

BAB II

LANDASAN TEORI

2.1 Tinjauan Pustaka

Tinjauan pustaka dilakukan untuk mengidentifikasi perkembangan penelitian mengenai teknologi penyimpanan energi termal, pemanfaatan pasir silika sebagai media penyimpanan panas sensibel, penggunaan panel surya sebagai sumber energi pemanasan, serta faktor-faktor yang memengaruhi kinerja sistem penyimpanan panas. Kajian ini menjadi dasar dalam menentukan pendekatan perancangan, parameter pengujian, dan metode analisis yang digunakan pada penelitian.

Teknologi *Thermal Energy Storage* atau TES dikembangkan untuk mengatasi ketidaksesuaian antara waktu tersedianya energi dan waktu pemanfaatannya. Dalam sistem energi surya, TES dapat menyimpan energi selama periode penyinaran dan mempertahankannya untuk digunakan ketika keluaran sumber energi menurun. Penerapan TES dapat membantu mengurangi pengaruh intermitensi energi surya dan meningkatkan keberlanjutan penyediaan energi termal [1], [5].

TES dapat menggunakan material padat, cair, maupun material yang mengalami perubahan fase. Salah satu metode yang relatif sederhana adalah penyimpanan panas sensibel. Pada metode ini, energi disimpan melalui peningkatan temperatur material tanpa menyebabkan perubahan fase. Kapasitas penyimpanan panas sensibel dipengaruhi oleh massa media, kapasitas panas spesifik, dan perubahan temperatur yang terjadi [1], [7], [8].

Pasir silika merupakan salah satu material padat yang berpotensi digunakan sebagai media penyimpanan panas sensibel. Material tersebut tersedia secara relatif melimpah, tidak mudah terbakar, dapat digunakan pada temperatur tinggi, dan dapat mengalami siklus pemanasan serta pendinginan secara berulang. Namun, kinerja termal pasir silika dipengaruhi oleh ukuran partikel, kepadatan curah, rongga udara, luas kontak antarpartikel, dan konduktivitas termal efektifnya [6], [9], [10].

Davenport et al. meneliti stabilitas termal partikel silika sebagai media penyimpanan energi termal. Pengujian dilakukan melalui perlakuan termal selama 500 jam dan pengulangan siklus temperatur antara 300°C sampai 1.200°C. Hasil pengujian menunjukkan perubahan yang terbatas pada distribusi ukuran partikel dan struktur kristal material. Temuan tersebut menunjukkan bahwa pasir silika memiliki stabilitas yang mendukung penggunaannya sebagai media TES padat [9].

Niksiar et al. melakukan pengujian penyimpanan panas sensibel menggunakan pasir silika pada sistem *shell-and-tube*. Penelitian tersebut membandingkan pasir silika halus dan kasar serta mengevaluasi penggunaan beberapa konfigurasi sirip tembaga. Pasir yang lebih halus membutuhkan waktu pengisian lebih singkat dibandingkan pasir kasar. Penambahan delapan sirip radial mampu mengurangi waktu pengisian sebesar 63,74% dan waktu pelepasan panas sebesar 78,50% dibandingkan konfigurasi tanpa sirip. Hasil tersebut menunjukkan bahwa ukuran partikel dan luas permukaan penghantar panas memengaruhi proses pengisian dan pelepasan energi termal [10].

Imran et al. menganalisis sistem TES hibrida yang menggunakan pasir silika dan batu basal. Kombinasi 70% pasir dan 30% batu basal menghasilkan kenaikan temperatur sebesar 52,38°C, kapasitas penyimpanan panas sebesar $3,21 \pm 0,19$ MJ, dan efisiensi sebesar 80,5%. Hasil tersebut menunjukkan bahwa komposisi media penyimpanan memengaruhi kapasitas penyimpanan maupun karakteristik pelepasan panas [11].

Saini et al. mengembangkan sistem pemanas air berbasis panel 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 mekanisme konduksi. Pada pengujian hari pertama, temperatur pasir meningkat dari 31,7°C menjadi 100,9°C, dengan energi termal tersimpan sebesar 7,85 MJ dan efisiensi pengisian sebesar 72,37%. Pada hari kedua, temperatur meningkat dari 69°C menjadi 135,4°C, dengan energi termal sebesar 7,46 MJ dan efisiensi pengisian sebesar 66,52%. Penelitian tersebut membuktikan bahwa energi listrik panel surya dapat dikonversi secara langsung menjadi energi panas dan disimpan di dalam media pasir [12].

Bruno dan Jaskhec mengkaji sistem penyimpanan panas padat yang diisi menggunakan kelebihan energi listrik dari panel fotovoltaik. Media yang dianalisis berupa pasir murni dan campuran pasir dengan limbah besi. Hasil pemodelan menunjukkan bahwa penyimpanan panas padat dapat meningkatkan pemanfaatan energi fotovoltaik dan mengurangi ketergantungan terhadap energi fosil. Kinerja sistem dipengaruhi oleh kapasitas panel fotovoltaik, volume media penyimpanan, temperatur operasi, dan kebutuhan energi termal [16].

Berdasarkan penelitian terdahulu, pasir silika memiliki potensi sebagai media penyimpanan panas sensibel. Elemen pemanas resistif dapat digunakan untuk mengubah energi listrik menjadi panas secara langsung, sedangkan pasir digunakan untuk menyimpan panas melalui peningkatan temperatur. Kinerja sistem dipengaruhi oleh ukuran partikel, massa media, kapasitas panas spesifik, posisi elemen pemanas, luas permukaan perpindahan panas, temperatur operasi, dan kualitas isolasi termal [9]–[12].

Meskipun demikian, sebagian penelitian terdahulu menggunakan sumber panas yang dikendalikan di laboratorium, fluida pemindah panas, media campuran, atau sistem berskala besar. Pengujian eksperimental mengenai hubungan langsung antara perubahan daya panel surya dan temperatur pasir pada prototipe berskala laboratorium masih perlu dikembangkan. Pengaruh jumlah panel surya, jumlah elemen pemanas, dan penyempurnaan isolasi terhadap temperatur maksimum serta kemampuan retensi panas juga perlu dievaluasi menggunakan konfigurasi pengujian yang berbeda.

Baterai elektrokimia dan *Thermal Energy Storage* memiliki fungsi penyimpanan yang berbeda. Baterai elektrokimia menyimpan energi dalam bentuk kimia dan mengeluarkannya kembali sebagai energi listrik. Teknologi ini memiliki efisiensi dan respons yang tinggi, tetapi mengalami penurunan kapasitas akibat umur dan siklus penggunaan serta membutuhkan sistem pengelolaan dan proteksi. Sebaliknya, TES menyimpan energi dalam bentuk panas sehingga lebih sesuai untuk aplikasi dengan kebutuhan akhir berupa pemanasan dan proses termal. Perbandingan baterai elektrokimia dan TES berbasis pasir silika dapat dilihat pada Tabel 2 – 1. [19]–[23]

Tabel 2 - 1 Perbandingan Baterai Elektrokimia dan TES Berbasis Pasir Silika

Aspek	Baterai elektrokimia	TES berbasis pasir silika
Bentuk energi tersimpan	Energi kimia	Energi panas sensibel
Energi keluaran	Energi listrik	Energi panas
Efisiensi	Relatif tinggi	Dipengaruhi isolasi dan kehilangan panas
Respons	Cepat	Relatif lambat
Media penyimpanan	Elektroda dan elektrolit	Pasir silika
Degradasi	Mengalami penurunan kapasitas akibat umur dan siklus penggunaan	Tidak mengalami degradasi elektrokimia
Sistem pengelolaan	Mebutuhkan BMS dan proteksi khusus	Mebutuhkan monitoring temperatur dan isolasi termal
Risiko utama	Hubung singkat, panas berlebih, dan <i>thermal runaway</i>	Temperatur tinggi dan kehilangan panas
Kesesuaian aplikasi	Beban listrik dan daya cadangan	Pemanasan, pengeringan, dan proses termal
Keunggulan utama	Efisiensi tinggi, respons cepat, dan konstruksi ringkas	Media sederhana, tidak mudah terbakar, dan berpotensi murah
Keterbatasan utama	Biaya, degradasi, dan pengelolaan akhir masa pakai	Mebutuhkan volume lebih besar dan isolasi yang baik

Berdasarkan Tabel 2 - 1, baterai elektrokimia lebih sesuai untuk kebutuhan penyimpanan dan penggunaan kembali energi dalam bentuk listrik. Sementara itu, TES berbasis pasir silika lebih sesuai untuk kebutuhan akhir berupa panas karena energi listrik dapat langsung dikonversi oleh elemen pemanas dan disimpan dalam pasir. Walaupun efisiensi TES masih dipengaruhi kehilangan panas, teknologi ini

memiliki potensi karena menggunakan media yang relatif sederhana, tidak mudah terbakar, tahan terhadap temperatur tinggi, dan tidak mengalami degradasi elektrokimia.

Penelitian ini tidak ditujukan untuk menggantikan seluruh fungsi baterai elektrokimia, tetapi mengembangkan alternatif penyimpanan energi untuk aplikasi termal. Oleh karena itu, penelitian difokuskan pada kemampuan pasir silika dalam menyimpan panas, mempertahankan temperatur, dan mengurangi kehilangan energi melalui penggunaan isolasi termal.

Berdasarkan kajian tersebut, penelitian ini mengembangkan prototipe *Thermal Energy Storage* berbasis pasir silika yang menerima energi listrik secara langsung dari panel surya. Pengujian dilakukan secara bertahap menggunakan tiga konfigurasi untuk menganalisis pengaruh perubahan jumlah panel surya, jumlah elemen pemanas, dan susunan isolasi terhadap daya pemanasan, temperatur maksimum, laju pendinginan, kemampuan mempertahankan panas, serta efisiensi penyimpanan energi termal.

2.2 Dasar Teori

2.2.1 Energi Surya

Energi surya merupakan energi elektromagnetik yang dipancarkan matahari dan diterima permukaan bumi dalam bentuk radiasi. Besarnya energi yang diterima suatu permukaan dipengaruhi oleh posisi matahari, waktu penyinaran, kondisi atmosfer, tutupan awan, sudut datang cahaya, orientasi permukaan, dan temperatur lingkungan. Oleh karena itu, energi surya yang tersedia dapat berubah berdasarkan waktu dan kondisi cuaca [2], [3].

Energi surya dapat dimanfaatkan secara langsung sebagai panas atau dikonversi menjadi energi listrik menggunakan panel fotovoltaik. Dalam penelitian ini, radiasi matahari dikonversi menjadi energi listrik oleh panel surya. Energi listrik tersebut kemudian disalurkan menuju elemen pemanas resistif dan dikonversi menjadi energi termal yang disimpan dalam pasir silika.

Karena keluaran panel surya dipengaruhi kondisi radiasi dan temperatur modul, tegangan, arus, serta daya yang dihasilkan dapat berubah selama pengoperasian. Perubahan tersebut secara langsung memengaruhi daya elemen

pemanas karena panel surya dihubungkan langsung dengan beban tanpa menggunakan sistem *Maximum Power Point Tracking*.

2.2.2 Thermal Energy Storage (TES)

Thermal Energy Storage (TES) merupakan teknologi penyimpanan energi dalam bentuk panas atau dingin agar energi tersebut dapat digunakan pada waktu yang berbeda dari saat proses pengisian. Teknologi ini digunakan untuk mengatasi *temporal mismatch* antara ketersediaan energi dan kebutuhan energi termal [1], [5], [7].

Berdasarkan mekanisme penyimpanannya, TES dibedakan menjadi tiga jenis, yaitu *Sensible Heat Storage* (SHS), *Latent Heat Storage* (LHS), dan *Thermochemical Storage* (TCS) [1], [7]. Penyimpanan panas sensibel bekerja dengan meningkatkan temperatur suatu material tanpa menyebabkan perubahan fase. Penyimpanan panas laten memanfaatkan energi yang diserap atau dilepaskan ketika material mengalami perubahan fase, sedangkan penyimpanan termokimia menggunakan reaksi kimia reversibel untuk menyimpan dan melepaskan energi termal. Klasifikasi tersebut juga digunakan dalam berbagai kajian teknologi TES [7].

Penelitian ini menggunakan metode *Sensible Heat Storage* dengan pasir silika sebagai media penyimpanan. Energi termal disimpan melalui peningkatan temperatur pasir tanpa menyebabkan perubahan fase. Besarnya energi termal yang tersimpan dipengaruhi oleh massa media, kapasitas panas spesifik, dan perubahan temperatur.

2.2.3 Pasir Silika sebagai Media Penyimpan Panas

Pasir silika merupakan material granular yang sebagian besar tersusun atas silikon dioksida (SiO_2), umumnya dalam bentuk mineral kuarsa. Material ini berpotensi digunakan sebagai media penyimpanan panas sensibel karena relatif mudah diperoleh, tidak mudah terbakar, stabil pada temperatur tinggi, dan dapat digunakan melalui siklus pemanasan serta pendinginan [6], [9], [10].

Dalam sistem *Thermal Energy Storage*, pasir silika menyimpan energi melalui peningkatan temperatur tanpa mengalami perubahan fase. Besarnya energi termal yang dapat disimpan dipengaruhi oleh massa pasir, kapasitas panas spesifik,

perubahan temperatur, densitas curah, ukuran partikel, kadar air, dan distribusi temperatur di dalam media. Ukuran partikel yang lebih kecil dapat meningkatkan luas kontak antarpartikel, sedangkan penambahan komponen konduktif dapat mempercepat proses pengisian dan pelepasan panas [9], [10].

Karakteristik termofisika pasir tidak mempunyai nilai yang sepenuhnya tetap karena dipengaruhi oleh komposisi mineral, ukuran partikel, kepadatan curah, kadar air, porositas, dan temperatur. Beberapa karakteristik umum pasir silika yang relevan untuk penelitian ini disajikan pada Tabel 2 - 2.

Tabel 2 - 2 Karakteristik Termofisika Pasir Silika

Parameter	Nilai umum	Satuan	Keterangan
Kapasitas panas spesifik pada temperatur ruang	0,73–0,83	J/g·K	Nilai pendekatan pada temperatur rendah
Densitas curah	1.400–1.650	kg/m ³	Dipengaruhi ukuran partikel dan kepadatan pengisian
Konduktivitas termal efektif	0,15–0,25	W/m·K	Dipengaruhi porositas, kepadatan, dan kadar air
Kapasitas panas volumetrik	1.050–1.370	kJ/m ³ ·K	Hasil perkalian densitas curah dan kapasitas panas spesifik
Titik leleh silika	Sekitar 1.650	°C	Nilai pendekatan untuk material yang didominasi kuarsa
Rentang temperatur penelitian	Sekitar 28–230	°C	Berdasarkan kondisi pengujian prototipe

Kapasitas panas spesifik silika meningkat seiring kenaikan temperatur. Data kuarsa dari National Institute of Standards and Technology menunjukkan nilai sekitar 0,74 J/g·K pada 25°C dan mendekati 0,99 J/g·K pada temperatur sekitar 227°C. Oleh karena itu, nilai 0,83 J/g·K yang digunakan dalam perhitungan

penelitian merupakan pendekatan konstan dan dapat menyebabkan perbedaan terhadap energi termal aktual pada temperatur tinggi.

Perbandingan pasir silika dengan beberapa media penyimpanan panas sensibel disajikan pada Tabel 2-3. Perbandingan difokuskan pada karakteristik teknis karena harga material dipengaruhi oleh lokasi, kemurnian, ukuran partikel, jumlah pembelian, dan waktu pengadaan.

Tabel 2 - 3 Perbandingan Media Penyimpan Panas Sensibel

Material	Kapasitas panas spesifik	Densitas	Keunggulan	Keterbatasan
Pasir silika	0,73–0,83 J/g·K pada temperatur ruang	1.400–1.650 kg/m ³	Stabil pada temperatur tinggi, tidak mudah terbakar, dan relatif mudah diperoleh	Konduktivitas termal efektif relatif rendah
Air	Sekitar 4,18 J/g·K	Sekitar 1.000 kg/m ³	Kapasitas panas spesifik tinggi dan perpindahan panas baik	Temperatur operasi dibatasi titik didih pada tekanan atmosfer
Beton	Sekitar 0,88 J/g·K	Sekitar 2.200 kg/m ³	Kokoh, mudah diperoleh, dan dapat menjadi bagian struktur	Dapat mengalami retak akibat siklus termal
Minyak termal	Sekitar 1,80–2,30 J/g·K	Sekitar 800–900 kg/m ³	Dapat berfungsi sebagai media penyimpan dan fluida pemindah panas	Memiliki batas temperatur, risiko kebocoran, dan dapat terbakar

Material	Kapasitas panas spesifik	Densitas	Keunggulan	Keterbatasan
Garam cair	Sekitar 1,50 J/g·K	Sekitar 1.900 kg/m ³	Sesuai untuk penyimpanan panas bertemperatur tinggi	Memerlukan pengendalian agar tidak membeku dan menyebabkan korosi
Material keramik	Sekitar 0,85–1,30 J/g·K	Sekitar 2.600 kg/m ³	Stabil pada temperatur tinggi	Biaya material dan fabrikasi dapat lebih tinggi

Berdasarkan Tabel 2 - 3, air memiliki kapasitas panas spesifik yang lebih tinggi dibandingkan pasir silika. Namun, penggunaannya pada temperatur di atas 100°C memerlukan sistem bertekanan. Pasir silika memiliki kapasitas panas spesifik yang lebih rendah, tetapi dapat digunakan dalam bentuk padat pada temperatur tinggi tanpa memerlukan bejana bertekanan atau perubahan fase.

Pada penelitian ini, pasir silika dipilih karena sesuai untuk penyimpanan panas sensibel pada temperatur operasi prototipe. Meskipun konduktivitas termalnya relatif rendah, pasir silika tetap berpotensi digunakan sebagai media TES apabila dikombinasikan dengan penempatan elemen pemanas yang tepat, luas bidang perpindahan panas yang memadai, serta isolasi termal yang baik.

2.2.4 Power Supply



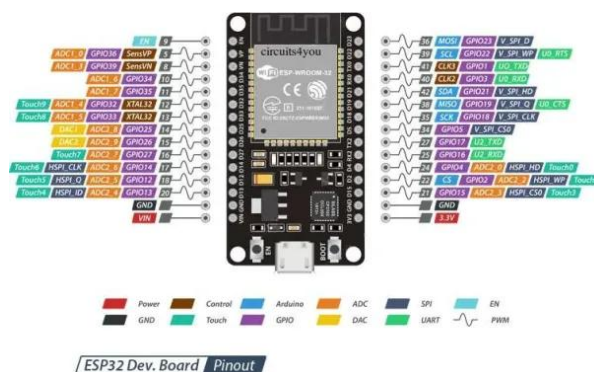
Gambar 2. 1 Power Supply

Power Supply yang digunakan adalah power supply switching 12V 5A, PSU ini digunakan untuk memberikan sumber DC ke keseluruhan komponen seperti mikrokontroller dan sensor, yang bentuk fisiknya dapat dilihat pada Gambar 2. 1. Tegangan dari psu perlu diturunkan sebelum bisa digunakan oleh perangkat kontrol. Spesifikasi power supply yang digunakan disajikan dalam Tabel 2 – 4.

Tabel 2 - 4 Spesifikasi Power Supply

Spesifikasi	Keterangan
Jenis	Switching Power Supply
Tegangan Input	AC 110–240 V
Frekuensi Input	50/60 Hz
Tegangan Output	DC 12 V
Arus Output Maksimum	5 A
Daya Maksimum	60 W
Jenis Output	DC (Arus Searah)
Sistem Pendinginan	Pendinginan udara (ventilasi casing)
Material Casing	Jaring logam pelindung
Dimensi	110 × 78 × 37 mm
Jarak Lubang Baut	123 mm

2.2.5 Mikrokontroler ESP32



Gambar 2. 2 ESP 32

ESP32 merupakan *System on Chip* 32-bit yang menggunakan prosesor Xtensa LX6 *dual-core* dengan frekuensi hingga 240 MHz dan SRAM sebesar 520

KB. ESP32 dilengkapi konektivitas Wi-Fi 802.11 b/g/n dan Bluetooth 4.2/BLE serta mendukung komunikasi UART, SPI, dan I²C. Fitur tersebut memungkinkan ESP32 diintegrasikan dengan sensor, perangkat antarmuka, dan sistem pencatatan data berbasis jaringan [15].

Pada penelitian ini, ESP32 digunakan sebagai mikrokontroler utama untuk membaca temperatur pasir melalui dua modul MAX6675, membaca parameter panel surya referensi melalui INA219, menerima data dari Arduino Nano melalui komunikasi UART, dan mengolah hasil pengukuran. ESP32 juga mengelola LCD 20×4 dan keypad 4×4 melalui komunikasi I²C serta mengirimkan data hasil pengujian menuju *Google Spreadsheet* melalui jaringan Wi-Fi.

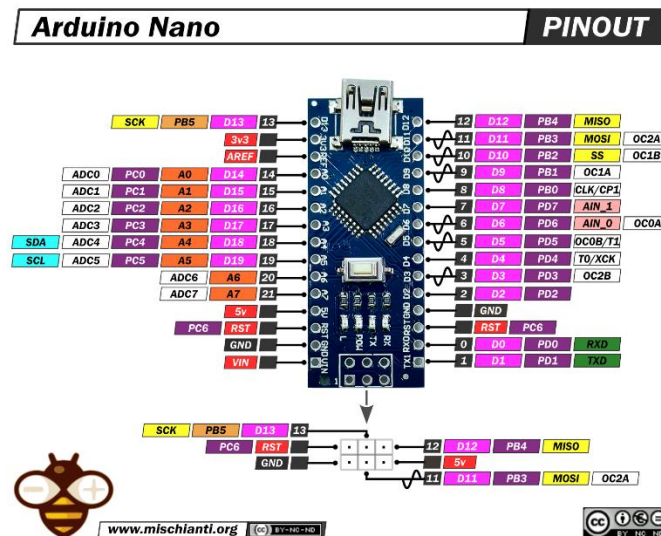
ESP32 DevKit V1 memiliki 38 pin fisik pada papan pengembangan yang konfigurasi pinnya dapat dilihat pada Gambar 2. 2. Namun, jumlah tersebut tidak seluruhnya merupakan GPIO yang dapat digunakan secara bebas karena beberapa pin digunakan untuk catu daya, *ground*, reset, dan fungsi internal lainnya. Oleh karena itu, jumlah pin fisik pada papan pengembangan perlu dibedakan dari jumlah GPIO yang tersedia pada chip ESP32. Spesifikasi lengkap ESP32 disajikan pada Tabel 2 – 5.

Tabel 2 - 5 Spesifikasi ESP32

Kategori	Spesifikasi
Nama Modul	ESP32 DevKit V1
Chip Utama	ESP32 – WROOM - 32D
Processor	Xtensa® dual-core 32-bit LX6 CPU (hingga 240 MHz)
Memori	520 KB SRAM, 4 MB Flash
Fitur Nirkabel	Wi – Fi 802.11 b/g/n dan Bluetooth v4.2 (BR/EDR dan BLE)
Pin O/I	38 Pin (termasuk GPIO, ADC, DAC, PWM, UART, SPI, I2C)
Antarmuka USB	CP2102 USB to UART bridge

Kategori	Spesifikasi
Tegangan Operasional	5V via USB atau 3.3V via pin
Level Logika I/O	3.3V
Port USB	Micro USB
Tombol Onboard	EN (reset) dan BOOT (untuk mode flashing)
Driver USB	CP2102
Pemrograman	Arduino IDE, PlatformIO, ESP – IDF
Fungsi Khusus	Dual core processing, low power sleep modes, deep sleep support

2.2.6 Mikrokontroler Arduino Nano



Gambar 2. 3 Arduino Nano

Arduino Nano merupakan papan mikrokontroler berbasis ATmega328P yang bekerja pada tegangan 5 V dengan frekuensi *clock* 16 MHz. Arduino Nano memiliki 32 KB memori *flash*, 2 KB SRAM, 1 KB EEPROM, 14 pin digital utama, enam kanal PWM, delapan masukan analog dengan ADC 10-bit, serta mendukung komunikasi UART, SPI, dan I²C dengan pinout yang tertera pada Gambar 2. 3. [19].

Dalam sistem yang dikembangkan, Arduino Nano digunakan sebagai mikrokontroler pendukung untuk membaca sensor tegangan, sensor arus ACS712. Arduino Nano juga mengendalikan blower melalui keluaran digital yang terhubung dengan rangkaian penggerak. Data hasil pembacaan sensor kemudian dikirimkan menuju ESP32 melalui komunikasi UART untuk diolah, ditampilkan, dan dicatat. Spesifikasi lengkap Arduino Nano disajikan dalam Tabel 2 – 6.

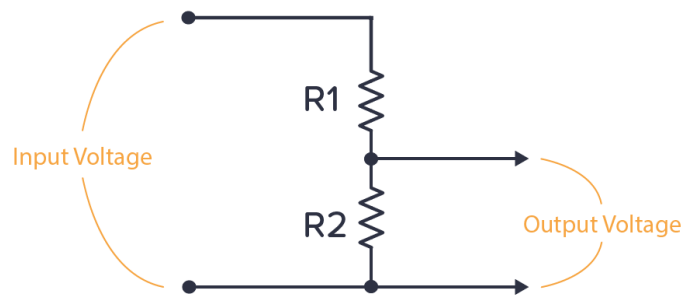
Tabel 2 - 6 Spesifikasi Arduino Nano

Kategori	Spesifikasi
Nama Modul	Arduino Nano
Chip Utama	ATmega328P
Arsitektur	8-bit AVR RISC architecture
Frekuensi Clock	16 MHz
Memori Flash	32 KB (2 KB digunakan oleh bootloader)
Jumlah Pin I/O Digital	14 pin (6 di antaranya dapat digunakan sebagai output PWM)
Antarmuka Komunikasi	UART, SPI, dan I ² C
Tegangan Operasional	5 V DC
Level Logika I/O	5 V
Port USB	Mini USB Type-B
Konsumsi Daya (typical)	±19 mA (saat aktif)
Driver USB	CH340
Pemrograman	Arduino IDE,
Fungsi Khusus	Dukungan <i>bootloader</i> , kompatibel dengan board Arduino Uno, ukuran ringkas, dan

Kategori	Spesifikasi
	cocok untuk sistem tertanam (<i>embedded system</i>).

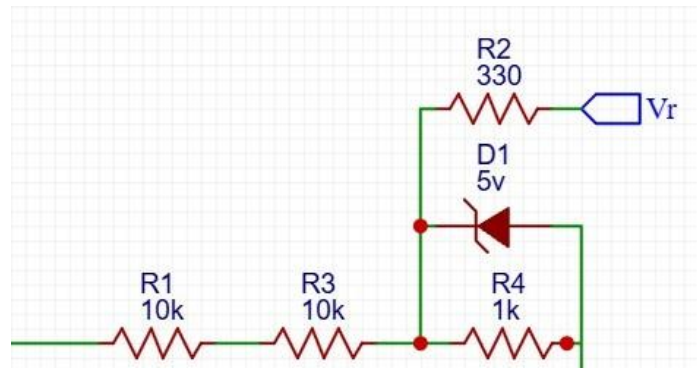
Komunikasi antara Arduino Nano dan ESP32 menggunakan pin UART tambahan yang diimplementasikan melalui *library* SoftwareSerial. Berdasarkan program yang digunakan, pengiriman data dilakukan secara berkala dengan kecepatan komunikasi sebesar 9.600 bps. Data yang dikirim meliputi tegangan, arus, temperatur, dan kelembapan. LCD 20×4 serta keypad 4×4 tidak terhubung dengan Arduino Nano, tetapi dikelola oleh ESP32 melalui komunikasi I²C.

2.2.7 Voltage Sensor



Gambar 2. 4 Pembagi Tegangan

Sensor tegangan menggunakan rangkaian pembagi tegangan untuk menurunkan tegangan keluaran panel surya agar dapat dibaca secara aman oleh ADC Arduino Nano. Rangkaian tersebut menggunakan dua resistor $10\text{ k}\Omega$ yang disusun seri menjadi $20\text{ k}\Omega$ pada sisi masukan dan resistor $1\text{ k}\Omega$ pada sisi keluaran, sehingga menghasilkan rasio penurunan tegangan sebesar 1:21. Konfigurasi rangkaian pembagi tegangan dapat dilihat pada Gambar 2. 4.

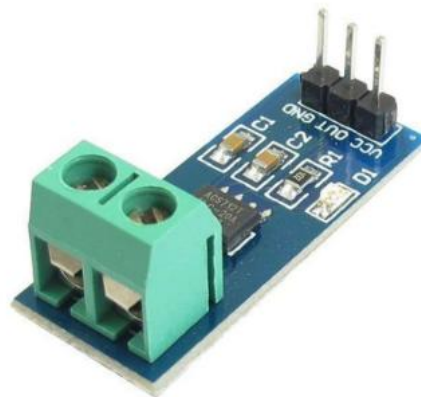


Gambar 2. 5 Rangkaian Voltage Sensor

Dua panel surya yang dihubungkan secara seri memiliki tegangan rangkaian terbuka total sekitar 99 V. Setelah diturunkan menggunakan rangkaian pembagi tegangan, tegangan keluaran menjadi sekitar 4,7 V. Nilai tersebut masih berada di bawah batas masukan analog Arduino Nano sebesar 5 V, tetapi memiliki margin pengaman yang relatif kecil.

Sebagai perlindungan tambahan, dioda Zener 5 V dipasang pada sisi keluaran untuk membatasi tegangan apabila terjadi kenaikan di atas batas masukan Arduino Nano. Resistor 330 Ω juga dipasang secara seri untuk membatasi arus yang menuju pin analog. Hasil pembacaan ADC kemudian dikonversi menjadi nilai tegangan panel berdasarkan rasio pembagi tegangan dan faktor kalibrasi terhadap alat ukur referensi. Rangkaian keseluruhan voltage sensor yang digunakan dapat dilihat pada Gambar 2. 5;

2.2.8 ACS712



Gambar 2. 6 Sensor ACS712

Pada Gambar 2. 6 diperlihatkan bentuk fisik dari ACS712 yang merupakan sensor arus berbasis efek Hall yang menghasilkan keluaran analog sesuai dengan arus yang diukur. Penelitian ini menggunakan **ACS712 varian 20 A** dengan sensitivitas nominal **100 mV/A**. Varian tersebut dipilih karena arus nominal elemen pemanas sekitar **11,9 A**, sehingga masih berada dalam rentang pengukuran sensor. ACS712 dihubungkan dengan Arduino Nano dan hasil pembacaannya dirata-ratakan untuk mengurangi fluktuasi sinyal. Spesifikasi lengkap sensor ACS712 dapat dilihat pada Tabel 2 – 7 [17].

Tabel 2 - 7 Spesifikasi Sensor ACS712

Spesifikasi	Keterangan
Jenis	Hall Effect-Based Linear Current Sensor IC
Rentang Arus	± 20 A
Tegangan Suplai (VCC)	5 V DC
Sensitivitas Output	100 mV/A
Tegangan Output saat Arus Nol	VCC/2 (2.5 V)
Rentang Tegangan Output	0.5 V – 4.5 V
Bandwidth	80 kHz
Waktu Naik (Rise Time)	5 μ s
Noise Output	21 mV
Akurasi (Total Output Error)	$\pm 1.5\%$ pada TA = 25°C
Resistansi Konduktor Internal	1.2 m Ω
Isolasi Tegangan	2.1 kVRMS (minimum)
Suhu Operasi	-40°C hingga +85°C
Kemasan	SOIC8 (8-Lead)

2.2.9 INA219

INA219 merupakan sensor digital yang digunakan untuk mengukur tegangan, arus, dan daya. Modul ini menggunakan resistor *shunt* sebesar **0,1 Ω** untuk mengubah arus yang mengalir menjadi beda tegangan yang dapat dibaca oleh

sensor. INA219 terhubung dengan ESP32 melalui komunikasi I²C dan menggunakan jalur yang sama dengan LCD serta keypad.

INA219 memiliki batas tegangan bus sebesar **26 V**, sehingga tidak digunakan untuk mengukur tegangan dua panel surya utama yang dihubungkan secara seri. Dalam penelitian ini, INA219 hanya digunakan untuk membaca parameter panel surya referensi berkapasitas 10 Wp sebagai dasar estimasi iradiasi matahari [18].

Tabel 2 - 8 Spesifikasi INA219

Spesifikasi	Keterangan
Jenis	Current/Power Monitor (I ² C) berbasis Shunt Resistor
Tegangan Suplai (VS)	3.0 V – 5.5 V
Rentang Tegangan Bus (Beban)	0 V – 26 V
Rentang Tegangan Shunt (default)	±320 mV (PGA /8, dapat diatur /1, /2, /4, /8)
Arus Maksimum (shunt 0.1 Ω)	±3.2 A
Resolusi Arus (rentang ±3.2 A)	0.8 mA
Resistor Shunt (umum pada modul)	0.1 Ω , 1%, 2 W
Resolusi ADC	12-bit (hingga 15-bit dengan averaging)
Antarmuka	I ² C / SMBus (hingga 16 alamat terprogram)
Arus Suplai Maksimum	1 mA
Pengukuran	Tegangan shunt, tegangan bus, arus, dan daya
Suhu Operasi	-40°C hingga +125°C

2.2.10 Resistor Kapur



Gambar 2. 7 Resistor Kapur

Resistor kapur merupakan resistor daya yang digunakan sebagai *dummy load* pada panel surya referensi 10 Wp. Penelitian ini menggunakan resistor sebesar **33 Ω dengan daya maksimum 15 W**. Resistansi dipilih dengan mempertimbangkan tegangan operasi panel, sedangkan kapasitas dayanya harus lebih besar daripada daya listrik yang dilepaskan resistor agar komponen tidak mengalami panas berlebih. Bentuk fisik dari Resistor kapur yang digunakan dapat dilihat pada Gambar 2. 7.

Dasar penentuan resistansi menggunakan Hukum Ohm:

$$V = IR$$

Keterangan:

V = tegangan panel referensi (V);

I = arus yang mengalir melalui resistor (A); dan

R = resistansi beban (Ω).

Daya yang dilepaskan resistor diperiksa menggunakan:

$$P = \frac{V^2}{R}$$

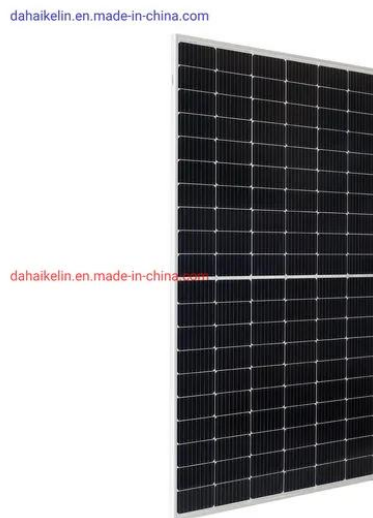
Dengan menggunakan tegangan pada titik daya maksimum panel referensi (V_{mp}), daya resistor dihitung sebagai:

$$P_R = \frac{V_{mp}^2}{33}$$

Nilai hasil perhitungan harus berada di bawah batas daya resistor sebesar 15 W. Arus hasil pembebanan juga perlu dibandingkan dengan I_{mp} atau I_{sc} panel referensi untuk memastikan titik kerjanya masih sesuai dengan karakteristik panel.

Penggunaan resistor tetap untuk memperkirakan iradiasi memiliki keterbatasan karena titik operasi panel dapat berubah akibat iradiasi dan temperatur. Oleh karena itu, hasil pengukuran merupakan nilai estimasi dan perlu dikalibrasi menggunakan alat ukur iradiasi standar. Untuk pengukuran berbasis sel referensi, pendekatan arus hubung singkat lebih umum digunakan karena I_{sc} cenderung sebanding dengan iradiasi.

2.2.11 Panel Surya Monokristal 545 WP



Gambar 2. 8 Panel Surya 545 wp

Panel surya fotovoltaik merupakan perangkat yang mengonversi energi radiasi matahari menjadi energi listrik melalui efek fotovoltaik. Penelitian ini menggunakan dua panel surya monokristalin tipe LR5-72HBD-545M dengan kapasitas masing-masing sebesar 545 Wp. Berdasarkan *datasheet*, setiap panel memiliki tegangan titik daya maksimum (V_{mp}) sebesar 41,80 V, arus titik daya maksimum (I_{mp}) sebesar 13,04 A, tegangan rangkaian terbuka (V_{oc}) sebesar 49,65

V, dan arus hubung singkat (I_{sc}) sebesar 13,92 A pada kondisi pengujian standar. Bentuk fisik panel surya yang digunakan dapat dilihat pada Gambar 2, 8 [13].

Kedua panel surya dihubungkan secara seri agar tegangan keluarannya sesuai dengan tegangan nominal dua elemen pemanas yang juga dihubungkan secara seri. Pada hubungan seri, tegangan kedua panel dijumlahkan, sedangkan arus yang mengalir melalui setiap panel bernilai sama. Berdasarkan spesifikasi tersebut, dua panel menghasilkan tegangan nominal gabungan pada titik daya maksimum sebesar 83,60 V, arus sebesar 13,04 A, dan kapasitas nominal total sebesar 1.090 Wp. Tegangan tersebut mendekati tegangan nominal gabungan elemen pemanas sebesar 84 V.

Panel surya dihubungkan secara langsung dengan elemen pemanas resistif tanpa menggunakan *Maximum Power Point Tracking* atau MPPT. Oleh karena itu, panel tidak selalu beroperasi pada titik daya maksimum. Titik operasi sistem ditentukan oleh perpotongan karakteristik arus-tegangan atau kurva I–V panel dengan karakteristik resistansi elemen pemanas. Perubahan iradiasi matahari, temperatur modul, resistansi beban, dan rugi-rugi sambungan dapat menyebabkan tegangan, arus, dan daya operasi berbeda dari nilai nominal pada kondisi pengujian standar [2], [3].

Kondisi tersebut menjelaskan hasil pengujian pada BAB V, ketika daya maksimum yang relatif stabil hanya mencapai 683,31 W atau sekitar 62,69% dari kapasitas nominal gabungan panel. Nilai tersebut bukan efisiensi panel, melainkan perbandingan daya operasi sistem terhadap kapasitas nominal panel pada kondisi pengujian standar. Perbedaan tersebut dapat terjadi karena panel terhubung langsung dengan elemen pemanas tanpa MPPT sehingga titik operasi panel mengikuti karakteristik beban resistif dan kondisi lingkungan. Perbandingan penggunaan satu dan dua panel surya yang diseri dapat dilihat pada Tabel 2 – 9.

Tabel 2 - 9 Spesifikasi Panel Surya

Parameter	Satu panel	Dua panel seri
Jenis panel	Monokristalin bifasial	Monokristalin bifasial

Parameter	Satu panel	Dua panel seri
Tipe modul	LR5-72HBD-545M	$2 \times \text{LR5-72HBD-545M}$
Daya maksimum (P_{max})	545 Wp	1.090 Wp
Tegangan rangkaian terbuka (V_{oc})	49,65 V	99,30 V
Arus hubung singkat (I_{sc})	13,92 A	13,92 A
Tegangan titik daya maksimum (V_{mp})	41,80 V	83,60 V
Arus titik daya maksimum (I_{mp})	13,04 A	13,04 A
Efisiensi modul	21,1%	21,1% per modul
Konfigurasi dua panel	Seri	Tegangan dijumlahkan dan arus tetap
Beban yang digunakan	Elemen pemanas resistif	Dua elemen pemanas terhubung seri
Sistem MPPT	Tidak digunakan	Panel terhubung langsung dengan beban

2.2.12 Elemen heater 500 wat



Gambar 2. 9 Heater 500 Watt

Elemen pemanas pada Gambar 2. 9 berfungsi mengubah energi listrik dari panel surya menjadi energi termal untuk memanaskan pasir silika di dalam *sand battery*. Penelitian ini menggunakan dua elemen pemanas tipe tubular dengan spesifikasi masing-masing 42 V dan 500 W. Setiap elemen memiliki arus nominal sekitar 11,9 A dan resistansi nominal sebesar:

$$R = \frac{V^2}{P} = \frac{42^2}{500} = 3,53 \, \Omega$$

Elemen pemanas memiliki selongsong berbentuk tabung dengan diameter 8 mm dan panjang bagian aktif sekitar 40 cm. Bagian aktif tersebut terbenam di dalam pasir silika, sedangkan terminal listrik berada di atas penutup tabung. Kedua elemen dipasang secara vertikal dan dihubungkan secara seri sehingga memiliki tegangan nominal gabungan sebesar 84 V dan daya total sebesar 1.000 W.

2.2.13 Modul Thermocouple dan MAX6675



Gambar 2. 10 Thermocouple type K dan MAX6675

Thermocouple tipe K merupakan sensor temperatur yang tersusun atas konduktor Chromel (Ni–Cr) dan Alumel (Ni–Al). Perbedaan temperatur antara sambungan panas (*hot junction*) dan sambungan referensi (*cold junction*) menghasilkan tegangan melalui efek Seebeck. Sensitivitas thermocouple tipe K sekitar **41 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$** .

MAX6675 digunakan untuk mengompensasi sambungan dingin dan mengubah sinyal thermocouple menjadi data digital. Modul ini memiliki rentang pengukuran **0–1023,75 $^\circ\text{C}$** , resolusi **0,25 $^\circ\text{C}$** , keluaran 12-bit, dan antarmuka

komunikasi yang kompatibel dengan SPI. Berdasarkan *datasheet*, akurasi thermocouple MAX6675 dinyatakan sebesar 8 LSB pada rentang 0–700°C, setara dengan sekitar $\pm 2^\circ\text{C}$ berdasarkan resolusinya. Bentuk fisik thermocouple tipe K dan MAX6675 dapat dilihat pada Gambar 2. 10 [14].

Dalam penelitian ini, dua thermocouple tipe K digunakan untuk mengukur temperatur pasir pada dua titik berbeda. Nilai temperatur dari kedua sensor dibaca oleh ESP32 melalui modul MAX6675 dan diolah menjadi temperatur rata-rata. Resolusi serta akurasi MAX6675 menjadi salah satu sumber ketidakpastian dalam pengukuran temperatur dan perhitungan energi termal. Spesifikasi lengkap thermocouple tipe K dan MAX6675 dapat dilihat pada Tabel 2 - 10.

Tabel 2 - 10 Spesifikasi Thermocouple Tipe K dan MAX6675

Parameter	Thermocouple tipe K	MAX6675
Material atau fungsi	Chromel dan Alumel	Konverter thermocouple ke data digital
Prinsip kerja	Efek Seebeck	Kompensasi sambungan dingin dan konversi digital
Sensitivitas	Sekitar $41 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$	Tidak berlaku
Rentang pembacaan sistem	Mengikuti sensor dan selongsong yang digunakan	0–1023,75°C
Resolusi	Tidak berlaku	0,25°C
Resolusi data	Tidak berlaku	12-bit
Antarmuka	Sinyal tegangan termolistrik	Kompatibel dengan SPI
Akurasi	Bergantung kelas thermocouple	8 LSB pada rentang 0–700°C
Fungsi dalam penelitian	Mengukur temperatur pasir	Mengolah sinyal dan mengirimkan data ke ESP32

2.2.14 Step Down



Gambar 2. 11 modul Step Down

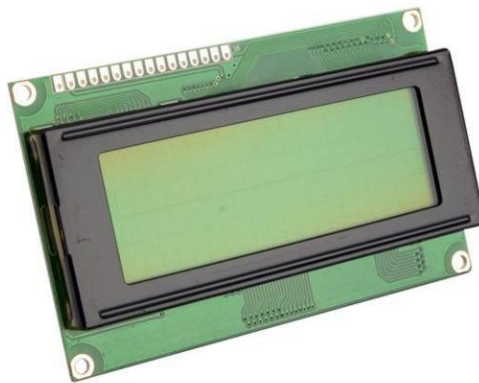
Modul step-down DC-DC 3A 10W pada Gambar 2. 11 merupakan rangkaian regulator switching tipe buck converter yang berfungsi menurunkan tegangan DC menjadi tegangan DC yang lebih rendah dengan efisiensi tinggi. Modul ini tersedia dalam beberapa varian tegangan keluaran tetap (fixed output) yaitu 3,3V, 5V, 9V, dan 12V. Pada sistem yang dirancang, digunakan varian 5 V untuk ESP32 dan ardiono nano. Spesifikasi modul step down yang digunakan dapat dilihat pada Tabel 2 – 11.

Tabel 2 - 11 Spesifikasi Modul Step Down

Kategori	Spesifikasi
Nama Modul	Buck Converter MP1584EN
Jenis Regulator	Step-Down (Buck) Switching Regulator
IC Utama	MP1584EN – Monolithic Power Systems
Tegangan Input (Vin)	4.5 V – 28 V DC
Tegangan Output (Vout)	0.8 V – 20 V DC (dapat diatur)

Kategori	Spesifikasi
Arus Output Maksimum	3 A (rata-rata stabil hingga 2 A)
Efisiensi Konversi	Hingga 92% (tergantung beban dan perbedaan tegangan)
Frekuensi Switching	1.5 MHz
Fitur Proteksi	Overcurrent protection, thermal shutdown, short-circuit protection
Dimensi Fisik	$\pm 22 \text{ mm} \times 17 \text{ mm} \times 4 \text{ mm}$
Tegangan Ripple Output	$< 30 \text{ mV}$ (pada beban penuh)
Suhu Operasional	$-40 \text{ }^{\circ}\text{C}$ hingga $+85 \text{ }^{\circ}\text{C}$

2.2.15 LCD 20x4



Gambar 2. 12 LCD 20×4 (liquid Crystal Display)

LCD 20×4 pada Gambar 2. 12 merupakan perangkat tampilan yang mampu menampilkan 20 karakter pada setiap baris dengan jumlah empat baris. Pada

penelitian ini, LCD digunakan sebagai antarmuka untuk menampilkan hasil pengukuran dan kondisi sistem secara langsung.

LCD dilengkapi modul I²C yang memungkinkan komunikasi dengan ESP32 melalui dua jalur, yaitu SDA dan SCL. Pada sistem yang dibuat, jalur SDA menggunakan GPIO21 dan jalur SCL menggunakan GPIO22. Penggunaan komunikasi I²C membantu mengurangi jumlah pin yang diperlukan dibandingkan dengan komunikasi paralel.

Informasi yang ditampilkan meliputi temperatur pasir pada dua titik pengukuran, parameter tegangan dan arus panel utama, daya listrik, hasil estimasi radiasi matahari, serta status koneksi Wi-Fi. Pemilihan menu tampilan dilakukan menggunakan keypad 4 × 4 yang juga terhubung dengan ESP32. Spesifikasi LCD 20 × 4 yang digunakan dapat dilihat pada Tabel 2 – 12.

Tabel 2 - 12 Spesifikasi LCD

Parameter	Spesifikasi
Jenis tampilan	<i>Liquid Crystal Display</i>
Kapasitas tampilan	20 karakter × 4 baris
Modul komunikasi	I ² C dengan ekspander PCF8574
Jalur komunikasi	SDA dan SCL
Tegangan operasi	5 V
Pin SDA pada ESP32	GPIO21
Pin SCL pada ESP32	GPIO22
Mikrokontroler pengelola	ESP32
Fungsi dalam sistem	Menampilkan temperatur pasir, parameter panel surya, estimasi radiasi, dan status Wi-Fi

2.2.16 Keypad 4X4



Gambar 2. 13 Keypad 4x4

Keypad 4×4 pada Gambar 2. 13 merupakan perangkat masukan yang terdiri atas 16 tombol dalam susunan empat baris dan empat kolom. Pada penelitian ini, keypad digunakan untuk memilih menu dan memberikan perintah pada antarmuka LCD 20×4 .

Keypad dihubungkan dengan ESP32 melalui modul ekspander I²C dan dibaca menggunakan *library* I2CKeyPad. Modul ekspander mengubah kondisi baris dan kolom keypad menjadi data I²C, sehingga komunikasi dengan ESP32 hanya membutuhkan jalur SDA dan SCL. Cara ini mengurangi penggunaan pin GPIO dibandingkan pemindaian baris dan kolom secara langsung. Spesifikasi Keypad 4×4 yang digunakan dapat dilihat pada Tabel 2 – 13.

Tabel 2 - 13 Spesifikasi Keypad

Parameter	Spesifikasi
Jenis perangkat	<i>Matrix keypad 4×4</i>
Jumlah tombol	16 tombol
Susunan tombol	Empat baris dan empat kolom

Parameter	Spesifikasi
Karakter tombol	0–9, A–D, *, dan #
Tegangan operasi	3,3–5 V DC
Metode pembacaan	Pemindaian matriks melalui ekspander I ² C
Modul antarmuka	Ekspander I ² C
Jalur komunikasi	SDA dan SCL
Mikrokontroler pengelola	ESP32
Dimensi modul	Sekitar 70 × 77 × 8 mm
Berat	Sekitar 20 gram
Fungsi dalam sistem	Memilih menu dan memberikan perintah pada antarmuka

2.2.17 Sistem Monitoring Dan Pencacatan Data

Sistem monitoring dan pencatatan data digunakan untuk menampilkan serta menyimpan hasil pengukuran prototipe *Thermal Energy Storage*. ESP32 mengolah data hasil pembacaan sensor, kemudian mengirimkannya melalui jaringan Wi-Fi menuju *Google Spreadsheet* dan Blynk. *Google Spreadsheet* digunakan untuk menyimpan data pengujian, sedangkan Blynk digunakan untuk menampilkan kondisi prototipe secara langsung melalui perangkat seluler.

2.2.17.1 Google Spreadsheet

Google Spreadsheet digunakan sebagai media pencatatan data pengujian berbasis jaringan. Pengiriman data dilakukan menggunakan layanan Google Sheets API, yang memungkinkan aplikasi membaca, menulis, dan menambahkan data ke dalam lembar kerja [19].

Data yang dikirimkan meliputi waktu pengukuran, temperatur pasir pada dua titik, temperatur rata-rata, tegangan, arus, daya, dan estimasi iradiasi matahari. ESP32 mengirimkan data menuju lembar kerja dengan interval lima menit. Data yang tersimpan selanjutnya digunakan untuk membuat grafik, menghitung energi listrik masukan, menganalisis perubahan temperatur, dan menentukan efisiensi penyimpanan energi termal.

2.2.17.2 Platform Blynk

Blynk merupakan platform berbasis *Internet of Things* yang digunakan untuk menghubungkan perangkat mikrokontroler dengan layanan *cloud*. Dalam penelitian ini, Blynk digunakan sebagai media monitoring untuk menampilkan kondisi prototipe secara langsung melalui perangkat seluler.

Pertukaran data antara ESP32 dan Blynk dilakukan melalui *datastream* yang dihubungkan dengan *virtual pin*. *Datastream* mengatur jenis, satuan, penyimpanan, dan tampilan data, sedangkan *virtual pin* berfungsi sebagai jalur pertukaran data serta tidak mewakili pin fisik pada ESP32 [20].

Parameter yang ditampilkan pada Blynk meliputi temperatur pasir pada dua titik, temperatur rata-rata, tegangan panel, arus panel, daya listrik, dan estimasi iradiasi matahari. ESP32 mengirimkan data menggunakan fungsi `Blynk.virtualWrite()` menuju *virtual pin* yang telah ditentukan [20].

Blynk digunakan sebagai media monitoring, sedangkan *Google Spreadsheet* digunakan sebagai media pencatatan dan penyimpanan data pengujian. Blynk tidak digunakan untuk mengendalikan elemen pemanas maupun proses pemanasan pasir silika. Parameter-parameter dan setiap fungsinya yang ditampilkan dalam Blynk dapat dilihat pada Tabel 2 – 14.

Tabel 2 - 14 Parameter Monitoring Blynk

Parameter	Satuan	Fungsi
Temperatur pasir titik pertama	°C	Menampilkan hasil pembacaan thermocouple pertama
Temperatur pasir titik kedua	°C	Menampilkan hasil pembacaan thermocouple kedua
Temperatur rata-rata pasir	°C	Menampilkan temperatur rata-rata kedua titik
Tegangan panel utama	V	Menampilkan tegangan keluaran panel
Arus panel utama	A	Menampilkan arus yang mengalir menuju elemen pemanas

Parameter	Satuan	Fungsi
Daya panel utama	W	Menampilkan hasil perhitungan tegangan dan arus
Estimasi iradiasi matahari	W/m ²	Menampilkan kecenderungan perubahan penyinaran matahari