sebagai iradiasi matahari absolut karena belum dikalibrasi menggunakan piranometer atau *solar power meter*. Daya maksimum pada periode operasi yang relatif stabil tercatat sebesar 683,31 W, setara dengan 62,69% dari kapasitas nominal gabungan panel sebesar 1.090 Wp. Persentase tersebut merupakan rasio daya operasi terhadap kapasitas nominal, bukan efisiensi konversi panel surya.
6. Efisiensi penyimpanan energi termal dihitung dengan membandingkan energi termal yang tersimpan pada pasir terhadap energi listrik yang diterima elemen pemanas dalam interval waktu yang sama. Berdasarkan perhitungan awal, energi listrik masukan sebesar 4.099 Wh dan energi termal pasir sebesar 1.703,49 Wh menghasilkan estimasi efisiensi penyimpanan sebesar 41,56%. Nilai tersebut merupakan estimasi efisiensi pengisian pada konfigurasi ketiga, bukan efisiensi keseluruhan sistem. Nilainya masih dipengaruhi oleh ketelitian sensor tegangan dan arus, interval pencatatan lima menit, penggunaan kapasitas panas spesifik pasir yang dianggap konstan, serta keterbatasan dua titik pengukuran temperatur. Nilai 4.099 Wh hanya dapat dipertahankan

apabila hasil integrasinya telah diverifikasi menggunakan data daya dan temperatur pada interval waktu yang sama.

6.2 Saran

Berdasarkan hasil dan keterbatasan penelitian, beberapa saran yang dapat diterapkan pada pengembangan selanjutnya adalah sebagai berikut.

1. Penelitian selanjutnya disarankan menambah thermocouple pada beberapa posisi dan kedalaman, menggunakan piranometer atau *solar power meter*, mencatat temperatur lingkungan, mengalibrasi sensor tegangan dan arus, menyempurnakan isolasi termal, serta melakukan pengujian pelepasan panas menuju oven atau alat pengering agar distribusi temperatur, kehilangan panas, dan efisiensi pemanfaatan energi dapat dianalisis dengan lebih akurat.
2. Seluruh sensor perlu dikalibrasi menggunakan alat ukur referensi yang memiliki ketelitian lebih tinggi. Kalibrasi perlu dilakukan terhadap thermocouple, sensor tegangan, sensor arus, dan perangkat pengukuran radiasi matahari. Langkah tersebut diperlukan untuk mengurangi ketidakpastian pengukuran serta mencegah munculnya nilai yang tidak sesuai dengan karakteristik nominal panel dan elemen pemanas.
3. Kualitas isolasi termal masih perlu ditingkatkan, terutama pada bagian penutup, terminal elemen pemanas, lubang thermocouple, sambungan *coil*, baut pengikat, dan sambungan antara penutup dengan badan tabung. Bagian tersebut berpotensi menjadi jalur kehilangan panas dan membentuk jembatan termal antara bagian dalam sistem dengan lingkungan. Penggunaan gasket tahan temperatur juga dapat dipertimbangkan untuk meningkatkan kerapatan sambungan penutup.
4. Pengujian selanjutnya perlu mencatat temperatur lingkungan dan temperatur permukaan tabung secara bersamaan dengan temperatur pasir. Pengukuran temperatur lingkungan diperlukan untuk menganalisis retensi panas dengan acuan yang lebih tepat. Sementara itu, pengukuran temperatur permukaan dapat digunakan untuk mengidentifikasi bagian konstruksi yang mengalami kehilangan panas paling besar.

5. Pengujian antarkonfigurasi sebaiknya dilakukan pada kondisi awal yang sama, meliputi massa pasir, temperatur awal pasir, durasi pemanasan, posisi sensor, interval pencatatan data, serta kondisi lingkungan. Pengujian yang lebih terkontrol akan membantu memisahkan pengaruh jumlah panel, jumlah elemen pemanas, dan susunan isolasi terhadap kinerja termal sistem.
6. Sistem panel surya dapat dikembangkan dengan menggunakan MPPT agar panel bekerja lebih dekat dengan titik daya maksimum pada berbagai kondisi radiasi. Penggunaan MPPT perlu disesuaikan dengan tegangan operasi dan karakteristik resistansi elemen pemanas. Selain itu, sistem perlu dilengkapi dengan sekering DC, pemutus arus, proteksi tegangan dan arus berlebih, serta sistem penghentian darurat untuk meningkatkan keamanan pengoperasian.
7. Perhitungan energi termal selanjutnya sebaiknya memasukkan energi yang diserap oleh tabung, penutup, elemen pemanas, *coil* tembaga, dan komponen logam lainnya. Kapasitas panas spesifik pasir juga dapat diuji secara langsung atau menggunakan nilai yang berubah terhadap temperatur. Dengan demikian, neraca energi dan efisiensi penyimpanan panas dapat dihitung secara lebih lengkap dan akurat.
8. Sistem pencatatan data perlu dilengkapi dengan penyimpanan lokal sebagai cadangan apabila koneksi internet terputus. Program juga dapat dikembangkan dengan menambahkan identitas pengujian, status pengiriman data, dan peringatan otomatis ketika pembacaan sensor mengalami perubahan yang tidak wajar. Pengembangan tersebut akan meningkatkan keandalan dan memudahkan proses validasi data.
9. Pengujian jangka panjang perlu dilakukan untuk mengetahui kestabilan pasir silika, elemen pemanas, thermocouple, gasket, rockwool, aluminium foil, dan sambungan mekanis setelah mengalami siklus pemanasan dan pendinginan secara berulang. Pengujian tersebut juga dapat digunakan untuk mengetahui perubahan kinerja sistem setelah digunakan dalam jangka waktu tertentu.
10. Pengembangan prototipe pada kapasitas yang lebih besar perlu mempertimbangkan perbandingan antara massa pasir, daya elemen pemanas, luas permukaan tabung, ketebalan isolasi, dan temperatur operasi. Penambahan

massa pasir tanpa peningkatan daya pemanas akan memperpanjang waktu pengisian energi termal. Oleh karena itu, peningkatan kapasitas sistem harus dilakukan melalui perancangan termal dan kelistrikan yang seimbang.