

BAB II

LANDASAN TEORI

2.1 Tinjauan Pustaka

Pengembangan sistem pengering (*dehydrator*) pada oven merupakan salah satu topik yang cukup banyak dikembangkan dalam bidang sistem kendali. Sistem pengering yang baik harus mampu menjaga kestabilan suhu agar proses pengeringan berlangsung merata serta kualitas bahan tetap terjaga. Oleh karena itu, sebelum melakukan perancangan sistem pada Tugas Akhir ini, perlu dilakukan tinjauan terhadap beberapa penelitian terdahulu yang relevan sebagai dasar pengembangan sistem yang akan dibuat.

1. Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh Muhammad Irsyad Awaludin dan Bakti Dwi Waluyo dengan judul “Perancangan Sistem Kontrol Suhu Oven Listrik Menggunakan Metode PID”, dijelaskan bahwa metode PID dapat digunakan untuk meningkatkan performa pengendalian suhu pada oven listrik. Sistem dirancang untuk mengurangi fluktuasi temperatur yang sering terjadi pada sistem kontrol *on-off*. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kontrol PID mampu menghasilkan respon suhu yang lebih stabil terhadap *setpoint* yang diberikan. Akan tetapi, penelitian ini lebih berfokus pada metode kontrol suhu dan belum membahas sistem monitoring jarak jauh berbasis IoT [1].
2. Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh Refni Wahyuni dkk. dengan judul “*Smart Food Dehidrator Berbasis IoT Untuk Menghasilkan Cemilan Sehat*”, dijelaskan bahwa sistem dehidrator berbasis IoT dapat dimanfaatkan untuk membantu proses pengeringan bahan makanan dengan pengawasan suhu dan kondisi pengering secara lebih mudah. Sistem yang dikembangkan memanfaatkan sensor suhu dan kelembapan serta monitoring berbasis internet sehingga kondisi pengering dapat dipantau secara *real-time*. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penggunaan IoT memberikan kemudahan dalam proses monitoring selama pengeringan berlangsung. Namun, sistem yang dikembangkan belum menggunakan *temperature controller* sebagai pengendali utama suhu [4].

3. Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh Muhammad Irsyad Annafi, Abdul Syakur, dan Ajub Ajulian Zahra dengan judul “Perancangan Kontrol Suhu Berbasis PID pada Oven Listrik Hemat Energi”, dijelaskan bahwa penggunaan metode PID pada oven listrik mampu meningkatkan kestabilan suhu dibandingkan metode kontrol lainnya. Sistem menggunakan sensor suhu dan mikrokontroler sebagai pengendali utama untuk mengatur kerja elemen pemanas. Hasil pengujian menunjukkan bahwa kontrol PID mampu mempertahankan suhu mendekati *setpoint* pada beberapa pengujian temperatur. Namun, penelitian ini belum dilengkapi dengan sistem monitoring berbasis *Internet of Things* (IoT) [5].
4. Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh Ainun Nidhar, Belyamin, Sonki Prasetya, dan Dianta Mustofa Kamal dengan judul “Perbandingan Kontrol Temperatur menggunakan Relay dan PID pada Oven Pengering berbasis *Load Cell* untuk Mengukur Kadar Air Buah”, dijelaskan bahwa penggunaan kontrol PID pada oven pengering memberikan kestabilan suhu yang lebih baik dibandingkan kontrol relay biasa. Penelitian ini juga mengintegrasikan sistem pengukuran kadar air menggunakan *load cell* selama proses pengeringan berlangsung. Hasil penelitian menunjukkan bahwa sistem pengering mampu bekerja lebih optimal dalam menjaga temperatur selama proses pengeringan buah. Namun, sistem monitoring yang digunakan masih bersifat lokal dan belum terhubung melalui jaringan internet [6].

Berdasarkan kajian terhadap penelitian-penelitian terdahulu tersebut, dapat diketahui bahwa sebagian besar penelitian masih berfokus pada sistem kontrol suhu atau sistem monitoring secara terpisah. Selain itu, beberapa penelitian belum menerapkan *temperature controller* industri sebagai pengendali utama suhu serta belum mengintegrasikan kontrol suhu otomatis dengan monitoring berbasis IoT dalam satu sistem. Oleh karena itu, pada Tugas Akhir ini dikembangkan sistem kontrol suhu *dehydrator* listrik berbasis *temperature controller* TC4S dengan monitoring berbasis IoT menggunakan ESP32. Sistem yang dirancang diharapkan mampu menjaga kestabilan suhu secara otomatis sekaligus memberikan

kemudahan monitoring suhu secara *real-time* melalui Telegram dan Google Spreadsheet.

2.2 Dasar Teori

2.2.1 *Dehydrator* Listrik

Dehydrator listrik merupakan alat yang digunakan untuk mengurangi kadar air pada suatu bahan melalui proses pengeringan dengan memanfaatkan energi listrik yang dikonversi menjadi energi panas oleh elemen pemanas. Berbeda dengan metode pengeringan yang memanfaatkan sinar matahari, *dehydrator* listrik mampu menghasilkan kondisi pengeringan yang lebih terkontrol sehingga proses pengeringan tidak dipengaruhi oleh perubahan cuaca. Pengaturan suhu yang stabil selama proses pengeringan berperan penting dalam menjaga kualitas bahan serta mengurangi risiko kerusakan akibat suhu yang terlalu tinggi maupun waktu pengeringan yang tidak sesuai. [4], [7].

Secara umum, *dehydrator* listrik terdiri atas ruang pengering, elemen pemanas (*heater*), sensor suhu, dan sistem pengendali temperatur yang bekerja untuk menghasilkan kondisi pengeringan yang stabil. Energi panas yang dihasilkan oleh elemen pemanas akan meningkatkan temperatur di dalam ruang pengering sehingga air yang terkandung pada bahan dapat menguap secara bertahap. Selama proses tersebut, sistem pengendali suhu berfungsi mempertahankan temperatur sesuai nilai yang telah ditetapkan sehingga proses pengeringan berlangsung secara lebih konsisten. [7].

Penggunaan *dehydrator* listrik terus berkembang sebagai salah satu teknologi pengeringan yang mampu menghasilkan proses pengeringan secara lebih efektif dan terkontrol. Kemampuan alat dalam mempertahankan suhu pada rentang tertentu memungkinkan proses pengurangan kadar air berlangsung secara lebih merata sehingga kualitas produk hasil pengeringan dapat dipertahankan. Selain meningkatkan efisiensi proses, *dehydrator* listrik juga memberikan fleksibilitas dalam pelaksanaan pengeringan karena dapat dioperasikan tanpa bergantung pada kondisi lingkungan maupun intensitas sinar matahari. Dengan karakteristik tersebut, *dehydrator* listrik banyak dimanfaatkan pada proses pengolahan hasil

pertanian, produk pangan, dan tanaman herbal yang memerlukan proses pengeringan dengan pengendalian suhu yang baik untuk memperoleh hasil pengeringan yang optimal [4], [7].

2.2.1.1 Mekanisme Pengeringan

Pengeringan menggunakan *dehydrator* merupakan metode pengeringan yang memanfaatkan aliran udara panas untuk mengurangi kandungan air pada bahan pangan. Menurut Mujumdar, mekanisme pengeringan dengan udara panas terjadi melalui proses perpindahan panas dari udara menuju permukaan bahan, kemudian diikuti oleh perpindahan massa berupa penguapan air dari dalam bahan ke lingkungan sekitarnya.

Pada tahap awal proses pengeringan, elemen pemanas menghasilkan panas yang digunakan untuk meningkatkan temperatur udara di dalam ruang pengering. Udara panas yang berada di sekitar elemen pemanas akan bergerak ke arah atas secara alami akibat perbedaan massa jenis udara. Tray berlubang yang digunakan sebagai tempat bahan, memungkinkan udara panas melewati setiap tingkat penyusunan tray sehingga panas dapat menyebar ke seluruh ruang pengering. Selanjutnya, udara panas tersebut berkontak dengan permukaan bahan sehingga terjadi perpindahan panas secara konveksi. Energi panas yang diterima oleh bahan kemudian dimanfaatkan untuk menguapkan kadar air yang berada pada permukaan bahan.

Setelah kandungan air pada permukaan mulai berkurang, air yang masih berada di bagian dalam bahan akan bergerak menuju permukaan akibat adanya perbedaan kadar air antara bagian dalam dan permukaan bahan. Air yang telah mencapai permukaan kemudian kembali mengalami penguapan karena kontak dengan udara panas yang terus mengalir. Proses ini berlangsung terus-menerus hingga kadar air bahan menurun dan mencapai kondisi yang diinginkan.

2.2.1.2 Faktor yang Mempengaruhi Proses Pengeringan

Keberhasilan proses pengeringan dipengaruhi oleh berbagai faktor yang berkaitan dengan kondisi operasi maupun karakteristik bahan yang dikeringkan. Faktor-faktor tersebut menentukan laju penguapan air, waktu pengeringan, serta

kualitas akhir produk yang dihasilkan. Pengaturan kondisi pengeringan yang tepat diperlukan agar proses berlangsung secara efisien tanpa menyebabkan kerusakan pada bahan akibat suhu yang terlalu tinggi maupun waktu pengeringan yang terlalu lama. Oleh karena itu, pemilihan parameter pengeringan harus disesuaikan dengan sifat fisik bahan sehingga kadar air yang diinginkan dapat dicapai dengan tetap mempertahankan mutu produk [8].

Suhu pengeringan merupakan salah satu faktor utama yang memengaruhi laju pengeringan. Peningkatan suhu akan meningkatkan energi panas yang diterima bahan sehingga mempercepat proses penguapan air. Namun, penggunaan suhu yang terlalu tinggi dapat menyebabkan perubahan warna, tekstur, aroma, serta menurunkan kandungan nutrisi pada bahan pangan. Sebaliknya, suhu yang terlalu rendah menyebabkan laju pengeringan menjadi lambat sehingga waktu proses menjadi lebih panjang.

Selain suhu, kadar air awal bahan, ketebalan irisan, kelembapan udara, dan lama waktu pengeringan juga memengaruhi efektivitas proses pengeringan. Bahan dengan kadar air awal yang tinggi memerlukan waktu pengeringan lebih lama dibandingkan bahan dengan kadar air yang lebih rendah. Ketebalan bahan turut memengaruhi jarak perpindahan air dari bagian dalam menuju permukaan, sehingga semakin tebal bahan maka semakin lambat proses pengeringannya. Di sisi lain, kelembapan udara yang tinggi akan mengurangi kemampuan udara dalam menyerap uap air sehingga laju pengeringan menurun. Oleh sebab itu, pengaturan seluruh parameter tersebut perlu dilakukan secara tepat agar proses pengeringan berlangsung secara efektif dan menghasilkan produk dengan kualitas yang baik.

2.2.2 Oven Tangkring

Oven tangkring merupakan salah satu jenis oven yang digunakan pada skala rumah tangga maupun industri kecil untuk proses pemanasan, pemanggangan maupun pengeringan dengan memanfaatkan panas dari kompor sebagai sumber energi pemanas. Oven tangkring bekerja dengan memanfaatkan energi panas untuk mengurangi kandungan air yang terdapat pada bahan. Ketika suhu di dalam ruang oven meningkat, air yang terkandung di dalam bahan akan menyerap energi panas

dan berubah menjadi uap air. Oven tangkring umumnya digunakan karena mudah dioperasikan, tersedia dalam berbagai ukuran sesuai kebutuhan, serta memiliki konstruksi yang sederhana. Pada penelitian ini digunakan oven tangkring merek Bima Rizki dengan dimensi $36 \times 29 \times 34$ cm sebagai ruang pengering yang ditunjukkan pada Gambar 2- 1.



Gambar 2- 1 Oven Tangkring

Pada umumnya pengaturan suhu pada oven tangkring masih dilakukan secara manual dengan mengatur besar kecilnya sumber panas yang digunakan. Metode tersebut memiliki beberapa keterbatasan, salah satunya adalah sulitnya mempertahankan suhu pada nilai tertentu selama proses pengeringan berlangsung. Perkembangan teknologi sistem kendali memungkinkan oven tangkring dimodifikasi menjadi alat pengering yang memiliki tingkat kestabilan suhu lebih baik. Oven tersebut dimodifikasi dengan mengganti sumber panas menggunakan elemen pemanas listrik (*heater*). Modifikasi ini bertujuan untuk menghasilkan proses pengeringan yang lebih stabil melalui pengendalian suhu secara otomatis, sehingga temperatur di dalam ruang pengering dapat dipertahankan sesuai nilai yang telah ditentukan.

2.2.3 Temperature Controller TC4S

Temperature Controller (TC) merupakan perangkat elektronik yang berfungsi untuk mengendalikan dan mempertahankan temperatur suatu sistem agar sesuai dengan nilai *set point* yang telah ditentukan. Perangkat ini menerima data temperatur dari sensor, kemudian membandingkannya dengan nilai temperatur yang diinginkan untuk menentukan tindakan pengendalian terhadap aktuator.

Dengan mekanisme tersebut, temperatur sistem dapat dijaga agar tetap stabil selama proses berlangsung. Penggunaan *temperature controller* banyak diterapkan pada berbagai aplikasi industri, seperti sistem pemanas, oven, inkubator, dan alat pengering, karena mampu meningkatkan kestabilan proses serta mengurangi penyimpangan temperatur yang dapat memengaruhi kualitas hasil produksi.

Salah satu *temperature controller* yang banyak digunakan pada sistem pengendalian suhu adalah TC4S-R1TC. Perangkat ini merupakan *digital temperature controller* yang mendukung metode pengendalian *ON/OFF* dan PID serta kompatibel dengan berbagai jenis sensor temperatur, salah satunya thermocouple tipe-k. Selain itu, TC4S-R1TC menyediakan keluaran kontrol berupa relay dan SSR Drive yang dapat digunakan untuk mengendalikan elemen pemanas sesuai kebutuhan sistem. Perangkat ini juga dilengkapi tampilan digital yang menampilkan *Process Value* (PV) sebagai temperatur aktual hasil pembacaan sensor dan *Set Value* (SV) sebagai temperatur target yang telah ditentukan oleh pengguna seperti pada Gambar 2-2.



Gambar 2- 2 *Temperature Controller TC4S-R1TC*

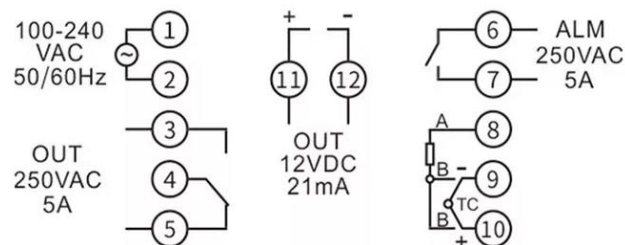
Prinsip kerja TC4S-R1TC diawali dengan pembacaan temperatur oleh sensor thermocouple yang kemudian dikirimkan ke *temperature controller*. Nilai temperatur aktual tersebut ditampilkan sebagai *Process Value* (PV), kemudian dibandingkan dengan *Set Value* (SV) yang telah ditentukan. Apabila terjadi perbedaan antara PV dan SV, *temperature controller* akan menghasilkan sinyal keluaran untuk mengendalikan aktuatur hingga temperatur mendekati nilai *set*

point. Dengan proses tersebut, temperatur dapat dipertahankan secara otomatis sehingga sistem bekerja lebih stabil dibandingkan pengaturan secara manual.

Dalam sistem *dehydrator* listrik ini, *Temperature Controller* TC4S-R1TC digunakan sebagai pengendali utama suhu pada sistem. Sensor thermocouple tipe-k digunakan sebagai masukan untuk membaca temperatur di dalam ruang pengering, sedangkan keluaran SSR Drive dihubungkan dengan *Solid State Relay* (SSR) untuk mengendalikan elemen pemanas. Adapun spesifikasi *Temperature Controller* TC4S-R1TC dapat dilihat pada Tabel 2- 1.

Tabel 2- 1 Spesifikasi *Temperature Controller* TC4S-R1TC

Spesifikasi	Keterangan
Model	TC4S-R1TC
Jenis Perangkat	Digital <i>Temperature Controller</i>
Ukuran Panel	48 mm × 48 mm
Tegangan Catu Daya	100–240 VAC, 50/60 Hz
Jenis Sensor Masukan	Thermocouple Tipe-K
Rentang Pengukuran	0–400 °C
Metode Pengendalian	ON/OFF dan PID
<i>Output</i> Kontrol	Relay 250 VAC, 5 A
<i>Output</i> Alarm	Relay 250 VAC, 5 A
SSR Drive <i>Output</i>	12 VDC
Tampilan	Dual LED Display (PV dan SV)



Gambar 2- 3 Pinout *Temperature Controller* TC4S-R1TC

Pada Gambar 2- 3 ditunjukkan susunan terminal *Temperature Controller* TC4S-R1TC yang terdiri atas terminal catu daya, terminal keluaran kontrol,

terminal keluaran alarm, terminal masukan sensor temperatur, dan terminal SSR Drive. Fungsi masing-masing terminal ditunjukkan pada Tabel 2- 2 [9].

Tabel 2- 2 *Pinout Temperature Controller TC4S-R1TC*

No Terminal	Fungsi
1	Masukan catu daya 100–240 VAC
2	Masukan catu daya 100–240 VAC
3	Relay Output / Common
4	Relay Output / Normally Open
5	Relay Output / Normally Closed
6	Alarm Output / Common
7	Alarm Output / Normally Open
8	Terminal A / RTD
9	Thermocouple (–)
10	Thermocouple (+)
11	SSR Drive (+) 12 VDC
12	SSR Drive (–) 12 VDC

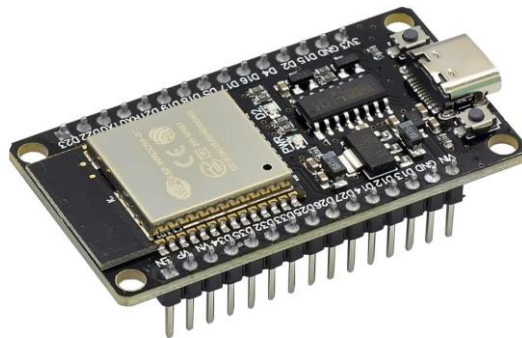
2.2.4 Mikrokontroler ESP32

Mikrokontroler merupakan suatu sistem komputer terintegrasi yang terdiri atas *Central Processing Unit* (CPU), memori, serta antarmuka masukan dan keluaran (*Input/Output*) yang dikemas dalam satu rangkaian terpadu (*Integrated Circuit/IC*). Mikrokontroler dirancang untuk menjalankan tugas pengendalian secara otomatis melalui program yang tersimpan di dalam memori sehingga mampu melakukan proses pembacaan data, pengolahan informasi, dan pengendalian perangkat elektronik secara *real-time*. Dengan ukuran yang ringkas, konsumsi daya yang relatif rendah, serta kemampuan pemrosesan yang baik, mikrokontroler banyak digunakan pada berbagai sistem kendali, instrumentasi, dan otomasi modern.

ESP32 merupakan mikrokontroler yang dikembangkan oleh Espressif Systems sebagai penerus seri ESP8266 dengan peningkatan pada kemampuan pemrosesan data, kapasitas memori, serta fitur komunikasi nirkabel. Mikrokontroler ini mengintegrasikan prosesor, memori, modul Wi-Fi, dan Bluetooth ke dalam satu chip sehingga dapat digunakan pada berbagai aplikasi sistem kendali dan monitoring berbasis *Internet of Things* (IoT). Tingginya tingkat integrasi tersebut menjadikan ESP32 banyak dimanfaatkan pada bidang otomasi, instrumentasi, *smart home*, maupun sistem monitoring karena mampu menyederhanakan perancangan perangkat keras serta mengurangi kebutuhan modul komunikasi tambahan [10].

Salah satu keunggulan ESP32 adalah tersedianya modul Wi-Fi IEEE 802.11 b/g/n dan Bluetooth v4.2 (BR/EDR dan Bluetooth Low Energy/BLE) yang telah terintegrasi pada satu chip. Fitur tersebut memungkinkan proses pertukaran data dilakukan secara nirkabel tanpa memerlukan perangkat komunikasi tambahan. Berbagai penelitian menunjukkan bahwa ESP32 memiliki performa yang baik dalam aplikasi monitoring berbasis IoT karena mampu mengirimkan data sensor secara *real-time*, memiliki konsumsi daya yang relatif rendah, serta mudah diintegrasikan dengan berbagai layanan berbasis internet [10].

Dalam sistem yang dirancang, ESP32 DevKit V1 digunakan sebagai mikrokontroler pada sistem monitoring *dehydrator* listrik. ESP32 bertugas membaca data temperatur dari sensor thermocouple tipe-k melalui modul MAX6675, kemudian mengirimkan hasil pembacaan tersebut ke Google Spreadsheet dan Telegram Bot melalui jaringan Wi-Fi. Adapun proses pengendalian suhu tetap dilakukan oleh *Temperature Controller* TC4S, sehingga fungsi ESP32 pada penelitian ini difokuskan sebagai perangkat akuisisi data dan monitoring suhu secara *real-time*. Dengan pembagian fungsi tersebut, sistem monitoring dapat bekerja tanpa memengaruhi proses pengendalian suhu pada *dehydrator*. Bentuk fisik ESP32 DevKit V1 yang digunakan pada penelitian ini ditunjukkan pada Gambar 2- 4.



Gambar 2- 4 ESP32

Selanjutnya perlu diketahui spesifikasi teknis dari board yang digunakan, spesifikasi tersebut memberikan informasi mengenai kemampuan perangkat, seperti jenis prosesor, kapasitas memori, antarmuka komunikasi, serta karakteristik kelistrikan yang dimiliki. Adapun spesifikasi ESP32 DevKit V1 ditunjukkan pada Tabel 2- 3.

Tabel 2- 3 Spesifikasi ESP32

Spesifikasi	Keterangan
Nama Board	ESP32 DevKit V1
Modul	ESP32-WROOM-32
USB to UART	CH340
Operating Voltage	3.3 V
Input Voltage	5 V (USB) / 5–12 V (VIN)
CPU	Xtensa® Dual-Core 32-bit LX6
Clock Speed	Hingga 240 MHz
SRAM	520 KB
Flash Memory	4 MB
Wi-Fi	IEEE 802.11 b/g/n 2.4 GHz
Bluetooth	Bluetooth v4.2 BR/EDR dan BLE
GPIO	30 pin header pada board (34 GPIO pada modul)
ADC	18-channel 12-bit SAR ADC
DAC	2-channel 8-bit DAC
UART	3
SPI	4

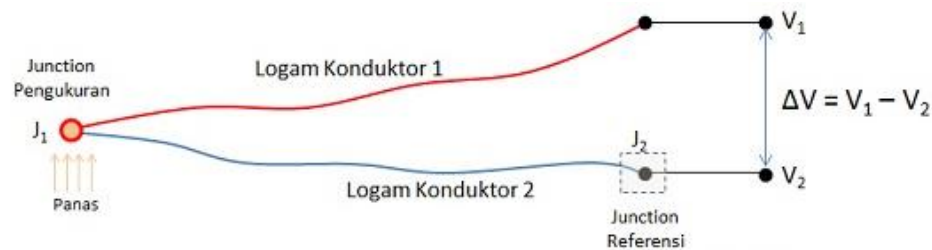
2.2.5 Sensor Thermocouple Tipe-K

Thermocouple merupakan salah satu sensor suhu yang banyak digunakan pada berbagai proses industri maupun penelitian karena memiliki konstruksi yang sederhana, respons pengukuran yang cepat, serta mampu bekerja pada rentang temperatur yang luas. Sensor ini tersusun atas dua logam konduktor yang berbeda dan disambungkan pada salah satu ujungnya. Ketika sambungan tersebut mengalami perbedaan temperatur, akan timbul tegangan listrik yang besarnya sebanding dengan selisih temperatur antara titik pengukuran dan titik referensi. Fenomena tersebut dikenal sebagai Efek Seebeck, yang pertama kali dikemukakan oleh Thomas Johann Seebeck pada tahun 1821 dan menjadi dasar kerja seluruh sensor thermocouple dalam mengubah energi panas menjadi sinyal listrik [11]. Sensor thermocouple yang digunakan ditunjukkan pada Gambar 2- 5.



Gambar 2- 5 Sensor Thermocouple Tipe-K

Prinsip kerja thermocouple didasarkan pada perbedaan temperatur antara *hot junction* dan *cold junction*. Ketika ujung sensor menerima panas dari media yang diukur, sedangkan ujung lainnya berada pada temperatur referensi, akan dihasilkan tegangan termoelektrik dalam orde milivolt. Semakin besar selisih temperatur antara kedua titik tersebut, semakin besar pula tegangan yang dihasilkan. Tegangan keluaran thermocouple tidak dapat diproses secara langsung oleh mikrokontroler sehingga diperlukan rangkaian pengondisi sinyal (*signal conditioning*) yang melakukan kompensasi temperatur referensi sekaligus mengubah sinyal analog menjadi data digital sebelum diteruskan ke sistem kendali. Prinsip kerja thermocouple ditunjukkan pada Gambar 2- 6.



Gambar 2- 6 Prinsip Kerja Thermocouple Tipe-K

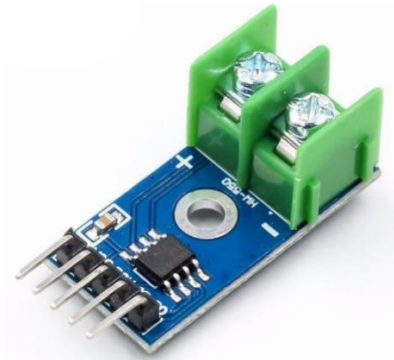
Pada sistem yang dirancang, thermocouple tipe-k digunakan sebagai sensor utama untuk mengukur suhu di dalam ruang pengering pada alat *dehydrator* listrik. Informasi temperatur yang diperoleh dimanfaatkan oleh *Temperature Controller* TC4S sebagai masukan dalam proses pengendalian suhu agar sesuai dengan nilai *setpoint*. Selain itu, data temperatur juga dibaca oleh ESP32 melalui modul MAX6675 untuk keperluan monitoring berbasis Google Spreadsheet dan Telegram Bot. Dengan demikian, kondisi temperatur selama proses pengeringan dapat dipantau secara *real-time* tanpa memengaruhi mekanisme pengendalian suhu yang dilakukan oleh *temperature controller*. Spesifikasi thermocouple tipe-k dapat dilihat pada Tabel 2- 4.

Tabel 2- 4 Spesifikasi Thermocouple Tipe-K

Spesifikasi	Keterangan
Jenis Sensor	Thermocouple Tipe-K
Material Konduktor Positif	Chromel (Ni-Cr)
Material Konduktor Negatif	Alumel (Ni-Al)
Rentang Pengukuran	-200 °C hingga +1.260 °C
Koefisien Seebeck	Sekitar 41 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$ pada 25 °C
Tegangan Keluaran	Tegangan termoelektrik (mV)
Prinsip Kerja	Efek Seebeck
Standar	ANSI/ASTM E230 dan IEC 60584
Akurasi	Standard Limits of Error (SLE): $\pm 2,2\text{ }^\circ\text{C}$ atau $\pm 0,75\%$ dari nilai ukur (dipilih yang lebih besar)

2.2.6 MAX6675

MAX6675 merupakan modul konverter suhu digital yang dirancang khusus untuk membaca sinyal keluaran dari thermocouple tipe-k. Modul ini menggunakan IC MAX6675 yang berfungsi mengubah tegangan termoelektrik yang dihasilkan thermocouple menjadi data digital sehingga dapat diproses secara langsung oleh mikrokontroler. Selain melakukan konversi analog ke digital, MAX6675 juga dilengkapi fitur *Cold Junction Compensation* untuk mengurangi pengaruh perubahan temperatur pada titik referensi, sehingga hasil pengukuran menjadi lebih akurat [12]. Modul MAX6675 yang digunakan ditunjukkan pada Gambar 2- 7.



Gambar 2- 7 Modul MAX6675

MAX6675 memiliki kemampuan mendeteksi kondisi open thermocouple, yaitu ketika sensor terputus atau tidak terhubung dengan benar, sehingga kesalahan pembacaan temperatur dapat diketahui lebih awal [12]. Dalam sistem *dehydrator* listrik ini, modul MAX6675 digunakan sebagai antarmuka antara thermocouple tipe-k dan ESP32. Data temperatur yang diperoleh dari thermocouple dikonversi menjadi data digital 12-bit, kemudian dikirimkan ke ESP32 melalui komunikasi *Serial Peripheral Interface* (SPI). Nilai temperatur yang diterima ESP32 selanjutnya digunakan untuk proses monitoring secara *real-time* melalui Google Spreadsheet dan Telegram Bot. Adapun spesifikasi modul MAX6675 ditunjukkan pada Tabel 2- 5.

Tabel 2- 5 Spesifikasi Modul MAX6675

Spesifikasi	Keterangan
Tegangan Operasi	3,0 – 5,5 V DC
Sensor yang Didukung	Thermocouple Tipe-K
Rentang Pengukuran	0 °C – 1024 °C
Resolusi	0,25 °C
Antarmuka Komunikasi	SPI (Serial Peripheral Interface)
Fitur	Cold Junction Compensation dan Open Thermocouple Detection
Resolusi ADC	12-bit
Suhu operasi IC	–20 hingga +85 °C

2.2.7 Elemen Pemanas (*Heater*)

Heater atau elemen pemanas merupakan komponen yang berfungsi mengubah energi listrik menjadi energi panas melalui material penghantar yang memiliki hambatan listrik tertentu. Energi panas yang dihasilkan dimanfaatkan sebagai sumber kalor pada berbagai peralatan, seperti oven, inkubator, mesin pengering dan proses pemanasan di bidang industri. Pada penelitian ini digunakan *heater* tubular sebagai sumber panas utama pada alat *dehydrator* listrik. *Heater* tubular memiliki konstruksi berupa kawat pemanas yang ditempatkan di dalam selubung logam berbahan stainless steel dan dipisahkan oleh material isolator sehingga panas dapat dihantarkan secara merata. Bentuk tubular memberikan kekuatan mekanik yang baik, tahan terhadap korosi, serta mampu bekerja secara kontinu pada temperatur tinggi sehingga sesuai digunakan sebagai elemen pemanas pada sistem pengering.



Gambar 2- 8 Elemen Pemanas (*Heater*) Tubular

Dalam sistem *dehydrator* listrik ini, *heater* tubular seperti pada Gambar 2-8 berfungsi menghasilkan panas di dalam ruang pengering untuk menurunkan kadar air bahan yang dikeringkan. Temperatur ruang pengering dikendalikan oleh *Temperature Controller* TC4S, sedangkan proses penyalaan dan pemutusan daya listrik menuju *heater* dilakukan melalui *Solid State Relay* (SSR). Dengan pengaturan tersebut, suhu ruang pengering dapat dipertahankan sesuai nilai *setpoint* sehingga proses pengeringan berlangsung lebih stabil dan efisien. Adapun spesifikasi *heater* yang digunakan pada penelitian ini ditunjukkan pada Tabel 2- 6.

Tabel 2- 6 Spesifikasi Heater

Spesifikasi	Keterangan
Jenis Heater	Tubular Heater
Daya	500 Watt
Tegangan Operasi	220 VAC
Frekuensi	50 Hz
Material Selubung	Stainless Steel
Media Pemanas	Udara
Aplikasi	Dehydrator, oven, dan mesin pengering

a. Prinsip Kerja Elemen Pemanas

Elemen pemanas merupakan komponen yang berfungsi mengubah energi listrik menjadi energi panas untuk menghasilkan temperatur yang dibutuhkan pada suatu proses pemanasan. Prinsip kerja elemen pemanas didasarkan pada Efek Joule, yaitu fenomena perubahan energi listrik menjadi energi panas ketika

arus listrik mengalir melalui suatu material yang memiliki hambatan listrik. Menurut Karwa, panas yang dihasilkan merupakan akibat tumbukan elektron dengan atom-atom penyusun material penghantar sehingga sebagian energi listrik berubah menjadi energi termal.

Material yang digunakan sebagai elemen pemanas umumnya memiliki hambatan listrik yang relatif tinggi serta mampu mempertahankan sifat mekanik dan listriknya pada temperatur tinggi. Ketika elemen pemanas dialiri arus listrik, energi panas yang dihasilkan akan meningkatkan temperatur permukaan elemen. Panas tersebut kemudian dipindahkan ke lingkungan sekitar melalui mekanisme konduksi, konveksi, dan radiasi hingga menghasilkan temperatur yang sesuai dengan kebutuhan proses.

Pada sistem pengering, elemen pemanas berperan sebagai sumber energi panas utama yang digunakan untuk meningkatkan temperatur udara di dalam ruang pengering. Udara yang telah dipanaskan selanjutnya mengalir mengelilingi bahan sehingga mempercepat proses penguapan air yang terkandung di dalamnya. Oleh karena itu, kestabilan kerja elemen pemanas sangat memengaruhi keberhasilan proses pengeringan, terutama dalam menjaga temperatur agar tetap berada pada rentang yang telah ditentukan.

Pada penelitian ini, elemen pemanas digunakan sebagai sumber panas pada alat pengering jahe. Pengoperasian elemen pemanas dikendalikan oleh *temperature controller* TC4S melalui *Solid State Relay* (SSR) berdasarkan nilai *setpoint* yang telah ditentukan. Ketika temperatur ruang pengering berada di bawah nilai *setpoint*, TC4S akan mengaktifkan elemen pemanas sehingga terjadi proses pemanasan akibat Efek Joule. Setelah temperatur mencapai nilai yang diinginkan, TC4S akan mengatur kerja elemen pemanas agar temperatur ruang pengering tetap stabil selama proses pengeringan berlangsung. Dengan mekanisme tersebut, suhu di dalam ruang pengering dapat dipertahankan sesuai kebutuhan sehingga proses pengeringan jahe berlangsung secara lebih efektif.

2.2.8 Solid State Relay (SSR)

Solid State Relay (SSR) merupakan saklar elektronik yang berfungsi menghubungkan atau memutus aliran listrik tanpa menggunakan kontak mekanis. Berbeda dengan relay elektromekanis yang memanfaatkan kumparan dan kontak logam, SSR menggunakan komponen semikonduktor sebagai saklar sehingga mampu melakukan proses pensaklaran dengan kecepatan tinggi, tidak menimbulkan percikan listrik, serta memiliki umur operasi yang lebih panjang. Karakteristik tersebut menjadikan SSR banyak digunakan pada sistem kendali industri, terutama pada aplikasi pengendalian suhu, pemanas listrik, dan otomasi.

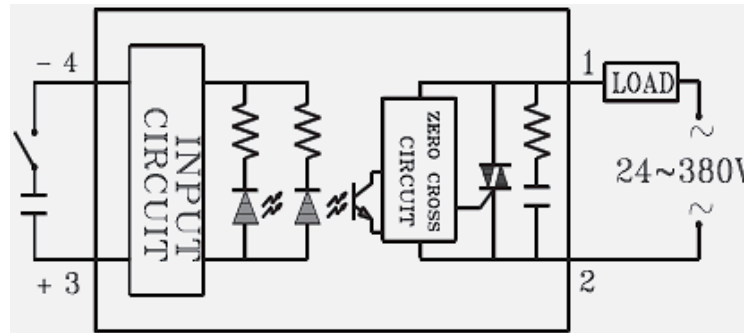


Gambar 2- 9 Solid State Relay (SSR)

Dalam sistem *dehydrator* listrik ini digunakan FOTEK SSR-10DA seperti pada Gambar 2- 9 digunakan sebagai aktuator untuk mengendalikan *heater* tubular 500 Watt yang bekerja pada tegangan 220 VAC. SSR memiliki sisi masukan berupa tegangan DC dan sisi keluaran untuk mengendalikan beban AC. Kedua sisi tersebut dipisahkan secara elektrik menggunakan rangkaian optoisolator sehingga sinyal kendali dari TC4S dapat mengendalikan beban tanpa adanya hubungan listrik langsung antara rangkaian kontrol dan rangkaian daya.

Prinsip kerja SSR diawali ketika terminal masukan menerima sinyal tegangan DC dari perangkat pengendali. Pada SSR-10DA, terminal 3 digunakan sebagai terminal positif dan terminal 4 sebagai terminal negatif. Sinyal tersebut mengaktifkan rangkaian input dan LED pada optoisolator. Cahaya dari LED

optoisolator kemudian mengaktifkan komponen pada sisi keluaran sehingga rangkaian kontrol dan rangkaian daya tetap terisolasi secara elektrik.



Gambar 2- 10 Rangkaian Internal *Solid State Relay* (SSR)

Berdasarkan Gambar 2-10, metode pensaklaran yang digunakan adalah *Zero Cross Trigger*, yaitu proses penyalan dilakukan ketika gelombang AC berada di sekitar titik nol. Metode tersebut dapat mengurangi lonjakan dan gangguan elektromagnetik yang timbul pada saat proses pensaklaran beban AC. Pada sisi keluaran, terminal 1 dan terminal 2 digunakan untuk menghubungkan SSR dengan rangkaian beban AC. Sinyal dari optoisolator diteruskan ke rangkaian *zero cross* dan komponen semikonduktor sebagai saklar elektronik. Ketika sinyal kendali diberikan, komponen semikonduktor menghantarkan arus sehingga tegangan AC dapat mengalir menuju beban. Sebaliknya, ketika sinyal kendali dihentikan, komponen semikonduktor tidak menghantarkan sehingga aliran arus menuju beban terputus. Adapun spesifikasi SSR yang digunakan pada penelitian ini disajikan pada Tabel 2- 7.

Tabel 2- 7 Spesifikasi *Solid State Relay* (SSR)

Spesifikasi	Keterangan
Model	FOTEK SSR-10DA
Jenis Relay	DC Input – AC Output Solid State Relay
Tegangan Input	4–32 VDC
Arus Input	Maksimum 12 mA
Tegangan Output	24–380 VAC
Arus Beban Maksimum	10 A
Metode Pensaklaran	Zero Cross Trigger

Waktu Respon	ON $\leq$ 10 ms, OFF $\leq$ 10 ms
Tegangan Isolasi	4 kVAC
Suhu Operasi	-40 °C hingga +80 °C

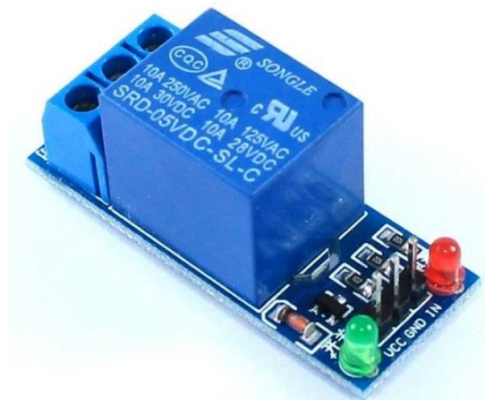
Setiap terminal pada SSR memiliki fungsi yang berbeda sesuai dengan sisi masukan dan sisi keluaran. Terminal masukan digunakan untuk menerima sinyal kendali DC dari *Temperature Controller* TC4S, sedangkan terminal keluaran dihubungkan secara seri dengan sumber tegangan AC dan *heater*. Konfigurasi terminal SSR-10DA ditunjukkan pada Tabel 2- 8.

Tabel 2- 8 *Pinout Solid State Relay (SSR)*

Terminal	Nama	Fungsi
1	Output AC	Terhubung ke salah satu jalur sumber tegangan AC
2	Output AC	Terhubung ke beban (<i>heater</i>)
3	Input (+)	Menerima sinyal kontrol positif 3–32 VDC dari TC4S
4	Input (–)	Terminal negatif sinyal kontrol DC

2.2.9 Relay

Relay merupakan komponen elektromekanis yang berfungsi sebagai saklar listrik dengan memanfaatkan prinsip induksi elektromagnetik. Relay memungkinkan suatu rangkaian bertegangan atau berarus rendah mengendalikan rangkaian lain yang memiliki tegangan maupun arus lebih besar tanpa adanya hubungan listrik secara langsung. Ketika kumparan dialiri arus listrik, medan magnet yang dihasilkan akan menarik armature sehingga posisi kontak berubah. Sebaliknya, ketika arus pada kumparan dihentikan, pegas akan mengembalikan armature ke posisi semula. Prinsip kerja tersebut menjadikan relay banyak digunakan pada sistem kendali, otomasi industri, sistem proteksi, maupun peralatan elektronika yang memerlukan isolasi antara rangkaian kontrol dan rangkaian beban [13].



Gambar 2- 11 Modul Relay

Modul relay seperti pada Gambar 2- 11 umumnya telah dilengkapi dengan rangkaian pendukung berupa transistor driver, resistor pembatas arus, dioda proteksi, dan LED indikator. Transistor driver berfungsi memperkuat arus keluaran mikrokontroler agar mampu mengaktifkan kumparan relay, sedangkan dioda proteksi digunakan untuk meredam tegangan induksi balik (*back electromotive force*) yang muncul ketika kumparan dinonaktifkan. Keberadaan rangkaian tersebut memungkinkan modul relay dihubungkan secara langsung dengan pin digital mikrokontroler tanpa memerlukan rangkaian penggerak tambahan serta meningkatkan keandalan sistem kendali. Adapun spesifikasi umum relay disajikan pada Tabel 2- 9.

Tabel 2- 9 Spesifikasi Modul Relay

Spesifikasi	Keterangan
Jenis Relay	Relay Elektromekanis
Prinsip Kerja	Induksi elektromagnetik
Tegangan Kumparan (<i>Coil Voltage</i>)	3 VDC, 5 VDC, 12 VDC, 24 VDC (bergantung tipe)
Konfigurasi Kontak	SPST, SPDT, DPDT
Kapasitas Kontak	5–30 A (bergantung tipe)
Tegangan Beban	AC maupun DC

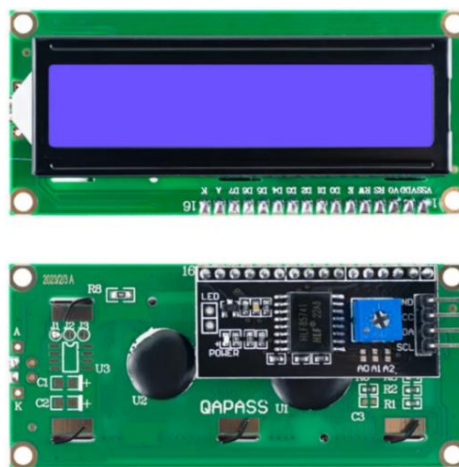
Modul relay umumnya terdiri atas terminal *input* untuk catu daya dan sinyal kendali, serta terminal *output* berupa kontak saklar yang digunakan untuk menghubungkan atau memutus rangkaian beban yang ditunjukkan pada Tabel 2- 10.

Tabel 2- 10 Pinout Modul Relay

Pin	Keterangan	Fungsi
VCC	Power Supply	Catu daya modul relay
GND	Ground	Jalur referensi tegangan modul
IN	Input Signal	Menerima sinyal dari mikrokontroler
COM	Common	Terminal utama kontak relay
NO	Normally Open	Terhubung ke COM ketika relay aktif
NC	Normally Closed	Terhubung ke COM ketika relay tidak aktif

2.2.10 LCD I2C 16x2

Liquid Crystal Display (LCD) merupakan salah satu perangkat keluaran (*output device*) yang berfungsi menampilkan informasi dalam bentuk karakter, angka, maupun simbol. LCD banyak digunakan pada sistem berbasis mikrokontroler karena memiliki konsumsi daya yang relatif rendah, tampilan yang mudah dibaca, serta proses integrasi yang sederhana. Salah satu jenis LCD karakter yang umum digunakan adalah LCD 16×2, yaitu modul display yang mampu menampilkan dua baris dengan kapasitas enam belas karakter pada setiap baris. Kemampuan tersebut menjadikan LCD 16×2 banyak dimanfaatkan sebagai media penampil informasi pada berbagai sistem kendali, instrumentasi, maupun monitoring berbasis mikrokontroler.



Gambar 2- 12 LCD I2C 16×2

LCD 16×2 seperti pada Gambar 2- 12 umumnya dipadukan dengan modul antarmuka *Inter-Integrated Circuit* (I2C) sehingga komunikasi antara LCD dan mikrokontroler dapat dilakukan menggunakan dua jalur, yaitu Serial Data (SDA) dan Serial Clock (SCL). Penggunaan antarmuka I2C mampu mengurangi jumlah pin yang diperlukan dibandingkan komunikasi paralel, sehingga proses pengkabelan menjadi lebih sederhana dan penggunaan pin mikrokontroler menjadi lebih efisien. Selain itu, komunikasi I2C memungkinkan beberapa perangkat dihubungkan pada satu jalur komunikasi selama memiliki alamat (*address*) yang berbeda.

Prinsip kerja LCD I2C diawali ketika mikrokontroler mengirimkan data melalui jalur SDA yang disinkronkan oleh sinyal SCL sesuai protokol komunikasi I2C. Data tersebut kemudian diproses oleh modul antarmuka dan diteruskan ke rangkaian LCD untuk ditampilkan dalam bentuk karakter pada layar. Proses ini berlangsung secara berurutan sehingga informasi yang dikirimkan oleh mikrokontroler dapat ditampilkan secara *real-time*. Dengan memanfaatkan komunikasi serial, LCD I2C mampu menyederhanakan proses pertukaran data tanpa mengurangi fungsi utama sebagai media penampil informasi.

LCD I2C 16×2 menggunakan empat terminal utama sebagai jalur catu daya dan komunikasi data. Penggunaan empat pin tersebut membuat proses integrasi dengan mikrokontroler menjadi lebih sederhana dibandingkan LCD dengan antarmuka paralel. Susunan pin LCD I2C 16×2 ditunjukkan Tabel 2- 11.

Tabel 2- 11 *Pinout* LCD I2C 16×2

Pin	Fungsi
VCC	Catu daya
GND	Jalur ground
SDA	Jalur komunikasi data (<i>Serial Data</i>)
SCL	Jalur komunikasi clock (<i>Serial Clock</i>)

2.2.11 Keypad Matrix 4x4

Keypad merupakan salah satu perangkat masukan (*input device*) yang digunakan untuk memasukkan data atau memberikan perintah kepada sistem elektronik melalui penekanan tombol. Pada sistem berbasis mikrokontroler, keypad berfungsi sebagai antarmuka (*human-machine interface*) yang memungkinkan pengguna melakukan pengaturan parameter, pemilihan menu, maupun pemberian instruksi secara langsung. Salah satu jenis keypad yang banyak digunakan adalah keypad matriks 4×4, yaitu keypad yang terdiri atas enam belas tombol yang disusun dalam empat baris (*row*) dan empat kolom (*column*). Keypad matrix 4x4 dapat ditunjukkan pada Gambar 2- 13.



Gambar 2- 13 Keypad Matrix 4x4

Prinsip kerja keypad matriks didasarkan pada metode matrix *scanning*, yaitu proses pemindaian jalur baris dan kolom secara bergantian oleh mikrokontroler. Mikrokontroler akan memberikan sinyal logika pada setiap jalur baris, kemudian membaca kondisi logika pada jalur kolom. Ketika salah satu tombol ditekan, jalur baris dan kolom yang bersesuaian akan saling terhubung sehingga posisi tombol dapat diidentifikasi berdasarkan kombinasi kedua jalur tersebut. Metode ini memungkinkan seluruh tombol dibaca secara efisien hanya menggunakan delapan jalur sinyal, yaitu empat jalur baris dan empat jalur kolom Adapun spesifikasi keypad matrix yang digunakan pada penelitian ini disajikan pada Tabel 2- 12.

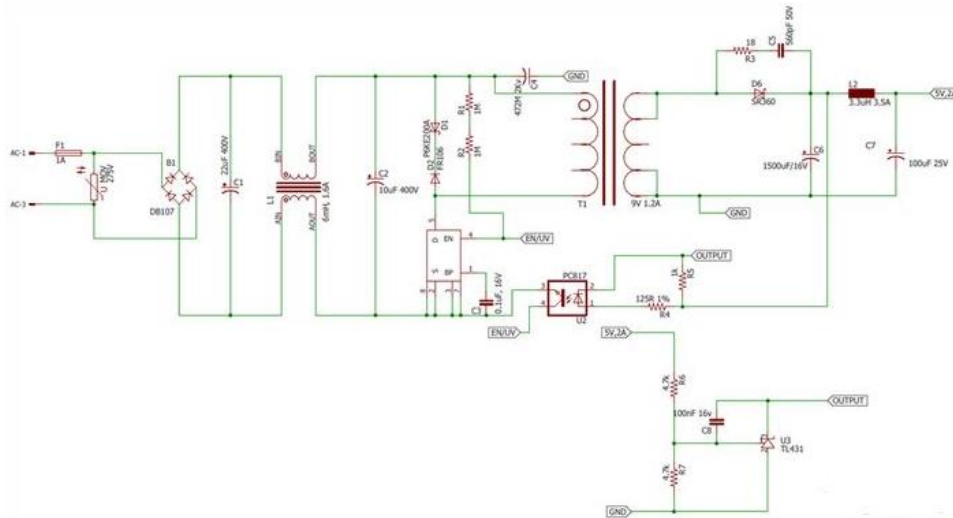
Tabel 2- 12 Spesifikasi Keypad Matriks 4×4

Spesifikasi	Keterangan
Jenis Keypad	Matrix 4 × 4
Jumlah Tombol	16 tombol
Konfigurasi Jalur	4 Baris × 4 Kolom
Jumlah Pin	8 pin
Tegangan Logika	3,3–5 VDC
Jenis Kontak	Normally Open (Momentary Switch)
Metode Pembacaan	Matrix Scanning
Material	Membrane Switch

2.2.12 Catu Daya atau *Power Supply*

Sumber catu daya yang digunakan pada sistem ini adalah *Switching Mode Power Supply* (SMPS) dengan tegangan keluaran sebesar 5 VDC dan kemampuan arus maksimum 2 A. Modul SMPS berfungsi mengubah tegangan bolak-balik (*Alternating Current/AC*) dari jaringan listrik menjadi tegangan searah (*Direct Current/DC*) yang digunakan sebagai sumber daya bagi rangkaian elektronika. Tegangan keluaran 5 VDC pada modul ini digunakan untuk menyuplai ESP32 sebagai mikrokontroler utama, modul MAX6675, LCD I2C, relay, serta komponen pendukung lainnya yang bekerja pada tegangan DC. Penggunaan SMPS dipilih karena mampu menghasilkan tegangan keluaran yang stabil, memiliki efisiensi yang tinggi, serta ukuran yang relatif ringkas.

**Gambar 2- 14** *Switching Mode Power Supply* (SMPS) 5 V 2 A



Gambar 2- 15 Rangkaian *Switching Mode Power Supply* (SMPS) 5 V 2 A

Modul SMPS dan rangkaianya seperti pada Gambar 2-14 dan Gambar 2-15 memiliki tegangan masukan sebesar 110–220 VAC dengan frekuensi 50/60 Hz dan menghasilkan tegangan keluaran 5 VDC dengan arus maksimum 2 A. Besarnya arus yang dikeluarkan bergantung pada kebutuhan beban yang terhubung pada sisi keluaran. Proses kerja SMPS dimulai ketika tegangan AC dari jaringan listrik masuk melalui terminal *Line* (L) dan *Neutral* (N). Tegangan tersebut terlebih dahulu melewati rangkaian proteksi, seperti MCB, untuk melindungi modul dari gangguan hubung singkat maupun lonjakan tegangan. Selanjutnya, tegangan AC disearahkan menjadi tegangan DC menggunakan bridge rectifier, kemudian diratakan oleh kapasitor filter sehingga diperoleh tegangan DC dengan riak (*ripple*) yang lebih kecil.

Tegangan DC tersebut kemudian dikonversi menggunakan transistor *switching* yang bekerja pada frekuensi tinggi dan diteruskan menuju transformator ferrite. Transformator ini berfungsi menurunkan tegangan sekaligus memberikan isolasi listrik antara sisi primer yang terhubung dengan jaringan PLN dan sisi sekunder yang terhubung dengan rangkaian elektronika. Setelah melewati transformator, tegangan kembali disearahkan dan difilter sehingga dihasilkan tegangan keluaran sebesar 5 VDC yang stabil. Pada modul SMPS komersial, proses tersebut dikendalikan oleh rangkaian umpan balik (*feedback*) yang berfungsi menjaga kestabilan tegangan keluaran meskipun terjadi perubahan beban.

2.2.13 *Miniature Circuit Breaker (MCB)*

Miniature Circuit Breaker (MCB) merupakan perangkat proteksi pada instalasi listrik tegangan rendah yang berfungsi mengamankan rangkaian dari gangguan arus lebih (*overload*) dan hubung singkat (*short circuit*). Ketika arus yang mengalir melebihi kapasitas nominalnya, MCB akan memutus rangkaian secara otomatis sehingga dapat mencegah kerusakan pada penghantar maupun peralatan listrik yang terhubung. Berbeda dengan sekering (*fuse*) yang harus diganti setelah bekerja, MCB dapat digunakan kembali dengan mengembalikan tuas atau *reset* ke posisi semula setelah penyebab gangguan dihilangkan.



Gambar 2- 16 *Miniature Circuit Breaker (MCB)*

Miniature Circuit Breaker (MCB) seperti pada Gambar 2- 16 bekerja menggunakan kombinasi mekanisme termal dan elektromagnetik. Pengaman termal memanfaatkan elemen bimetal yang akan mengalami perubahan bentuk akibat kenaikan temperatur ketika dialiri arus melebihi nilai nominal dalam waktu tertentu. Perubahan bentuk tersebut akan mengaktifkan mekanisme pemutus sehingga kontak listrik terbuka dan aliran arus terhenti. Sementara itu, ketika terjadi hubung singkat, arus yang sangat besar akan menghasilkan medan magnet pada kumparan elektromagnet sehingga mekanisme pemutus (*trip mechanism*) bekerja secara seketika untuk memutus aliran listrik. Kombinasi kedua mekanisme tersebut memungkinkan MCB memberikan perlindungan terhadap gangguan beban lebih maupun hubung singkat secara efektif.

2.2.14 Google Spreadsheet

Google Spreadsheet merupakan aplikasi pengolah data berbasis cloud yang dikembangkan oleh Google sebagai bagian dari layanan Google Workspace. Aplikasi ini memungkinkan pengguna membuat, mengolah, menyimpan, dan berbagi data secara daring (*online*) melalui jaringan internet. Berbeda dengan perangkat lunak spreadsheet konvensional yang hanya dapat diakses secara lokal, Google Spreadsheet menyediakan fasilitas penyimpanan berbasis cloud sehingga data dapat diakses secara *real-time* dari berbagai perangkat selama terhubung ke internet.

Google Spreadsheet bekerja dengan menyimpan seluruh data pada server Google sehingga setiap perubahan yang dilakukan akan tersinkronisasi secara otomatis. Pada sistem berbasis *Internet of Things* (IoT), Google Spreadsheet sering dimanfaatkan sebagai media penyimpanan (data logging) karena mampu menerima data yang dikirim oleh mikrokontroler melalui layanan web service atau Application Programming Interface (API). Data yang diterima akan tersimpan secara otomatis dalam bentuk tabel sehingga memudahkan proses pemantauan, pencatatan, maupun analisis data secara berkala.

Selain berfungsi sebagai media penyimpanan data, Google Spreadsheet juga menyediakan berbagai fitur pengolahan data, seperti perhitungan menggunakan rumus, penyaringan (filter), pengurutan (sorting), pembuatan grafik (chart), serta kolaborasi secara daring. Kemampuan tersebut menjadikan Google Spreadsheet banyak digunakan sebagai media pencatatan data hasil pengukuran pada berbagai penelitian berbasis IoT karena mudah diakses, tidak memerlukan instalasi perangkat lunak tambahan, serta mendukung proses pemantauan secara *real-time*.

2.2.15 Telegram Bot

Telegram Bot merupakan akun otomatis pada aplikasi Telegram yang dirancang untuk menjalankan berbagai fungsi tanpa memerlukan interaksi langsung dari pengguna. Bot ini bekerja dengan memanfaatkan Telegram Bot API, sehingga dapat menerima, mengolah, dan mengirimkan informasi secara otomatis melalui jaringan internet. Pada sistem berbasis *Internet of Things* (IoT), Telegram Bot

banyak digunakan sebagai media monitoring dan notifikasi karena mampu menyampaikan informasi dari perangkat secara *real-time* kepada pengguna melalui aplikasi Telegram.

Telegram Bot bekerja berdasarkan mekanisme komunikasi antara perangkat IoT dengan server Telegram menggunakan protokol HTTPS melalui Telegram Bot API. Mikrokontroler akan mengirimkan permintaan (*request*) yang berisi token autentikasi, identitas pengguna (chat ID), dan data yang akan dikirim. Selanjutnya, server Telegram memproses permintaan tersebut dan meneruskan informasi ke akun pengguna dalam bentuk pesan (*message*). Selain mengirimkan notifikasi, Telegram Bot juga dapat menerima perintah dari pengguna sehingga memungkinkan terjadinya komunikasi dua arah antara sistem dan pengguna.

Telegram Bot memiliki beberapa keunggulan, di antaranya proses implementasi yang relatif mudah, keamanan komunikasi melalui protokol HTTPS, serta kemampuan mengirimkan berbagai jenis informasi, seperti teks, gambar, dokumen, maupun lokasi. Selain itu, Telegram menyediakan Bot API secara terbuka sehingga dapat diintegrasikan dengan berbagai platform mikrokontroler, termasuk ESP32, tanpa memerlukan perangkat lunak tambahan. Karakteristik tersebut menjadikan Telegram Bot banyak dimanfaatkan sebagai media monitoring dan pengiriman notifikasi pada sistem otomasi maupun aplikasi IoT.

2.2.16 Analisis Kinerja Sistem Pengukuran

Kinerja suatu sistem pengukuran merupakan salah satu aspek penting yang perlu dievaluasi untuk mengetahui tingkat keandalan alat dalam menghasilkan data. Evaluasi terhadap sistem pengukuran dilakukan dengan membandingkan hasil pengukuran alat terhadap suatu nilai acuan (*reference value*) yang memiliki tingkat kepercayaan lebih tinggi. Selisih antara hasil pengukuran dan nilai acuan tersebut kemudian dianalisis menggunakan metode statistik sehingga dapat diketahui tingkat akurasi dan kesalahan pengukuran yang dihasilkan oleh sistem.

Pada penelitian ini, evaluasi kinerja sistem dilakukan dengan membandingkan hasil pembacaan temperatur dari sensor thermocouple tipe-k yang diproses menggunakan modul MAX6675 dan ESP32 terhadap temperatur yang

ditampilkan oleh kontroler TC4S sebagai nilai referensi. Data hasil pengukuran kemudian dianalisis menggunakan parameter persentase kesalahan (*Percentage Error*) dan *Mean Square Error* (MSE). Kedua parameter tersebut dipilih karena mampu menggambarkan tingkat penyimpangan hasil pengukuran baik pada setiap titik pengukuran maupun secara keseluruhan.

a. Persentase Kesalahan (*Percentage Error*)

Persentase kesalahan (*Percentage Error*) merupakan parameter yang digunakan untuk mengetahui besarnya penyimpangan hasil pengukuran terhadap nilai referensi dalam bentuk persentase. Menurut Guang et al., metode ini banyak digunakan dalam evaluasi instrumen karena mampu memberikan gambaran yang mudah dipahami mengenai tingkat kesalahan hasil pengukuran. Semakin kecil nilai persentase kesalahan, maka semakin tinggi tingkat kedekatan hasil pengukuran terhadap nilai referensi [14].

Persentase kesalahan dihitung menggunakan persamaan (2- 1).

$$Error = \frac{T_{ref} - T_{ukur}}{T_{ref}} \times 100\%$$

Persamaan 2- 1

T_{ref} : Temperatur referensi (TC4S) (°C)

T_{ukur} : Temperatur hasil pembacaan ESP32 (°C)

b. *Mean Square Error* (MSE)

Selain persentase kesalahan, evaluasi kinerja sistem juga dilakukan menggunakan *Mean Square Error* (MSE). Menurut Hodson et al., MSE merupakan parameter statistik yang menghitung rata-rata kuadrat kesalahan antara hasil pengukuran dan nilai referensi. Proses pengkuadratan menyebabkan kesalahan yang lebih besar memiliki pengaruh yang lebih signifikan terhadap nilai akhir, sehingga MSE mampu menunjukkan kualitas keseluruhan hasil pengukuran secara lebih sensitif [15].

Persamaan MSE dinyatakan dengan Persamaan (2- 2).

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (T_{ref,i} - T_{ukur,i})^2$$

Persamaan 2- 2

MSE : Mean Square Error

n : Jumlah data pengujian

$T_{ref,i}$: Temperatur referensi pada data ke-(i)

$T_{ukur,i}$: Temperatur hasil pengukuran pada data ke-(i)

Nilai MSE yang semakin kecil menunjukkan bahwa hasil pengukuran sistem semakin mendekati nilai referensi. Sebaliknya, nilai MSE yang besar menunjukkan adanya penyimpangan yang lebih tinggi antara hasil pengukuran dan nilai acuan. Pada penelitian ini, nilai MSE digunakan untuk mengevaluasi keseluruhan hasil pembacaan temperatur selama proses pengujian alat. Selain digunakan untuk membandingkan pembacaan sensor terhadap kontroler TC4S, parameter ini juga dapat digunakan untuk mengevaluasi pengaruh penerapan *Infinite Impulse Response* (IIR) Filter terhadap kualitas data hasil pengukuran.

2.2.17 Analisis Respon Sistem

Sistem kendali *Proportional–Integral–Derivative* merupakan salah satu metode pengendalian yang banyak digunakan dalam proses industri karena mampu menghasilkan respon yang cepat, stabil, dan memiliki tingkat kesalahan yang rendah. Menurut Ogata, pengendali PID bekerja dengan mengoreksi nilai keluaran berdasarkan selisih (*error*) antara nilai referensi (*setpoint*) dan nilai aktual yang diukur oleh sensor. Koreksi tersebut diperoleh melalui kombinasi aksi proporsional (*Proportional*), integral (*Integral*), dan diferensial (*Derivative*) sehingga sistem dapat mencapai kondisi tunak dengan karakteristik respon yang baik [16]. Secara umum, sinyal kendali pada pengendali PID dinyatakan dengan Persamaan (2- 3).

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt}$$

Persamaan 2- 3

Dengan :

$u(t)$: Sinyal kendali

$e(t)$: Error antara *setpoint* dan nilai aktual

K_p : Konstanta proporsional

K_i : Konstanta integral

K_d : Konstanta diferensial

Aksi proporsional berfungsi mempercepat respon sistem terhadap perubahan *error*. Aksi integral menghilangkan *steady-state error* dengan mengakumulasi kesalahan yang terjadi selama proses pengendalian, sedangkan aksi diferensial berfungsi mengantisipasi perubahan *error* sehingga dapat mengurangi osilasi dan *overshoot*. Kombinasi ketiga aksi tersebut memungkinkan sistem mencapai kondisi yang lebih stabil dibandingkan pengendali ON/OFF [16].

Kinerja suatu sistem kendali PID umumnya dievaluasi melalui karakteristik respon transien dan respon keadaan tunak (*steady-state response*). Parameter-parameter tersebut digunakan untuk mengetahui kemampuan sistem dalam mencapai *setpoint*, mempertahankan kestabilan temperatur, serta meminimalkan penyimpangan selama proses pengendalian.

a. *Rise Time*

Rise time merupakan waktu yang diperlukan keluaran sistem untuk meningkat dari sekitar 10% hingga 90% dari nilai akhir (*setpoint*). Menurut Dorf dan Bishop, parameter ini menunjukkan kecepatan respon sistem dalam mencapai kondisi operasi yang diinginkan [17]. *Rise time* dapat dituliskan dengan Persamaan (2- 4).

$$t_r = t_{90\%} - t_{10\%}$$

Persamaan 2- 4

Dengan :

t_r : *Rise time*

$t_{10\%}$: Waktu saat keluaran mencapai 10% *setpoint*

$t_{90\%}$: Waktu saat keluaran mencapai 90% *setpoint*

b. *Settling Time*

Settling time merupakan waktu yang dibutuhkan sistem hingga keluarannya berada pada daerah toleransi tertentu terhadap nilai setpoint dan tetap berada pada rentang tersebut. Menurut Nise, batas toleransi yang umum digunakan adalah $\pm 2\%$ atau $\pm 5\%$ dari nilai akhir [18]. Secara umum, settling time dinyatakan dengan Persamaan (2- 5).

$$|T_{(t)} - T_{set}| \leq \delta$$

Persamaan 2- 5

Dengan :

$T_{(t)}$: Temperatur pada waktu (t)

T_{set} : Temperatur *setpoint*

δ : Batas toleransi sistem

c. *Maximum Overshoot*

Maximum overshoot merupakan nilai maksimum keluaran sistem yang melampaui setpoint selama respon transien. Menurut Ogata, parameter ini digunakan untuk mengevaluasi tingkat kestabilan sistem, karena overshoot yang terlalu besar dapat menyebabkan sistem memerlukan waktu lebih lama untuk kembali ke kondisi stabil [15]. Persentase *maximum overshoot* dihitung menggunakan persamaan (2- 6).

$$M_p = \frac{T_{max} - T_{set}}{T_{max}} \times 100\%$$

Persamaan 2- 6

Dengan :

M_p : Persentase *maximum overshoot*

T_{max} : Temperatur maksimum

T_{set} : Temperatur *setpoint*

d. *Steady-State Error*

Steady-state error merupakan selisih antara nilai keluaran sistem dan *setpoint* setelah sistem mencapai kondisi stabil. Menurut Nise, parameter ini digunakan untuk menunjukkan tingkat akurasi sistem dalam mempertahankan nilai keluaran pada kondisi tunak [18]. Persamaan *steady-state error* dituliskan dengan Persamaan (2- 7).

$$e_{ss} = |T_{set} - T_{steady}|$$

Persamaan 2- 7

Dengan :

e_{ss} : *Steady-state error*

T_{set} : Temperatur *setpoint*

T_{steady} : Temperatur rata-rata pada kondisi stabil

Pada implementasi sistem dalam penelitian ini, parameter Integral Time ditetapkan bernilai 0. Oleh karena itu, aksi integral tidak bekerja dan sistem pengendalian yang diterapkan selama pengujian menggunakan aksi Proporsional Band dan Derivatif Time atau kendali PD (*Proportional-Derivative*). Meskipun *temperature controller* yang digunakan memiliki kemampuan pengendalian PID, konfigurasi parameter yang digunakan pada penelitian ini menghasilkan karakteristik kendali PD.

2.2.18 Pengolahan Data Menggunakan *Infinite Impulse Response (IIR) Filter*

Data hasil pengukuran yang diperoleh dari sensor umumnya masih mengandung gangguan (*noise*) yang dapat menyebabkan fluktuasi pada nilai pembacaan. Gangguan tersebut dapat berasal dari karakteristik sensor, interferensi elektromagnetik, maupun kondisi lingkungan saat proses pengukuran berlangsung. Oleh karena itu, diperlukan suatu metode pengolahan sinyal untuk mengurangi pengaruh *noise* sehingga data yang diperoleh menjadi lebih stabil tanpa menghilangkan informasi utama dari sinyal tersebut. Salah satu metode yang banyak digunakan pada sistem tertanam (*embedded system*) adalah *Infinite Impulse Response (IIR) Filter* [19].

Menurut Smith, IIR Filter merupakan filter digital yang menghasilkan keluaran berdasarkan kombinasi antara data masukan saat ini dan keluaran sebelumnya. Karakteristik tersebut menyebabkan IIR Filter mampu menghasilkan proses penyaringan yang efisien dengan kebutuhan komputasi yang relatif rendah dibandingkan metode filter digital lainnya. Oleh karena itu, IIR Filter banyak diterapkan pada sistem berbasis mikrokontroler yang memiliki keterbatasan sumber daya pemrosesan. Secara umum, persamaan IIR Filter orde satu dapat dinyatakan dengan Persamaan (2- 8).

$$y(k) = \alpha x(k) + (1 - \alpha)y(k - 1)$$

Persamaan 2- 8

Dengan :

$y(k)$: Data keluaran hasil filter pada sampel ke-(k)

$x(k)$: Data masukan pada sampel ke-(k)

$y(k - 1)$: Data keluaran sebelumnya

α : Koefisien filter ($(0 < \alpha < 1)$)

Koefisien α menentukan karakteristik penyaringan yang dihasilkan. Nilai α yang lebih kecil akan menghasilkan keluaran yang lebih halus karena pengaruh data sebelumnya lebih dominan. Sebaliknya, nilai α yang lebih besar menyebabkan keluaran filter lebih cepat mengikuti perubahan data masukan, namun kemampuan dalam mereduksi *noise* menjadi lebih rendah [20].

Karena menggunakan data keluaran sebelumnya sebagai bagian dari proses perhitungan, IIR Filter memiliki sifat rekursif. Karakteristik ini memungkinkan filter menghasilkan respon yang lebih baik dengan jumlah koefisien yang lebih sedikit dibandingkan *Finite Impulse Response* (FIR) Filter. Menurut Lyons, efisiensi tersebut menjadikan IIR Filter banyak digunakan pada aplikasi pemrosesan sinyal secara *real-time*, terutama pada perangkat dengan kapasitas memori dan kemampuan komputasi yang terbatas [20].

Pada penelitian ini, IIR Filter diterapkan pada ESP32 untuk mengolah data temperatur yang diperoleh dari sensor thermocouple tipe-K melalui modul MAX6675 sebelum data ditampilkan pada LCD, dikirimkan ke Telegram, dan

disimpan pada Google Spreadsheet. Proses penyaringan bertujuan untuk mengurangi fluktuasi pembacaan temperatur akibat *noise* sehingga informasi temperatur yang ditampilkan menjadi lebih stabil tanpa mengurangi kemampuan sistem dalam merespons perubahan temperatur selama proses pengeringan.

Efektivitas penerapan IIR Filter pada penelitian ini selanjutnya dievaluasi dengan membandingkan hasil pembacaan temperatur sebelum dan sesudah proses penyaringan menggunakan parameter evaluasi kinerja sistem yang telah dijelaskan pada Subbab 2.2.16. Dengan demikian, pengaruh penggunaan filter terhadap kualitas data hasil pengukuran dapat dianalisis secara kuantitatif.

2.2.19 Analisis Proses Pengeringan

Proses pengeringan merupakan metode pengawetan bahan pangan yang dilakukan dengan mengurangi kandungan air melalui perpindahan panas dan massa. Selama proses pengeringan, energi panas yang diberikan menyebabkan air di dalam bahan menguap sehingga massa bahan secara bertahap mengalami penurunan. Menurut Mujumdar, keberhasilan suatu proses pengeringan dapat dievaluasi melalui perubahan massa bahan terhadap waktu serta laju pengurangan massa selama proses berlangsung. Kedua parameter tersebut memberikan gambaran mengenai karakteristik proses pengeringan dan efektivitas sistem yang digunakan [21].

Pada penelitian ini, analisis proses pengeringan dilakukan berdasarkan perubahan massa rimpang jahe sebelum dan sesudah proses pengeringan. Selain itu, laju pengeringan dihitung untuk mengetahui rata-rata penurunan massa bahan selama waktu pengeringan. Analisis tersebut digunakan sebagai indikator untuk mengevaluasi kemampuan alat pengering dalam mengurangi kadar air secara tidak langsung melalui perubahan massa bahan.

a. Penyusutan Massa

Penyusutan massa merupakan selisih antara massa bahan sebelum dan sesudah proses pengeringan. Selama proses berlangsung, air yang terkandung di dalam bahan akan menguap akibat perpindahan panas sehingga massa total bahan menjadi lebih kecil. Menurut Fellows,

perubahan massa merupakan salah satu parameter yang umum digunakan untuk mengevaluasi proses pengeringan apabila pengukuran kadar air secara langsung tidak dilakukan [22]. Persentase penyusutan massa dihitung menggunakan Persamaan (2- 9).

$$PM = \frac{m_0 - m_t}{m_0} \times 100\%$$

Persamaan 2- 9

Dengan :

PM : Persentase penyusutan massa (%)

m_0 : Massa awal bahan (g)

m_t : Massa akhir bahan (g)

b. Laju Pengeringan

Laju pengeringan menunjukkan besarnya penurunan massa bahan terhadap waktu selama proses pengeringan berlangsung. Menurut Mujumdar, parameter ini digunakan untuk mengetahui kecepatan proses pengeringan dan membandingkan performa sistem pengering pada berbagai kondisi operasi [21]. Secara sederhana, laju pengeringan dapat dihitung menggunakan Persamaan (2- 10).

$$LP = \frac{m_0 - m_t}{t}$$

Persamaan 2- 10

Dengan :

LP : Laju pengeringan (g/jam)

m_0 : Massa awal bahan (g)

m_t : Massa akhir bahan (g)

t : Lama pengeringan (g)