

BAB II

LANDASAN TEORI

2.1 Tinjauan Pustaka

Kebutuhan teknologi pengeringan yang andal sangat penting dalam proses pascapanen komoditas pertanian, khususnya rempah-rempah dan tanaman herbal. Komoditas ini memiliki sensitivitas tinggi terhadap fluktuasi temperatur yang ekstrem. Temperatur pengeringan yang tidak stabil atau paparan panas yang berlebihan dapat mendegradasi kualitas fisik, merusak kandungan senyawa volatil, dan menurunkan kadar minyak atsiri pada produk. Oleh karena itu, diperlukan sistem ruang tertutup (*enclosure*) yang mampu menjaga kestabilan distribusi panas secara presisi untuk mempertahankan mutu hasil pertanian.

Misha et al. [26] mengkaji kinerja solar dryer yang terintegrasi dengan *Thermal Energy Storage (TES)* untuk pengeringan produk pertanian seperti rempah dan herbal. Kajian tersebut menunjukkan bahwa pemanfaatan TES mampu menjembatani fluktuasi iradiasi matahari, sehingga pasokan panas menuju ruang pengering tetap stabil. Kajian ini menjadi dasar pentingnya penggunaan energi termal yang tersimpan untuk menjaga suhu operasional yang konstan pada pengeringan komoditas sensitif.

Singh et al. [27] meneliti perpindahan panas pada sistem pengering konveksi paksa menggunakan penukar panas (*heat exchanger*) berbasis pipa tembaga. Hasil penelitian membuktikan bahwa pipa tembaga memiliki konduktivitas termal yang sangat baik untuk menyerap dan menyalurkan panas dari media penyimpanan ke aliran udara. Sirkulasi udara paksa menggunakan blower meningkatkan laju perpindahan panas secara signifikan, sehingga mempercepat waktu pengeringan secara efisien.

Fudholi et al. [28] menganalisis distribusi termal di dalam ruang tertutup (*enclosure dryer*) dan kinerja radiator pemindah panas. Kajian tersebut menjelaskan bahwa desain saluran perambatan panas yang ditempatkan di dalam ruang pengering berfungsi efektif sebagai radiator untuk memancarkan panas konveksi. Pemantauan

temperatur yang merata di berbagai titik ruang tertutup sangat esensial untuk mencegah terjadinya titik panas berlebih (*overheating*) yang dapat merusak bahan.

Prakash et al. [29] merancang sistem akuisisi data waktu nyata untuk pengering hibrida khusus rempah-rempah. Penelitian tersebut menunjukkan bahwa penggunaan sensor kelembaban dan temperatur (seperti DHT) yang dihubungkan dengan mikrokontroler memungkinkan implementasi kendali suhu otomatis. Aktuator pemanas atau blower dapat dikendalikan untuk beroperasi dalam batasan temperatur tertentu, sehingga suhu ruang pengering dapat dijaga sesuai dengan titik acuan (*setpoint*) yang aman.

Penelitian terdahulu telah membahas pengeringan rempah, perpindahan panas melalui pipa tembaga, dan sistem monitoring temperatur. Namun, sebagian besar penelitian belum mengintegrasikan mekanisme ekstraksi kalor secara spesifik dari baterai pasir menuju ruang pengering menggunakan sirkulasi udara tertutup (*closed-loop*) yang dipadukan dengan arsitektur komunikasi ganda mikrokontroler. Penelitian ini mengembangkan sistem oven yang mendistribusikan energi termal langsung dari prototipe sand battery tanpa adanya pencampuran dengan udara luar ruang pengering.

Sistem memindahkan kalor menggunakan blower AC yang meniupkan udara ke dalam sirkuit pipa tembaga *closed-loop*. Udara panas yang diekstraksi dari koil tembaga di dalam pasir silika dialirkan menuju pipa tembaga berliku yang berada di dalam oven. Pipa berliku tersebut bertindak sebagai radiator yang mendistribusikan panas ke area pengeringan. Arduino Nano berfungsi sebagai pengontrol lokal yang membaca sensor DHT21 untuk memantau temperatur dan kelembaban ruang oven, serta sensor DHT21 sekunder untuk membaca temperatur lingkungan.

Penelitian ini menerapkan metode kendali ON/OFF dengan histeresis berbasis *setpoint* 45 derajat celcius untuk menjaga temperatur oven. Arduino Nano memicu Solid State Relay (SSR) 10A guna mengendalikan operasional blower AC. Proses kendali ini berjalan setelah Arduino Nano menerima instruksi (*command run*) dari ESP32 melalui protokol komunikasi UART. Di sisi lain, ESP32 bertindak

sebagai master yang memantau sebaran temperatur melalui tiga thermocouple di setiap rak (tray) oven menggunakan modul MAX6675.

Pengembangan tersebut memberikan kontribusi berupa integrasi ekstraksi perpindahan panas siklus tertutup, pengaplikasian pipa tembaga sebagai penukar panas sekaligus radiator, serta implementasi kendali histeresis berbasis arsitektur master-slave mikrokontroler. Penelitian ini menganalisis hubungan antara laju aliran udara dalam sirkuit tertutup, efektivitas perpindahan panas pipa tembaga, respons sistem kendali ON/OFF, dan tingkat kestabilan temperatur di dalam ruang pengering.

2.2 Dasar teori

2.2.1 Proses Pengeringan Rempah-Rempah

Pengeringan merupakan proses pengurangan kandungan air dalam bahan melalui perpindahan panas dan massa secara bersamaan. Udara panas memberikan energi kepada bahan sehingga air mengalami penguapan. Perbedaan konsentrasi dan tekanan uap kemudian mendorong uap air bergerak dari permukaan bahan menuju udara pengering [2].

Pengeringan bertujuan memperpanjang masa simpan, menghambat pertumbuhan mikroorganisme, mengurangi aktivitas enzim, serta mempertahankan mutu bahan. Proses ini juga mengurangi massa dan volume produk sehingga produsen dapat menekan biaya pengemasan, penanganan, dan pengangkutan.

Produsen perlu mengendalikan temperatur selama proses pengeringan. Temperatur yang terlalu rendah menghasilkan laju penguapan yang lambat dan meningkatkan risiko pertumbuhan mikroorganisme. Sebaliknya, temperatur yang terlalu tinggi dapat merusak warna, aroma, rasa, dan senyawa aktif rempah. Jahe, kunyit, cengkeh, kayu manis, dan jenis rempah lain memiliki temperatur pengeringan optimum yang berbeda sesuai struktur bahan, ketebalan irisan, dan kadar air awal [2], [3].

2.2.2 Thermal Energy Storage (TES)

TES adalah teknologi penyimpanan energi dalam bentuk panas untuk digunakan pada waktu berbeda dari saat pengisian, guna mengatasi temporal mismatch antara pasokan dan kebutuhan energi [11]. Klasifikasi TES

— Sensible Heat Storage (SHS), Latent Heat Storage (LHS), dan Thermochemical Storage (TCS) — ditunjukkan Gambar 2.1. Penelitian ini menggunakan SHS dengan persamaan $Q = m \cdot c_p \cdot \Delta T$, di mana Q = energi tersimpan (J), m = massa media (kg), c_p = kapasitas panas spesifik (J/kg.°C), dan ΔT = selisih temperatur (°C) [11][12]. Implementasi TES pada sistem surya dapat meningkatkan faktor kapasitas sistem dari 25–30% menjadi 60–80% [11].

2.2.3 Perpindahan panas secara konveksi

Perpindahan panas secara konveksi adalah proses perpindahan energi termal (kalor) yang terjadi melalui medium udara, yang disertai dengan pergerakan makroskopis dari massa udara tersebut. Berbeda dengan konduksi yang memindahkan panas pada material padat statis, perpindahan panas konveksi sangat bergantung pada dinamika aliran udara untuk membawa energi dari permukaan bersuhu tinggi menuju area bersuhu lebih rendah. Secara umum, mekanisme konveksi diklasifikasikan menjadi dua jenis, yaitu konveksi alamiah (natural convection) dan konveksi paksa (forced convection). Konveksi alamiah terjadi karena adanya perbedaan gaya apung dan massa jenis udara akibat gradien temperatur. Sebaliknya, konveksi paksa terjadi ketika pergerakan udara didorong secara mekanis oleh perangkat eksternal seperti kipas atau blower.

Dalam analisis termodinamika dan perpindahan panas, laju kalor konveksi yang terjadi antara permukaan benda padat dan aliran udara yang bergerak di sekitarnya dapat dihitung menggunakan prinsip Hukum Pendinginan Newton (Newton's Law of Cooling). Persamaan matematis untuk laju perpindahan panas konveksi dirumuskan sebagai berikut:

$$q = h \cdot A \cdot (T_s - T_\infty)$$

Keterangan:

q = Laju perpindahan panas konveksi (W)

h = Koefisien perpindahan panas konveksi $\left(\frac{W}{m^2} \cdot K \text{ atau } \frac{W}{m^2} \cdot ^\circ C\right)$

A = Luas permukaan perpindahan panas (m^2)

T_s = Suhu permukaan benda padat penghantar (C)

T_∞ = Suhu udara yang mengalir di sekitar permukaan ($^\circ C$)

Nilai koefisien konveksi (h) sangat bergantung pada karakteristik termal udara, geometri permukaan yang dilalui, serta kecepatan aliran udara. Semakin cepat udara ditiupkan atau mengalir, maka nilai koefisien konveksi akan semakin besar, yang berdampak langsung pada peningkatan laju perpindahan panas secara keseluruhan.

Pada rancang bangun alat pengering berbasis Thermal Energy Storage ini, prinsip yang dominan bekerja adalah konveksi paksa. Perpindahan kalor konveksi ini terjadi pada dua lintasan utama di dalam sirkulasi pipa tembaga *closed-loop*. Fase pertama terjadi ketika aktuator blower meniupkan udara secara paksa melewati coil heat collector yang berada di dalam baterai pasir. Pada fase ini, massa udara yang bergerak akan menyerap energi panas dari dinding bagian dalam pipa tembaga bersuhu tinggi secara konveksi, sehingga suhu udara tersebut meningkat drastis. Fase kedua terjadi ketika udara panas tersebut tiba di bagian pipa tembaga berliku yang berada di dalam oven. Udara panas yang mengalir dari dalam saluran akan melepaskan sebagian kalornya melewati batas dinding pipa menuju lingkungan udara statis di dalam ruang tertutup oven, yang pada akhirnya mendistribusikan panas ke seluruh komoditas rempah. Penggunaan dorongan mekanis dari blower secara signifikan meningkatkan kecepatan aliran udara, sehingga proses ekstraksi dan distribusi termal dari penyimpan panas ke ruang pengering berlangsung jauh lebih cepat dan efisien dibandingkan metode konveksi alamiah.

2.2.4 Power Supply



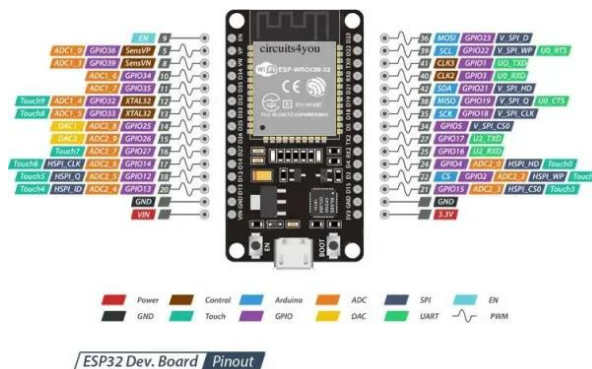
Gambar 2. 1 Power Supply

Power Supply yang digunakan adalah power supply switching 12V 5A, PSU ini digunakan untuk memberikan sumber DC ke keseluruhan komponen seperti mikrokontroler 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 – 1.

Tabel 2 - 1 Spesifikasi PSU

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 ESP32

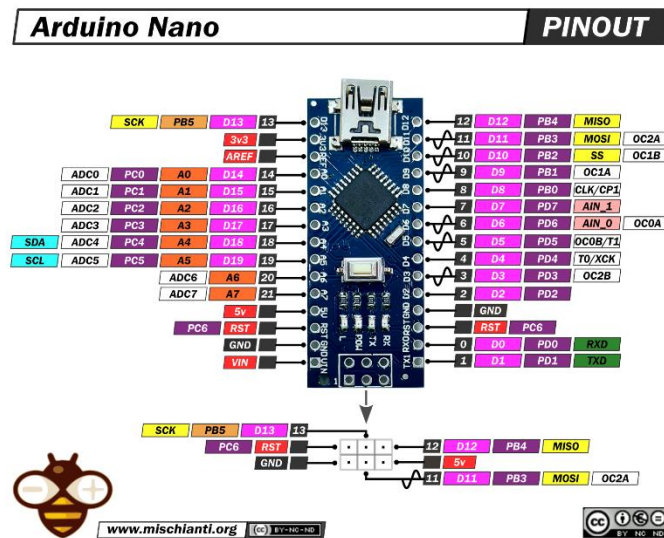
ESP32 adalah SoC 32-bit Xtensa LX6 dual-core hingga 240 MHz, SRAM 520 KB, dilengkapi Wi-Fi 802.11 b/g/n dan Bluetooth 4.2/BLE terintegrasi, 34 pin

GPIO, ADC 12-bit 18 kanal, SPI hingga 80 MHz, dan PWM 16-bit [14]. Difungsikan sebagai master controller: membaca thermocouple via SPI setiap 500 ms, mengeksekusi algoritma kendali hysteresis, mengaktuator relay, dan logging data. Arsitektur sistem kendali secara lengkap ditunjukkan Gambar 2.2. Spesifikasi lengkap ESP32 disajikan pada Tabel 2 – 2.

Tabel 2 - 2 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
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 berbasis ATmega328P, 5V, 16 MHz, dengan 14 pin digital I/O (6 PWM), 8 pin analog ADC 10-bit, dan antarmuka UART/SPI/I2C dengan pinout yang tertera pada Gambar 2. 3 [15]. Berfungsi sebagai slave controller: menangani pembacaan keypad 4×4 (metode row-column scanning) dan pengelolaan LCD 20×4 via I2C menggunakan ekspander PCF8574, berkomunikasi dengan ESP32 melalui UART 115200 bps Spesifikasi lengkap Arduino Nano disajikan dalam Tabel 2 – 3

Tabel 2 - 3 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)

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

2.2.7 Panel Surya Monokristal 500 WP



Gambar 2. 4 Panel Surya 500wp

Panel surya atau sel fotovoltaik seperti pada Gambar 2. 4, adalah perangkat yang mengkonversi energi cahaya matahari menjadi energi listrik melalui efek fotovoltaik. Panel surya monokristal (monocrystalline) memiliki efisiensi konversi

tertinggi dibandingkan jenis lainnya, berkisar antara 19-22%, karena sel-selnya terbuat dari silikon dengan kemurnian tinggi dan struktur kristal tunggal [26]. Dalam sistem ini digunakan dua panel surya monokristal masing-masing berkapasitas 500 WP yang dihubungkan secara paralel, menghasilkan total kapasitas 1000 WP. Kapasitas ini dipilih untuk memastikan daya yang cukup baik untuk memanaskan sand battery maupun mengoperasikan seluruh sistem kontrol secara bersamaan. Spesifikasi panel surya yang digunakan dapat dilihat pada Tabel 2 – 4.

Tabel 2 - 4 Spesifikasi Panel Surya 500 Wp

Kategori	Spesifikasi
Jenis	Monokristal (Monocrystalline)
Daya Puncak (Pmax)	500 Watt-Peak (WP) per panel
Total Daya (2 Panel)	1000 WP
Tegangan Rangkaian Terbuka (Voc)	49,5 V
Arus Hubung Singkat (Isc)	13,5 A
Tegangan Maks (Vmp)	41,8 V
Arus Maks (Imp)	11,97 A
Efisiensi Sel	19 - 22%
Koneksi 2 Panel	Paralel (tegangan tetap, arus berganda)

2.2.8 Elemen heater 500 watt



Gambar 2. 5 Heater 500Watt

Heater seperti diperlihatkan pada Gambar 2. 5, berfungsi untuk mengubah energi listrik dari panel surya menjadi energi panas yang akan digunakan untuk memanaskan pasir silika di dalam baterai pasir. Heater ini memiliki daya kerja 500W dengan tegangan 42V dan arus 11,9A. Berjenis heater tubular heater ini menggunakan tuburan berdiameter 8mm. Panjang heater adaah 40cm

2.2.9 Modul Thermocouple dan MAX6675



Gambar 2. 6 Thermocouple dan MAX6675

Thermocouple tipe K seperti pada Gambar 2. 6, merupakan salah satu jenis sensor suhu yang paling umum digunakan dalam sistem industri maupun laboratorium karena memiliki rentang suhu yang luas, respon cepat, dan ketahanan

terhadap suhu tinggi. Sensor ini tersusun dari dua logam konduktor berbeda yaitu Chromel (Ni–Cr) dan Alumel (Ni–Al) yang disambungkan pada salah satu ujungnya. Ketika sambungan kedua logam tersebut mengalami perbedaan suhu antara ujung panas (hot junction) dan ujung referensi (cold junction), akan timbul perbedaan tegangan listrik (efek Seebeck) yang sebanding dengan perbedaan suhu tersebut. Tegangan ini kemudian dikonversi menjadi nilai suhu oleh sistem pengukuran. Spesifikasi lengkap thermocouple tipe K dan MAX6675 dapat dilihat pada Tabel 2 - 5.

Tabel 2 - 5 Spesifikasi Thermocouple Tipe K

Kategori	Spesifikasi
Nama Modul	Thermocouple Tipe K
Jenis Logam	Chromel (Ni–Cr) dan Alumel (Ni–Al)
Rentang Suhu Kerja	–200 °C hingga +1260 °C
Akurasi Standar (IEC 60584-1)	$\pm 1,5$ °C atau $\pm 0,4\%$ dari nilai bacaan (mana yang lebih besar)
Sensitivitas (Koefisien Seebeck)	$\pm 41 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$
Respon Waktu	0,5–4 detik tergantung jenis pelindung (<i>sheath</i>)
Material Selubung (Sheath)	Stainless steel atau Inconel
Diameter Sensor Umum	1 mm – 6 mm
Tipe Konektor	Mini plug, standard plug, atau terminal lug
Tegangan Output Maksimum	± 50 mV (pada 1200 °C)
Isolasi	Fiberglass, Teflon, atau Ceramic

Kategori	Spesifikasi
Kelas Akurasi (IEC 60584-2)	Class 1 ($\pm 1,5\text{ }^{\circ}\text{C}$) dan Class 2 ($\pm 2,5\text{ }^{\circ}\text{C}$)
Ketahanan Lingkungan	Tahan terhadap oksidasi, korosi ringan, dan getaran

2.2.10 Solid State Relay (SSR)



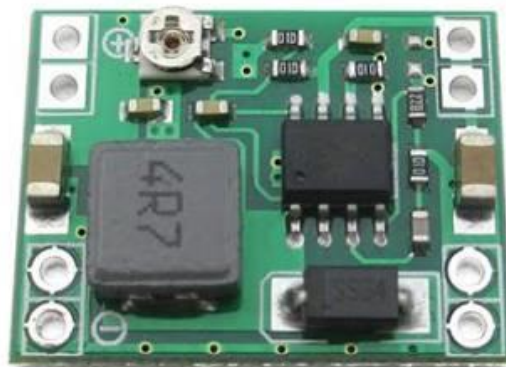
Gambar 2. 7 SSR (Solid State Relay)

Solid State Relay (SSR) pada Gambar 2. 7 adalah relay elektronik tanpa komponen mekanis bergerak yang berfungsi mengendalikan aliran listrik AC menggunakan sinyal kontrol DC dari ESP32. Berbeda dengan relay mekanik biasa, SSR memberikan pengalihan yang sangat cepat, andal, bebas suara, dan bebas percikan api sehingga jauh lebih aman untuk digunakan dalam sistem yang mengendalikan elemen pemanas (heater) berdaya besar [7]. SSR dikendalikan langsung oleh sinyal GPIO dari ESP32 untuk menyalakan atau mematikan elemen pemanas sand battery berdasarkan logika kontrol suhu. Spesifikasi SSR yang digunakan dapat dilihat pada Tabel 2 – 6.

Tabel 2 - 6 Spesifikasi SSR

Kategori	Spesifikasi
Model	SSR-40DA
Jenis	Solid State Relay (SSR)
Tegangan Input (Kontrol)	3 – 32V DC
Tegangan Output (Beban)	24 – 380V AC
Arus Output Maks.	40 A
Jenis Output	AC (Zero-crossing trigger)
Response Time	≤ 10 ms
Isolasi	Optocoupler (isolasi galvanik)
Keunggulan vs Relay Mekanik	Tanpa percikan api, bebas suara, umur panjang

2.2.11 Step Down



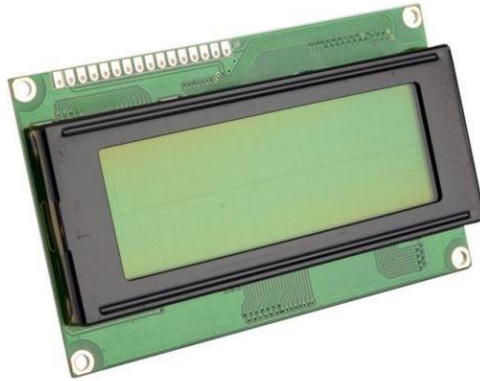
Gambar 2. 8 Modul Step Down

Modul step-down DC-DC 3A 10W pada Gambar 2. 8 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 3,3V untuk ESP32 dan ardiono nano. Spesifikasi modul step down yang digunakan dapat dilihat pada Tabel 2 – 7.

Tabel 2 - 7 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)
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	±22 mm × 17 mm × 4 mm
Tegangan Ripple Output	< 30 mV (pada beban penuh)
Suhu Operasional	–40 °C hingga +85 °C

2.2.12 LCD 20x4



Gambar 2. 9 LCD

LCD I2C pada Gambar 2.9 merupakan modul tampilan berbasis Liquid Crystal Display (LCD) yang menggunakan protokol komunikasi Inter-Integrated Circuit (I2C) untuk berkomunikasi dengan mikrokontroler. Pada sistem yang dirancang, modul LCD I2C diintegrasikan dengan mikrokontroler ESP32 sebagai media penampil informasi sistem. Antarmuka I2C memungkinkan komunikasi hanya menggunakan dua jalur data utama, yaitu SDA (Serial Data) dan SCL (Serial Clock), sehingga lebih efisien dalam penggunaan pin dibandingkan metode paralel konvensional. Pada ESP32, 30 pin I2C dapat dikonfigurasi secara fleksibel melalui pemrograman, namun secara umum menggunakan GPIO21 sebagai SDA dan GPIO22 sebagai SCL. LCD 16x2 digunakan sebagai media interaksi pengguna (user interface) yang menampilkan informasi sistem secara real-time, seperti: a. Status sensor (aktif/tidak aktif) b. Proses monitoring atau scanning (berjalan/selesai) c. Nilai kecepatan kendaraan yang terdeteksi d. Konfirmasi pencatatan atau penyimpanan data Penggunaan LCD I2C pada sistem berbasis ESP32 memberikan beberapa keuntungan, antara lain:

1. Menghemat jumlah pin GPIO
2. Mempermudah proses wiring
3. Mendukung komunikasi data yang stabil

4. Memudahkan proses debugging tanpa memerlukan koneksi komputer

Modul LCD I2C umumnya menggunakan IC ekspander seperti PCF8574 yang mengubah komunikasi I2C menjadi sinyal paralel untuk LCD. Dengan demikian, ESP32 dapat mengontrol tampilan hanya melalui dua jalur komunikasi. Pada sistem monitoring kecepatan kendaraan yang dirancang, LCD 16x2 berfungsi sebagai indikator visual untuk menampilkan hasil pembacaan sensor photo beam dan status sistem secara langsung kepada pengguna.

2.2.13 Keypad 4X4



Gambar 2. 10 Keypad

Keypad 4x4 pada Gambar 2.10 merupakan modul input yang digunakan untuk memberikan perintah atau data ke mikrokontroler melalui tombol fisik. Modul ini terdiri atas 16 tombol yang tersusun dalam 4 baris (rows) dan 4 kolom (columns), sehingga sering disebut sebagai *matrix keypad 4x4*.

Setiap tombol pada keypad terhubung di titik perpotongan antara satu baris dan satu kolom. Ketika salah satu tombol ditekan, sirkuit antara baris dan kolom tersebut tertutup dan mikrokontroler mendeteksi perubahan sinyal logika (HIGH ke LOW atau sebaliknya). Proses pembacaan tombol dilakukan dengan teknik scanning, yaitu mikrokontroler secara bergantian mengaktifkan setiap baris dan

membaca sinyal pada kolom. Spesifikasi Keypad 4×4 yang digunakan dapat dilihat pada Tabel 2 – 8.

Tabel 2 - 8 Spesifikasi Keypad

Kategori	Spesifikasi
Nama Modul	Keypad Matrix 4x4
Jumlah Tombol	16 tombol (4 baris $\times$ 4 kolom)
Tegangan Operasional	3.3 V – 5 V DC
Level Logika I/O	0–9, A–D, *, #
Level Logika I/O	TTL (0 V = LOW, 5 V = HIGH)
Material Tombol	Plastik elastomer tahan tekanan
Konsumsi Arus	< 1 mA
Jenis Koneksi	Header pin 8-pin (R1–R4 dan C1–C4)
Metode Pembacaan	<i>Matrix scanning</i> (baris & kolom)
Dimensi Modul	$\pm 70 \text{ mm} \times 77 \text{ mm} \times 8 \text{ mm}$
Dimensi Modul	$\pm 20 \text{ gram}$
Kompatibilitas	Arduino, ESP32, STM32, dan mikrokontroler lainnya

2.2.14 Pipa Tembaga



Gambar 2. 11 Pipa Tembaga

Pipa tembaga pada Gambar 2. 11 merupakan saluran berbentuk silinder yang menggunakan tembaga sebagai material utama. Material ini memiliki konduktivitas termal yang tinggi, ketahanan korosi yang baik, dan sifat mekanis yang mendukung proses pembentukan. Karakteristik tersebut membuat pipa tembaga banyak digunakan pada sistem pemanas, pendingin, dan penukar kalor.

Penelitian ini menggunakan pipa tembaga sebagai bahan dasar pembuatan *coil* pada sistem *sand battery*. Berdasarkan spesifikasi yang tercantum pada kemasan, pipa tembaga memiliki ukuran nominal 1/2 inci, ketebalan dinding sekitar 0,61 mm, dan panjang awal 15 m. Bentuk gulungan memudahkan proses pembentukan pipa menjadi susunan heliks sesuai rancangan awal *coil*.

Pipa tembaga berfungsi sebagai jalur aliran udara sekaligus media perpindahan panas. Udara dari blower mengalir melalui bagian dalam pipa, sedangkan permukaan luar pipa bersentuhan dengan pasir silika. Perbedaan temperatur antara pasir silika dan udara di dalam pipa mendorong perpindahan energi termal melalui dinding pipa.

2.2.15 Coil Tembaga



Gambar 2. 12 Coil Tembaga



Gambar 2. 13 Coil Pengering

Coil tembaga merupakan susunan pipa berbentuk spiral yang berfungsi sebagai penukar panas pada sistem *sand battery*. Pasir silika memindahkan panas menuju permukaan pipa, kemudian pipa tembaga menghantarkan panas kepada udara yang mengalir dari blower. Bentuk fisik *Coil* yang digunakan pada *sand battery* dan pada pengering dapat dilihat pada Gambar 2. 12 dan Gambar 2. 13.

Bentuk spiral memperluas area kontak antara pipa dan pasir silika sehingga proses perpindahan panas dapat berlangsung pada beberapa bagian media penyimpanan. Kinerja *coil* dipengaruhi oleh diameter pipa, panjang jalur, debit udara, jumlah belokan, dan perbedaan temperatur antara pasir dengan udara.

2.2.16 Google Spreadsheet

Google Spreadsheet merupakan perangkat lunak pengolah angka (*spreadsheet*) yang beroperasi sepenuhnya di dalam ekosistem komputasi awan (*cloud computing*). Dalam konteks rekayasa *Internet of Things* (IoT) dan sistem akuisisi data, platform ini sering dialihfungsikan sebagai basis data sekunder dan alat perekam jejak (*data logger*). Fungsinya adalah untuk menyimpan parameter-parameter fisik yang diukur oleh instrumen mikrokontroler secara kronologis, berkesinambungan, dan dapat diakses dari jarak jauh.

Integrasi komunikasi antara perangkat keras (seperti ESP32) dengan Google Spreadsheet umumnya dijumpai oleh layanan Google Apps Script (GAS). Dalam arsitektur sistem ini, GAS berperan sebagai antarmuka pemrograman aplikasi (*Application Programming Interface/API*) atau titik akhir (*endpoint*) yang bertugas menerima *request* protokol HTTP (*Hypertext Transfer Protocol*), baik menggunakan metode GET maupun POST. Melalui protokol ini, paket data historis hasil pembacaan sensor—seperti distribusi suhu matriks pasir, tingkat kelembapan ruang pengering, hingga fluktuasi daya panel surya—dapat diterima, diurai (*parsing*), dan disisipkan secara otomatis ke dalam sel, baris, dan kolom lembar kerja secara *real-time*.

Pemanfaatan Google Spreadsheet sebagai fasilitas perekaman data memberikan keunggulan analitis yang krusial pada pengujian sistem rekayasa. Data numerik mentah yang telah direkam tidak hanya tersimpan secara persisten di *server*, tetapi juga dapat langsung dikalkulasi menggunakan formula matematis bawaan, diekspor ke format standar analisis (seperti CSV), dan divisualisasikan dalam bentuk kurva tren. Metode pencatatan otomatis ini mengeliminasi risiko kesalahan manusia (*human error*) dalam proses tabulasi manual, serta memudahkan peneliti dalam menyusun perhitungan neraca energi dan efisiensi termal tanpa harus membangun arsitektur pangkalan data tradisional (seperti MySQL) dari awal.

2.2.17 Blynk

Blynk merupakan sebuah platform *Internet of Things* (IoT) komprehensif yang dirancang untuk memfasilitasi kendali jarak jauh serta pemantauan data perangkat keras secara *real-time* melalui jaringan internet. Dalam ekosistem rekayasa sistem tertanam (*embedded system*), Blynk berfungsi sebagai jembatan komunikasi (*middleware*) yang menghubungkan mikrokontroler dengan antarmuka grafis (*Graphical User Interface/GUI*) pada perangkat seluler pintar (*smartphone*) maupun dasbor berbasis web.

Secara struktural, arsitektur sistem Blynk beroperasi berdasarkan tiga komponen utama penyusun jaringan IoT, yaitu:

1. **Blynk App / Web Dashboard (Antarmuka Pengguna):** Merupakan aplikasi sisi klien (*client-side*) yang menyediakan berbagai *widget* interaktif seperti

grafik (*chart*), pengukur (*gauge*), dan tampilan nilai numerik (*labeled value*). Antarmuka ini memungkinkan pengguna untuk menyusun *dashboard* pemantauan parameter sistem secara visual tanpa perlu melakukan pemrograman aplikasi *front-end* dari awal.

2. **Blynk Cloud Server:** Berfungsi sebagai peladen pusat (pusat kendali jaringan) yang bertugas menerima, memproses, dan merutekan aliran paket data secara asinkron antara perangkat keras dan aplikasi pengguna. Server ini memastikan sinkronisasi data terjadi dengan latensi yang minimal dan koneksi yang stabil.
3. **Blynk Libraries (Pustaka Perangkat Keras):** Kumpulan perintah perangkat lunak (*firmware*) yang ditanamkan ke dalam mikrokontroler (seperti ESP32). Pustaka ini memuat protokol komunikasi yang secara otomatis mengelola koneksi WiFi, proses autentikasi (*Auth Token*), serta pengiriman dan penerimaan paket data ke *server* Blynk.

Konsep *Virtual Pin* (Pin Virtual) Salah satu keunggulan utama platform Blynk dalam sistem akuisisi data adalah pemanfaatan *Virtual Pin* (V-Pin). Berbeda dengan pin fisik/digital pada mikrokontroler (GPIO) yang memiliki batasan perangkat keras, *Virtual Pin* adalah saluran logika perangkat lunak yang dirancang untuk mengirimkan berbagai jenis format data secara terstruktur.

Melalui instruksi pemrograman dasar seperti `Blynk.virtualWrite(V_PIN, nilai_data)`, mikrokontroler dapat mengirimkan hasil kalkulasi matematis atau konversi data sensor majemuk ke *server*. Dalam konteks pemantauan sistem konversi energi, metode pin virtual ini memungkinkan puluhan parameter pembacaan secara simultan—seperti data kelistrikan (tegangan, arus, daya panel surya) dan data termodinamika (suhu matriks baterai, profil suhu ruang oven, dan kelembapan absolut)—untuk dikirimkan secara terpisah dan direpresentasikan pada *dashboard* pemantauan pemroses akhir secara presisi dan sistematis.