

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Kebutuhan energi terus meningkat seiring dengan pertumbuhan penduduk, perkembangan teknologi, dan peningkatan aktivitas industri. Sebagian kebutuhan energi global masih dipenuhi melalui sumber energi fosil, seperti batu bara, minyak bumi, dan gas alam. Pemanfaatan sumber energi tersebut berkaitan dengan keterbatasan cadangan dan emisi gas rumah kaca. Kondisi ini mendorong pengembangan sumber energi terbarukan yang lebih bersih, berkelanjutan, dan dapat dimanfaatkan dalam jangka panjang [1], [2].

Salah satu sumber energi terbarukan yang mempunyai potensi besar untuk dikembangkan di Indonesia adalah energi surya. Letak geografis Indonesia di sekitar garis khatulistiwa menyebabkan sebagian besar wilayah Indonesia memperoleh penyinaran matahari sepanjang tahun. Potensi energi surya di Indonesia mencapai rata-rata sekitar 4,8 kWh/m²/hari. Energi matahari dapat dimanfaatkan menggunakan panel fotovoltaik yang mengubah radiasi matahari menjadi energi listrik. Teknologi tersebut dapat digunakan untuk memenuhi kebutuhan penerangan, peralatan elektronik, pemanas listrik, dan proses termal pada sektor pertanian maupun industri [2]–[4].

Panel surya memiliki beberapa keunggulan, yaitu tidak membutuhkan bahan bakar selama pengoperasian, tidak menghasilkan emisi langsung, memiliki kebutuhan perawatan relatif rendah, dan dapat diterapkan secara terdesentralisasi. Sistem panel surya juga dapat dipasang di wilayah yang belum memperoleh akses jaringan listrik secara memadai. Namun, pemanfaatan panel surya memiliki keterbatasan utama berupa keluaran energi yang berubah terhadap waktu [2], [3].

Energi listrik yang dihasilkan panel surya dipengaruhi oleh radiasi matahari, posisi matahari, sudut pemasangan panel, temperatur permukaan panel, tutupan awan, karakteristik beban, dan kondisi lingkungan. Panel menghasilkan daya relatif rendah pada pagi dan sore hari, mencapai keluaran yang tinggi menjelang siang, serta tidak menghasilkan daya pada malam hari. Perubahan kondisi penyinaran

dalam waktu singkat juga dapat menyebabkan tegangan, arus, dan daya panel mengalami fluktuasi [2], [3].

Karakteristik tersebut menyebabkan energi surya dikategorikan sebagai sumber energi intermiten. Energi listrik hanya tersedia ketika panel memperoleh radiasi matahari yang memadai, sedangkan kebutuhan energi dapat berlangsung di luar periode penyinaran. Ketidaksesuaian antara waktu produksi dan pemanfaatan energi menjadi salah satu permasalahan utama dalam penerapan sistem energi surya [1], [5].

Penggunaan panel surya yang dihubungkan langsung dengan beban menyebabkan kondisi operasi beban mengikuti perubahan keluaran panel. Ketika radiasi matahari meningkat, daya yang diterima beban cenderung bertambah. Sebaliknya, ketika radiasi menurun akibat tutupan awan atau perubahan waktu, daya yang diterima beban ikut berkurang. Kondisi ini menjadi kendala bagi beban yang membutuhkan suplai energi secara berkelanjutan atau temperatur operasi yang relatif stabil [2], [3].

Permasalahan intermitensi energi surya dapat dikurangi menggunakan sistem penyimpanan energi. Energi yang dihasilkan selama periode penyinaran dapat disimpan dan dimanfaatkan kembali ketika keluaran panel surya menurun. Salah satu teknologi yang banyak digunakan pada sistem fotovoltaiik adalah baterai elektrokimia [1], [5].

Baterai elektrokimia dapat menyimpan energi listrik dan mengeluarkannya kembali sesuai kebutuhan. Namun, penerapannya memiliki beberapa keterbatasan, seperti penurunan kapasitas selama penggunaan, umur siklus yang terbatas, kebutuhan sistem pengelolaan baterai, dan persoalan pengolahan material pada akhir masa pakai. Baterai juga membutuhkan pengendalian proses pengisian dan pengosongan agar tidak mengalami pengisian berlebih, pengosongan berlebih, maupun peningkatan temperatur yang dapat menurunkan umur penggunaannya [1], [6].

Pada sistem yang tujuan akhirnya berupa pemanfaatan panas, penyimpanan energi listrik menggunakan baterai elektrokimia menghasilkan tahapan konversi energi yang lebih panjang. Energi listrik dari panel disimpan terlebih dahulu di

dalam baterai, dikeluarkan kembali sebagai energi listrik, kemudian diubah menjadi energi panas oleh elemen pemanas. Setiap tahapan konversi tersebut berpotensi menghasilkan rugi-rugi energi [1], [5].

Alternatif yang dapat diterapkan adalah menyimpan energi secara langsung dalam bentuk panas menggunakan teknologi *Thermal Energy Storage* atau TES. TES merupakan teknologi yang memungkinkan energi termal disimpan ketika sumber energi tersedia dan dimanfaatkan kembali ketika diperlukan. Berdasarkan mekanisme penyimpanannya, TES dapat dibedakan menjadi penyimpanan panas sensibel, penyimpanan panas laten, dan penyimpanan termokimia [1], [5], [7].

Penyimpanan panas sensibel bekerja dengan meningkatkan temperatur suatu material tanpa menyebabkan perubahan fase. Besarnya energi termal yang dapat disimpan bergantung pada massa material, kapasitas panas spesifik, dan perubahan temperatur material [1], [8].

Hubungan antara massa material, kapasitas panas spesifik, dan perubahan temperatur dinyatakan melalui persamaan berikut:

$$Q = m c_p \Delta T$$

Keterangan:

Q = energi termal yang tersimpan (J)

m = massa material penyimpanan panas (kg)

c_p = kapasitas panas spesifik material (J/kgK)

ΔT = perubahan temperatur material (K atau °C)

Nilai perubahan temperatur dapat dinyatakan dalam kelvin atau derajat Celsius karena selisih satu derajat Celsius memiliki nilai yang sama dengan selisih satu kelvin.

Salah satu material yang berpotensi digunakan sebagai media penyimpanan panas sensibel adalah pasir silika. Pasir silika tersedia secara relatif melimpah, memiliki biaya material yang rendah, dan menunjukkan kestabilan pada rentang temperatur yang luas. Pengujian siklus termal terhadap partikel silika juga menunjukkan perubahan yang terbatas pada distribusi partikel dan struktur kristalnya, sehingga material tersebut berpotensi digunakan sebagai media penyimpanan energi termal padat [6], [9], [10].

Pasir silika menyimpan energi termal melalui peningkatan temperatur partikel-partikelnya. Panas dari elemen pemanas berpindah menuju pasir melalui mekanisme konduksi. Selanjutnya, panas menyebar melalui kontak antarpartikel dan udara di dalam rongga media granular, kemudian tersimpan sebagai energi internal. Setelah sumber pemanas berhenti bekerja, pasir melepaskan panas secara bertahap menuju bagian lain dari sistem dan lingkungan [8]–[10].

Kemampuan pasir dalam menyimpan dan mempertahankan panas dipengaruhi oleh massa pasir, kapasitas panas spesifik, temperatur awal, temperatur maksimum, ukuran partikel, kepadatan curah, posisi elemen pemanas, dan kualitas isolasi termal. Semakin besar massa media dan perubahan temperatur, semakin besar energi termal yang dapat disimpan. Akan tetapi, peningkatan temperatur juga memperbesar perbedaan temperatur antara sistem dan lingkungan sehingga meningkatkan kecenderungan pelepasan panas [1], [8]–[10].

Isolasi termal menjadi bagian penting dalam perancangan *thermal energy storage*. Tanpa hambatan termal yang memadai, panas dari pasir akan berpindah menuju lingkungan melalui konduksi pada dinding tabung, konveksi dari permukaan luar, dan radiasi termal. Kehilangan panas tersebut menurunkan temperatur media serta mengurangi energi termal yang dapat dipertahankan [8]. Rockwool dapat digunakan sebagai material isolasi untuk meningkatkan hambatan perpindahan panas pada tabung penyimpanan. Aluminium foil dapat digunakan sebagai lapisan reflektif untuk membantu mengurangi pertukaran panas melalui radiasi sekaligus melindungi permukaan rockwool. Efektivitas isolasi dipengaruhi oleh konduktivitas termal material, ketebalan lapisan, luas permukaan, kualitas pemasangan, dan keberadaan jembatan termal pada sambungan konstruksi [8].

Penelitian terdahulu telah menunjukkan potensi penggunaan pasir sebagai media penyimpanan energi termal. Niksiar et al. menguji pasir silika halus dan kasar pada sistem penyimpanan panas sensibel serta menemukan bahwa ukuran partikel dan penambahan sirip tembaga memengaruhi waktu pengisian dan pelepasan panas. Penggunaan delapan sirip radial mampu mengurangi waktu pengisian sebesar 63,74% serta waktu pelepasan panas sebesar 78,5% dibandingkan konfigurasi tanpa sirip [10].

Davenport et al. melakukan pengujian stabilitas partikel silika melalui perlakuan termal selama 500 jam dan siklus temperatur antara 300°C sampai 1.200°C. Hasil penelitian tersebut memperlihatkan perubahan yang terbatas pada distribusi partikel dan struktur kristal silika, sehingga pasir silika dinilai berpotensi sebagai media penyimpanan energi termal padat [9].

Saini et al. mengembangkan sistem pemanas berbasis fotovoltaik dengan pasir kasar sebagai media penyimpanan panas. Energi listrik dari panel fotovoltaik dikonversi menjadi panas menggunakan elemen pemanas resistif, kemudian disimpan di dalam pasir melalui konduksi. Sistem tersebut menghasilkan efisiensi pengisian sebesar 72,37% pada hari pertama dan 66,52% pada hari kedua pengujian [12].

Penelitian terdahulu menunjukkan bahwa ukuran partikel, luas permukaan penghantar panas, temperatur operasi, dan komposisi media berpengaruh terhadap proses penyimpanan serta pelepasan energi termal. Namun, sebagian penelitian berfokus pada sistem berskala besar, pembangkit surya terkonsentrasi, pemodelan, atau penggunaan fluida pemindah panas. Berdasarkan literatur yang ditinjau, kajian eksperimental mengenai prototipe *sand battery* skala laboratorium yang menerima energi listrik secara langsung dari panel surya dan dikembangkan menggunakan komponen yang tersedia secara lokal masih terbatas [6], [9]–[12].

Selain itu, karakteristik sistem tanpa baterai elektrokimia dan tanpa *Maximum Power Point Tracking* perlu diamati secara eksperimental. Pada sistem tersebut, panel surya dihubungkan langsung dengan elemen pemanas sehingga titik operasi sistem dipengaruhi oleh radiasi matahari, temperatur modul, konfigurasi kelistrikan panel, dan karakteristik resistansi elemen pemanas. Perubahan daya panel selanjutnya memengaruhi panas yang dihasilkan dan kenaikan temperatur pasir [2], [3], [12].

Pengujian terhadap beberapa konfigurasi diperlukan untuk mengetahui pengaruh jumlah panel surya, jumlah elemen pemanas, dan susunan isolasi terhadap kinerja sistem. Parameter yang dapat digunakan untuk mengevaluasi kinerja meliputi tegangan, arus, daya, radiasi matahari, temperatur maksimum pasir,

kenaikan temperatur, penurunan temperatur saat pendinginan, laju pendinginan, energi termal tersimpan, dan efisiensi penyimpanan energi termal [1], [10], [12].

Penelitian ini mengembangkan prototipe *thermal energy storage* berbasis pasir silika menggunakan konstruksi tabung berlapis. Tabung dalam digunakan sebagai tempat pasir silika, elemen pemanas, *coil* tembaga, dan thermocouple, sedangkan tabung luar digunakan untuk melindungi material isolasi. Media penyimpanan yang digunakan berupa pasir silika sebanyak 57 kg dengan ukuran partikel 30 sampai 50 mesh.

Sistem menggunakan dua panel surya monokristalin yang dihubungkan secara seri sebagai sumber energi utama. Konfigurasi seri digunakan untuk meningkatkan tegangan keluaran total agar sesuai dengan kebutuhan elemen pemanas [2], [3], [13]. Energi listrik yang dihasilkan panel surya kemudian disalurkan secara langsung menuju elemen pemanas untuk dikonversi menjadi energi termal dan disimpan di dalam pasir silika.

Energi listrik dari panel disalurkan secara langsung menuju dua elemen pemanas dengan spesifikasi masing-masing 42 V dan 500 W. Kedua elemen pemanas dihubungkan secara seri sehingga memiliki tegangan nominal total sebesar 84 V dan daya nominal total sebesar 1.000 W.

Elemen pemanas ditempatkan secara vertikal di dalam media pasir agar permukaan pemanas mempunyai bidang kontak termal yang luas. Energi listrik dari panel dikonversi menjadi panas pada elemen resistif melalui efek Joule. Panas kemudian berpindah dari permukaan elemen pemanas menuju pasir silika dan disimpan dalam bentuk panas sensibel [8].

Sistem menggunakan dua thermocouple tipe K pada dua titik pengukuran untuk memantau perubahan temperatur pasir. Setiap thermocouple terhubung dengan modul MAX6675. Modul tersebut menyediakan kompensasi sambungan dingin, konversi digital 12-bit, resolusi temperatur 0,25°C, dan antarmuka komunikasi yang kompatibel dengan SPI [14].

Data kedua sensor diolah menjadi temperatur rata-rata untuk menunjukkan kecenderungan temperatur media secara umum. Perbedaan hasil pembacaan kedua sensor digunakan untuk mengamati kondisi temperatur pada dua lokasi di dalam

tabung. Namun, dua titik pengukuran belum dapat mewakili distribusi temperatur seluruh volume pasir.

Sistem monitoring menggunakan ESP32 dan Arduino Nano. Parameter yang dicatat meliputi temperatur pasir, tegangan panel, arus panel, daya listrik, dan radiasi matahari. ESP32 mendukung komunikasi UART, SPI, I²C, serta konektivitas Wi-Fi yang digunakan dalam proses pembacaan perangkat dan pengiriman data hasil pengujian [15].

Data pengukuran dikirimkan secara berkala menuju *spreadsheet* melalui jaringan Wi-Fi sehingga perubahan kondisi sistem dapat diamati dan dianalisis berdasarkan waktu. Pengiriman data menggunakan fungsi `Gsheet_Boot` untuk mengirimkan informasi awal ketika sistem diaktifkan dan `Gsheet_Battery` untuk mengirimkan data sensor serta hasil perhitungan selama proses pengisian energi termal pada pasir silika.

Pengembangan prototipe dilakukan melalui tiga konfigurasi pengujian. Konfigurasi pertama menggunakan satu panel surya dan satu elemen pemanas dengan gasket serta rockwool pada bagian penutup. Konfigurasi kedua menggunakan dua panel surya dan dua elemen pemanas dengan rockwool serta aluminium foil pada sisi tabung, tetapi penutup belum memperoleh isolasi secara menyeluruh. Konfigurasi ketiga menggunakan dua panel surya dan dua elemen pemanas dengan rockwool serta aluminium foil pada seluruh sisi, termasuk bagian penutup.

Tahapan pengembangan tersebut dilakukan untuk mengetahui perubahan kinerja pemanasan dan penyimpanan panas. Penambahan panel surya dan elemen pemanas diharapkan meningkatkan energi yang diterima pasir, sedangkan penyempurnaan isolasi diharapkan mengurangi kehilangan panas menuju lingkungan.

Konfigurasi ketiga juga menunjukkan kemampuan penyimpanan panas yang lebih baik. Setelah mengalami pendinginan selama kurang lebih 16 jam, temperatur rata-rata yang masih dipertahankan hingga pagi hari mencapai 100,09°C. Hasil tersebut menunjukkan bahwa pasir silika tidak langsung

melepaskan seluruh panas setelah daya panel menurun, tetapi melepaskannya secara bertahap selama periode malam.

Berdasarkan perhitungan energi, energi listrik masukan selama periode pengujian mencapai 4.099 Wh. Kenaikan temperatur 57 kg pasir silika menghasilkan energi termal tersimpan sebesar 1.703,49 Wh. Perbandingan kedua nilai tersebut menghasilkan efisiensi penyimpanan energi termal sebesar 41,56%. Nilai tersebut menunjukkan persentase energi listrik masukan yang terhitung sebagai kenaikan energi termal pada pasir silika.

Sebagian energi yang belum terhitung sebagai energi termal pasir digunakan untuk meningkatkan temperatur elemen pemanas, tabung, penutup, *coil* tembaga, dan komponen konstruksi lainnya. Sebagian panas juga dilepaskan menuju lingkungan melalui dinding, sambungan, lubang thermocouple, terminal elemen pemanas, dan saluran pipa. Oleh karena itu, penyempurnaan isolasi dan pengurangan jalur kehilangan panas menjadi aspek penting dalam pengembangan sistem berikutnya.

Berdasarkan permasalahan intermitensi energi surya, keterbatasan penyimpanan elektrokimia untuk kebutuhan akhir berupa panas, potensi pasir silika sebagai media penyimpan panas, serta kebutuhan validasi prototipe secara eksperimental, penelitian ini berfokus pada perancangan dan pengujian sistem penyimpanan energi termal berbasis pasir silika dengan sumber energi langsung dari panel surya. Penelitian ini diharapkan dapat memberikan dasar teknis bagi pengembangan sistem penyimpanan panas yang sederhana, tahan terhadap temperatur tinggi, serta dapat dibuat menggunakan komponen yang tersedia secara lokal.

Dengan demikian, penelitian ini dilaksanakan dengan judul **“Rancang Bangun *Thermal Energy Storage* sebagai Penyimpanan Energi Berbasis *Solar Panel*.”**

1.2 Perumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah dijelaskan sebelumnya, maka rumusan masalah dalam penelitian ini dapat dirumuskan sebagai berikut:

1. Bagaimana merancang dan membangun prototipe *Thermal Energy Storage* berbasis pasir silika yang mengintegrasikan panel surya, elemen pemanas, isolasi termal, sensor temperatur, dan perangkat pendukung dalam satu sistem?
2. Bagaimana mengimplementasikan sistem monitoring berbasis ESP32, Arduino Nano, *Google Spreadsheet*, dan Blynk untuk mengukur, menampilkan, serta mencatat temperatur pasir, tegangan, arus, daya, dan estimasi iradiasi matahari?
3. Bagaimana pengaruh perubahan jumlah panel surya, jumlah elemen pemanas, dan susunan isolasi termal terhadap kenaikan temperatur pasir silika?
4. Bagaimana kemampuan pasir silika dalam mempertahankan panas setelah daya yang diterima elemen pemanas menurun hingga mendekati nol?
5. Bagaimana hubungan antara radiasi matahari dan daya listrik yang dihasilkan panel surya selama proses pengisian energi termal?

1.3 Tujuan Tugas Akhir

Dari rumusan masalah yang telah ditetapkan, tujuan dari pembuatan Tugas Akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Merancang dan membangun prototipe *Thermal Energy Storage* berbasis pasir silika yang mengintegrasikan panel surya, elemen pemanas, isolasi termal, sensor temperatur, dan perangkat pendukung dalam satu sistem.
2. Mengimplementasikan sistem monitoring berbasis ESP32, Arduino Nano, *Google Spreadsheet*, dan Blynk untuk mengukur, menampilkan, serta mencatat temperatur pasir, tegangan, arus, daya, dan estimasi iradiasi matahari.
3. Menganalisis pengaruh perubahan jumlah panel surya, jumlah elemen pemanas, dan susunan isolasi termal terhadap kenaikan temperatur pasir silika.
4. Menganalisis kemampuan pasir silika dalam mempertahankan panas berdasarkan temperatur akhir dan laju penurunan temperatur setelah daya elemen pemanas menurun hingga mendekati nol.
5. Menganalisis hubungan antara radiasi matahari dan daya listrik yang dihasilkan panel surya selama proses pengisian energi termal.
6. Menghitung energi termal yang tersimpan dalam pasir silika dan menentukan efisiensi penyimpanan energi termal berdasarkan energi listrik masukan.

1.4 Manfaat Tugas Akhir

1.4.1 Manfaat Teoritis

Secara teoretis, penelitian ini memberikan manfaat sebagai berikut.

1. Menambah referensi mengenai penerapan *Thermal Energy Storage* berbasis panas sensibel dengan pasir silika sebagai media penyimpanan energi termal.
2. Memberikan pemahaman mengenai proses konversi energi listrik dari panel surya menjadi energi panas melalui elemen pemanas.
3. Memberikan informasi mengenai hubungan antara massa pasir, kapasitas panas spesifik, perubahan temperatur, dan energi termal yang tersimpan.
4. Memberikan gambaran mengenai pengaruh jumlah panel surya dan elemen pemanas terhadap karakteristik pemanasan pasir silika.
5. Memberikan pemahaman mengenai pengaruh isolasi termal terhadap laju penurunan temperatur dan kemampuan media dalam mempertahankan panas.
6. Menambah kajian mengenai hubungan antara radiasi matahari, tegangan, arus, dan daya pada sistem panel surya yang terhubung langsung dengan beban pemanas.
7. Menjadi dasar bagi penelitian selanjutnya mengenai optimasi media penyimpanan panas, isolasi termal, posisi elemen pemanas, distribusi temperatur, dan efisiensi penyimpanan energi termal.

1.4.2 Manfaat Praktis

Secara praktis, penelitian ini memberikan manfaat sebagai berikut.

1. Menghasilkan prototipe *Thermal Energy Storage* berbasis pasir silika yang menggunakan energi listrik dari panel surya.
2. Memberikan rancangan penyimpanan energi termal menggunakan material yang relatif mudah diperoleh, tahan terhadap temperatur tinggi, dan dapat digunakan kembali.
3. Membantu menyimpan sebagian energi yang dihasilkan panel surya dalam bentuk panas sehingga tidak seluruhnya harus digunakan secara langsung saat tersedia.

4. Memberikan acuan teknis mengenai penggunaan panel surya, elemen pemanas, pasir silika, rockwool, aluminium foil, thermocouple, dan perangkat monitoring pada prototipe penyimpanan panas.
5. Menghasilkan sistem monitoring yang dapat menampilkan kondisi prototipe secara langsung melalui LCD dan Blynk serta mencatat data pengujian secara berkala ke dalam *Google Spreadsheet*.
6. Memudahkan pengguna dalam memantau temperatur pasir, tegangan, arus, daya, dan estimasi iradiasi matahari melalui perangkat seluler tanpa harus mengamati prototipe secara langsung.
7. Memberikan data eksperimental mengenai temperatur maksimum, penurunan temperatur, laju pendinginan, energi termal tersimpan, dan efisiensi penyimpanan panas.
8. Menjadi acuan awal dalam pengembangan sistem penyimpanan energi termal dengan kapasitas lebih besar untuk aplikasi pemanasan dan proses termal.

1.5 Batasan Masalah

Agar penelitian yang dilakukan lebih terarah dan tidak melebar dari tujuan yang telah ditetapkan, maka penelitian ini dibatasi oleh beberapa ruang lingkup sebagai berikut:

1. Penelitian berfokus pada prototipe TES skala laboratorium.
2. Sistem memakai pasir silika sebagai media penyimpanan panas sensibel.
3. Panel surya berfungsi sebagai sumber energi utama sistem.
4. Elemen pemanas mengubah energi listrik dari sistem panel surya menjadi energi termal.
5. Penelitian membahas proses pengisian dan pelepasan energi termal pada media pasir silika.
6. Sistem memakai thermocouple tipe K dan MAX6675 untuk mengukur temperatur.
7. ESP32 berfungsi membaca temperatur pasir melalui modul MAX6675, membaca parameter panel referensi melalui INA219, menerima data dari Arduino Nano, mengolah data, mengelola LCD dan keypad, serta mengirimkan

hasil pengukuran menuju Blynk dan *Google Spreadsheet* melalui jaringan Wi-Fi.

8. Arduino Nano berfungsi membaca sensor tegangan dan sensor arus ACS712, kemudian mengirimkan hasil pembacaan menuju ESP32 melalui komunikasi UART.
9. Blynk digunakan sebagai media monitoring dan tidak digunakan untuk mengendalikan elemen pemanas maupun proses pemanasan pasir silika.
10. Pengujian meliputi waktu pemanasan, laju penurunan temperatur, kapasitas energi termal, kehilangan panas, dan efisiensi termal.
11. Sistem monitoring menggunakan Blynk untuk menampilkan data pengukuran secara langsung melalui perangkat seluler, sedangkan *Google Spreadsheet* digunakan untuk mencatat dan menyimpan data pengujian.
12. Penelitian tidak menjalankan analisis siklus hidup material secara menyeluruh.
13. Penelitian tidak menjalankan analisis ekonomi skala industri secara terperinci.
14. Penelitian tidak membahas penyimpanan energi menggunakan baterai elektrokimia sebagai objek utama.

1.6 Sistematika Tugas Akhir

Sistematika penulisan tugas akhir ini disusun untuk memberikan gambaran mengenai urutan pembahasan penelitian secara menyeluruh. Laporan tugas akhir terdiri atas enam bab yang saling berkaitan, mulai dari pendahuluan, landasan teori, perancangan tugas akhir, pembuatan alat, pengujian dan analisis alat, hingga kesimpulan dan saran. Sistematika penulisan tugas akhir dijelaskan sebagai berikut.

BAB I PENDAHULUAN

BAB I membahas latar belakang pengembangan *Thermal Energy Storage* berbasis pasir silika dengan panel surya sebagai sumber energi. Pembahasan mencakup karakteristik energi surya, kebutuhan penyimpanan energi, potensi pasir silika sebagai media penyimpanan panas sensibel, serta pengembangan prototipe yang dilakukan dalam penelitian. Bab ini juga memuat perumusan masalah, tujuan tugas akhir, manfaat tugas akhir, batasan masalah, dan sistematika tugas akhir.

BAB II LANDASAN TEORI

BAB II memuat tinjauan pustaka dan dasar teori yang mendukung penelitian. Tinjauan pustaka membahas penelitian terdahulu mengenai *Thermal Energy Storage*, pasir silika sebagai media penyimpanan panas sensibel, pemanfaatan panel surya sebagai sumber energi pemanasan, serta perbandingan baterai elektrokimia dengan penyimpanan energi termal.

Dasar teori membahas energi surya, *Thermal Energy Storage*, pasir silika, catu daya, ESP32, Arduino Nano, sensor tegangan, sensor arus ACS712, INA219, resistor kapur, panel surya monokristalin, elemen pemanas, thermocouple tipe K, modul MAX6675, *step-down converter*, LCD 20×4 , dan keypad 4×4 .

BAB III PERANCANGAN TUGAS AKHIR

BAB III membahas tahapan perancangan prototipe yang terdiri atas perancangan perangkat keras dan perangkat lunak. Perancangan perangkat keras mencakup tabung dalam, tabung luar, penempatan elemen pemanas, penempatan thermocouple, penutup tabung, material isolasi, rancangan mekanikal akhir, diagram skematik, dan rancangan PCB.

Perancangan perangkat lunak membahas alur kerja sistem, pembacaan sensor, komunikasi antara ESP32 dan Arduino Nano, pengolahan data, antarmuka LCD dan keypad, rancangan pencatatan data menuju *Google Spreadsheet*, serta rancangan monitoring menggunakan Blynk.

BAB IV PEMBUATAN ALAT

BAB IV membahas proses realisasi rancangan perangkat keras dan perangkat lunak. Pembuatan perangkat keras mencakup fabrikasi komponen mekanikal, pemasangan elemen pemanas, pengisian pasir silika, pemasangan rockwool dan aluminium foil, pembuatan sistem elektrik, *wiring diagram*, serta perakitan PCB. Pembuatan perangkat lunak membahas inisialisasi program, koneksi Wi-Fi, pembacaan sensor, komunikasi antara ESP32 dan Arduino Nano, proses perhitungan, antarmuka pengguna, pengiriman data menuju *Google Spreadsheet*, serta implementasi monitoring melalui Blynk.

BAB V PENGUJIAN DAN ANALISIS ALAT

BAB V membahas prosedur, hasil, dan analisis pengujian prototipe. Pengujian dilakukan menggunakan tiga konfigurasi untuk mengetahui pengaruh jumlah panel surya, jumlah elemen pemanas, dan susunan isolasi termal terhadap kinerja sistem. Pembahasan meliputi pengujian tegangan, arus, dan daya panel surya, hubungan radiasi matahari dengan daya panel, kenaikan temperatur pasir silika, serta kemampuan pasir dalam mempertahankan panas setelah daya elemen pemanas menurun hingga mendekati nol. Bab ini juga membahas perhitungan energi termal yang tersimpan dan efisiensi penyimpanan energi termal pada konfigurasi yang memiliki data daya lengkap. Pengujian sistem monitoring dilakukan dengan membandingkan data yang ditampilkan pada LCD, Blynk, dan *Google Spreadsheet* untuk memastikan kesesuaian nilai.

BAB VI KESIMPULAN DAN SARAN

BAB VI memuat kesimpulan yang disusun berdasarkan hasil perancangan, pembuatan, pengujian, dan analisis prototipe. Kesimpulan disusun untuk menjawab rumusan masalah serta menunjukkan ketercapaian tujuan tugas akhir.

Bagian saran memuat rekomendasi untuk pengembangan penelitian selanjutnya, seperti peningkatan kualitas isolasi, penambahan titik pengukuran temperatur, kalibrasi sensor, optimalisasi sistem panel surya, dan penyempurnaan perhitungan energi termal.