

RANCANG BANGUN SISTEM *ROASTING* KOPI DENGAN MONITORING BERBASIS WEB

Muhamad Idhan Arkhan; Bambang Hari Purwoto
Teknik Elektro, Teknik, Universitas Muhammadiyah Surakarta

Abstrak

Proses *roasting* merupakan tahapan penting pada pengolahan kopi sebab menentukan cita rasa, aroma, dan kualitas hasil biji kopi. Pada skala rumah tangga maupun usaha kecil, pengendalian suhu umumnya masih dilakukan secara manual sehingga hasil *roasting* kurang konsisten. Penelitian dirancang untuk membuat sistem *roasting* kopi berbasis ESP32 dengan monitoring berbasis web. untuk memudahkan pengendalian dan pemantauan proses *roasting*. Sistem menggunakan dua sensor termokopel tipe K dengan modul MAX6675 untuk mengukur suhu biji kopi dan suhu drum, sedangkan *heater* dikendalikan menggunakan *Solid State Relay* (SSR). Data suhu, status proses, durasi *roasting*, dan status emergency dikirim ke *Firebase* dan ditampilkan pada *website* secara *real-time*. Setelah pengujian menghasilkan bahwa sensor termokopel mempunyai tingkat akurasi yang baik dengan nilai *error* yang kecil terhadap alat ukur referensi. Monitoring berbasis web mampu menampilkan data dengan rata-rata delay sekitar 3 detik dan tetap memungkinkan proses *roasting* berjalan normal ketika koneksi internet terputus karena seluruh proses pengendalian dilakukan secara lokal oleh ESP32. Sistem juga berhasil mengimplementasikan fitur *Emergency Stop* melalui tombol fisik maupun *website*. Berdasarkan hasil pengujian, sistem mampu menghasilkan tingkat kematangan *Light Roast* pada suhu 185°C selama 15 menit, *Medium Roast* pada suhu 200°C selama 20 menit, dan *Dark Roast* pada suhu 215°C selama 25 menit.

Kata kunci: *Coffee roaster*, ESP32, *Firebase*, Monitoring berbasis web.

Abstract

The roasting process is a crucial stage in coffee processing because it determines the flavor, aroma, and overall quality of the coffee beans. In household-scale and small-scale enterprises, temperature control is generally performed manually, resulting in inconsistent roasting quality. This study was conducted to develop an ESP32-based coffee roasting system with web-based monitoring to facilitate the control and monitoring of the roasting process. The system employs two K-type thermocouples with MAX6675 modules to measure the temperatures of the coffee beans and the roasting drum, while the heating element is controlled using a Solid State Relay (SSR). Temperature data, process status, roasting duration, and emergency status are transmitted to *Firebase* and displayed on a website in real time. Experimental results indicate that the thermocouple sensors provide good measurement accuracy with a low error compared to a reference measuring instrument. The web-based monitoring system successfully displays data with an average delay of approximately 3 seconds and allows the roasting process to continue normally even when the internet connection is interrupted, as all control operations are executed locally by the ESP32. The system also successfully implements an *Emergency Stop* feature through both a physical button and the web interface. Based on the experimental results, the system is capable of achieving *Light Roast* at 185°C for 15 minutes, *Medium Roast* at 200°C for 20 minutes, and *Dark Roast* at 215°C for 25 minutes..

Keywords: *Coffee roaster*, ESP32, *Firebase*, Web-based monitoring.

1. PENDAHULUAN

Kopi adalah komoditas perkebunan strategis yang memiliki peranan penting dalam mendukung perekonomian Indonesia. Selain menjadi sumber mata pencaharian bagi masyarakat, khususnya petani kopi, komoditas ini juga berkontribusi terhadap penerimaan devisa negara melalui kegiatan ekspor. Indonesia termasuk negara penghasil kopi terbesar di dunia dengan wilayah produksi yang tersebar di berbagai daerah. Meningkatnya permintaan kopi, baik di pasar domestik maupun internasional,

menunjukkan bahwa komoditas ini memiliki potensi yang besar untuk terus dikembangkan (BPS, 2024).

Produktivitas tanaman kopi sangat dipengaruhi oleh kondisi geografis dan ketinggian tempat. Kopi arabika umumnya tumbuh optimal pada daerah dataran tinggi dengan ketinggian antara 1.000 hingga 2.100 meter di atas permukaan laut, akan tetapi kopi robusta lebih sesuai dibudidayakan pada ketinggian 400 hingga 1.000 meter di atas permukaan laut (Kementerian Pertanian RI, 2019). Kondisi tersebut menjadikan banyak wilayah pegunungan di Indonesia mempunyai potensi yang besar dalam pengembangan perkebunan kopi, baik jenis arabika maupun robusta. Potensi tersebut dapat dimanfaatkan untuk meningkatkan nilai tambah komoditas kopi melalui proses pengolahan pascapanen.

Namun demikian, di daerah penelitian penulis, banyak petani masih memasarkan hasil panen dalam bentuk biji kopi mentah (*green bean*) tanpa melalui proses pengolahan lebih lanjut. Padahal, biji kopi yang telah melalui proses *roasting* dan penggilingan memiliki nilai jual yang lebih tinggi dibandingkan biji kopi mentah (Ni'maturrakhmat et al., 2025). Kondisi tersebut dipengaruhi oleh keterbatasan fasilitas pengolahan yang dimiliki petani. Mesin *roasting* kopi yang tersedia di pasaran umumnya memiliki kapasitas produksi yang besar dengan harga yang relatif tinggi, sehingga kurang sesuai dan sulit dijangkau oleh petani maupun pelaku usaha mikro dan kecil (Widiawati & Renaldi, 2024).

Proses *roasting* merupakan tahapan penting dalam pengolahan kopi karena sangat memengaruhi aroma, cita rasa, warna, serta karakteristik fisik biji kopi. Variasi suhu dan waktu *roasting* dapat menghasilkan kualitas kopi yang berbeda-beda. Penelitian menunjukkan bahwa perubahan suhu dan durasi *roasting* berpengaruh signifikan terhadap kadar air, porositas, densitas, serta karakteristik fisik dan sensori kopi arabika maupun robusta (Yusibani et al., 2024). Oleh karena itu, pengendalian suhu yang tepat selama proses *roasting* menjadi faktor penting untuk menghasilkan kopi dengan kualitas yang konsisten.

Seiring perkembangan teknologi, berbagai penelitian telah mengembangkan mesin *roasting* kopi otomatis untuk meningkatkan konsistensi hasil *roasting*. Salah satu pendekatan yang banyak digunakan adalah penerapan sistem kontrol suhu menggunakan metode *PID* (*Proportional Integral Derivative*). Metode PID mampu menjaga kestabilan suhu mendekati nilai setpoint sehingga proses *roasting* dapat berlangsung lebih terkontrol dan menghasilkan kualitas produk yang lebih seragam (Nggala et al., 2023). Selain itu, penggunaan kontrol PID pada mesin *roasting* juga dapat mengurangi kesalahan pengoperasian yang disebabkan oleh pengaturan suhu secara manual.

Kemajuan teknologi *Internet of Things (IoT)* dapat menghasilkan peluang untuk mengembangkan sistem monitoring dan pengendalian yang lebih efektif. Salah satu mikrokontroler yang banyak digunakan pada aplikasi *IoT* adalah ESP32 karena telah dilengkapi dengan fitur Wi-Fi dan Bluetooth yang mendukung komunikasi data secara *real-time* (Espressif Systems, 2025). Penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa ESP32 dapat diterapkan pada sistem monitoring mesin *roasting* kopi untuk mengirimkan data suhu dan kondisi proses secara jarak jauh melalui jaringan internet sehingga memudahkan pengguna dalam melakukan pengawasan terhadap proses *roasting*.

Berdasarkan berbagai penelitian yang telah dilakukan, pengembangan mesin *roasting* kopi masih terus diperlukan untuk menghasilkan sistem yang mampu memberikan kualitas *roasting* yang konsisten, mudah dioperasikan, serta sesuai dengan kebutuhan petani dan pelaku usaha kecil menengah (Oematan et al., 2024). Selain pengendalian suhu yang akurat, kebutuhan akan sistem monitoring jarak jauh dan fitur keamanan juga menjadi aspek penting dalam pengoperasian mesin *roasting* modern. Penulis melakukan penelitian ini untuk merancang dan membangun sebuah mesin *roasting* kopi berbasis ESP32 yang ditujukan untuk cakupan rumah tangga dan usaha kecil menengah. Sistem ini dirancang untuk mengendalikan suhu *roasting* secara otomatis menggunakan metode *Proportional Integral Derivative (PID)* dengan mengatur kerja *heater* dan *blower* sehingga suhu dapat dipertahankan sesuai nilai *setpoint* yang telah ditentukan. Selain itu, sistem dilengkapi dengan fitur monitoring berbasis web yang memungkinkan pengguna memantau suhu, waktu *roasting*, dan kondisi mesin secara *real-time* melalui jaringan internet. Untuk meningkatkan aspek keamanan, sistem juga dilengkapi dengan fitur *Emergency Stop* yang dapat diaktifkan baik melalui tombol fisik maupun melalui antarmuka web. Dengan adanya sistem tersebut, diharapkan proses *roasting* kopi dapat dilakukan dengan lebih efektif, aman, dan menghasilkan kualitas produk yang lebih konsisten. Selain itu, penelitian ini diharapkan dapat memberikan solusi berupa mesin *roasting* kopi yang ekonomis dan mudah dioperasikan sehingga mampu meningkatkan nilai tambah produk kopi serta mendukung peningkatan pendapatan petani dan pelaku usaha kecil menengah.

2. METODE

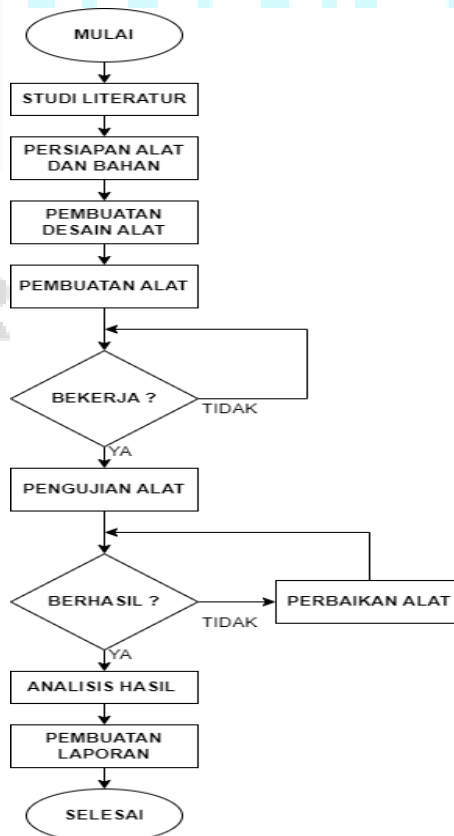
2.1 Tahapan Penelitian

Tahapan awal penelitian dimulai dengan studi literatur yang ditujukan agar memperoleh landasan teori dan referensi yang berkaitan dengan sistem yang akan dirancang. Studi literatur diinisialisasikan dengan mengkaji berbagai sumber seperti jurnal ilmiah, artikel penelitian, buku, serta materi perkuliahan yang sesuai. Hasil studi literatur digunakan sebagai acuan dalam menentukan spesifikasi dan metode yang digunakan pada penelitian ini.

Tahap berikutnya adalah persiapan alat dan bahan yang akan digunakan dalam proses perancangan dan pembuatan sistem. Setelah seluruh kebutuhan tersedia, dilakukan pembuatan desain alat dengan melakukan perancangan perangkat keras (*hardware*) dan perangkat lunak (*software*) sesuai dengan fungsi yang diinginkan. Desain yang telah dibuat kemudian direalisasikan pada tahap pembuatan alat dengan mengintegrasikan seluruh komponen menjadi satu sistem yang utuh.

Setelah alat selesai dibuat, dilakukan pengujian awal untuk memastikan seluruh komponen dan sistem dapat bekerja dengan baik. Apabila sistem belum bekerja sesuai dengan yang diharapkan, maka dilakukan perbaikan dan penyempurnaan pada alat hingga diperoleh kondisi kerja yang sesuai. Selanjutnya dilakukan pengujian alat secara menyeluruh untuk mengetahui kinerja sistem. Jika hasil pengujian belum memenuhi tujuan penelitian, maka dilakukan perbaikan alat dan pengujian ulang hingga sistem berfungsi dengan baik.

Apabila alat telah berhasil bekerja sesuai dengan spesifikasi yang direncanakan, dilakukan pengambilan dan pengumpulan data hasil pengujian. Data yang diperoleh kemudian dianalisis untuk mengetahui tingkat keberhasilan dan performa sistem yang telah dirancang. Tahap final penelitian adalah pembuatan laporan yang berisi keseluruhan proses penelitian, mulai dari studi literatur, perancangan, pembuatan alat, pengujian, analisis hasil, hingga kesimpulan penelitian. Flowchart metode penelitian ditunjukkan pada Gambar 2.1.



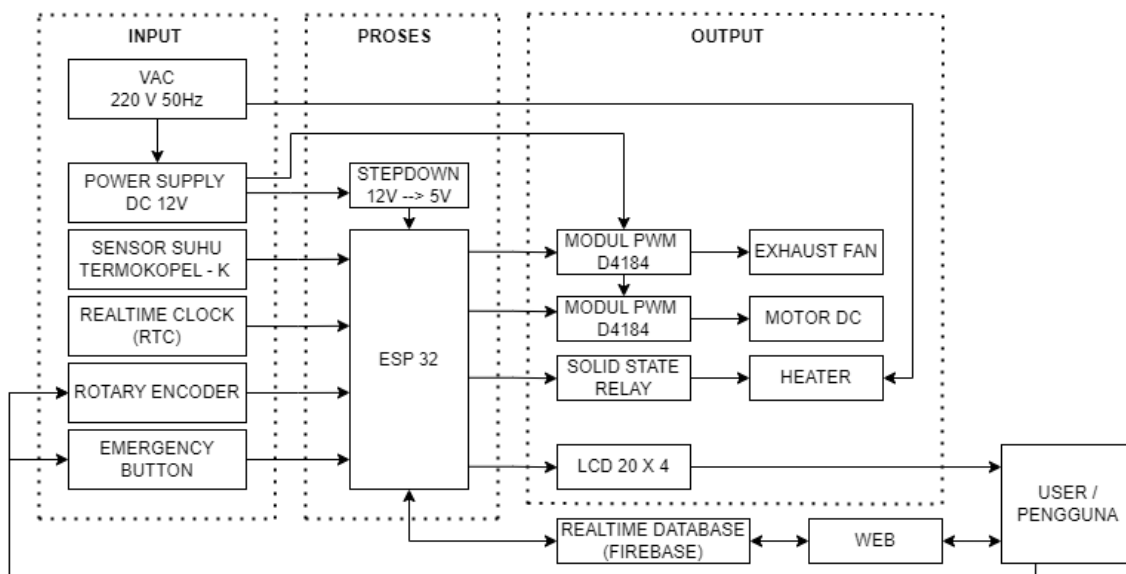
Gambar 2. 1 Diagram Alir Alur Penelitian

2.2 Pengumpulan Alat dan Bahan

Penulis membuat penelitian ini dengan memanfaatkan perangkat keras (*hardware*) dan perangkat lunak (*software*) sebagai berikut:

1. Hardware yang penulis pakai dalam penelitian ini antara lain, ESP 32, *Power Suply DC* 12V, sensor suhu termokopel tipe – K, *Realtime Clock (RTC)*, *Solid State Relay (SSR)*, *Driver Motor PWM D4184*, *Button*, *Liquid Crystal Display (LCD)*, *Heater*, *Motor DC*, *Exhaust Fan*.
2. Software yang penulis gunakan dalam penelitian ini berupa *Arduino IDE* yang berfungsi untuk menyusun dan mengunggah kode program agar sistem berhasil bekerja sesuai dengan yang diinginkan. Selain itu, digunakan juga aplikasi Web. sebagai media untuk memantau alat dari jarak jauh.
3. Peralatan tambahan seperti, solder, timah, larutan *PCB*, *pinhead*, *spacer* , dan perkabelan.

2.3 Perancangan Sistem



Gambar 2. 2 Diagram Blok

Gambar 2.2 menunjukkan diagram blok sistem yang dirancang pada penelitian ini. Sistem terdiri atas tiga blok utama, yaitu blok input, blok proses, dan blok output. Setiap blok memiliki fungsi yang saling terintegrasi untuk mendukung kinerja keseluruhan sistem.

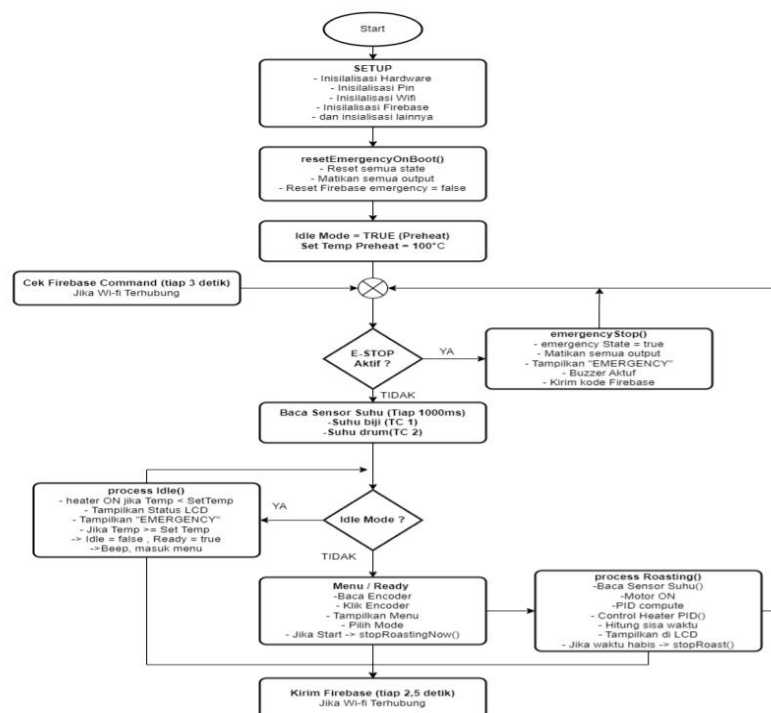
Blok input berfungsi sebagai sumber data dan perintah yang akan diproses oleh sistem. Komponen yang termasuk dalam blok input meliputi sensor suhu termokopel tipe-K, modul *Real Time Clock (RTC)*, *rotary encoder*, dan *tombol emergency*. Sensor suhu berfungsi untuk mengukur

temperatur pada proses *roasting*, kemudian RTC berfungsi sebagai penunjuk waktu dan pencatat durasi proses. *Rotary encoder* digunakan sebagai media masukan bagi pengguna untuk mengatur parameter sistem, sementara tombol emergency berfungsi untuk menghentikan proses secara cepat ketika terjadi kondisi darurat. Seluruh data dan perintah dari blok input dikirimkan ke mikrokontroler ESP32 untuk diproses.

Blok proses merupakan pusat pengendalian sistem yang terdiri dari mikrokontroler ESP32 dan modul *step-down converter*. Modul *step-down* berfungsi menurunkan tegangan dari 12 V DC menjadi 5 V DC sebagai pencatu daya bagi ESP32. Mikrokontroler ESP32 bertugas menerima data dari seluruh komponen input, kemudian memproses data tersebut berdasarkan program yang sudah dirancang. Hasil pengolahan data selanjutnya digunakan untuk mengendalikan aktuator dan menampilkan informasi sistem kepada pengguna.

Blok output berfungsi menampilkan hasil proses yang dilakukan oleh mikrokontroler serta menjalankan aktuator sesuai dengan perintah yang diberikan. Komponen pada blok output meliputi motor DC sebagai penggerak drum, exhaust fan sebagai sirkulasi udara, *heater* sebagai sumber panas, dan LCD 20×4 sebagai media tampilan informasi. Pengendalian motor DC dan exhaust fan dilakukan melalui modul PWM D4184, sedangkan pengendalian *heater* dilakukan menggunakan *Solid State Relay (SSR)*. Selain itu, data sistem juga dikirimkan ke *Firebase Realtime Database* dan ditampilkan melalui antarmuka web sehingga pengguna dapat melakukan pemantauan sistem secara *real-time*.

2.4 Perancangan Software



Gambar 2. 3 Flowchart Program

Flowchart program *coffee roaster* menunjukkan urutan kerja sistem mulai dari proses inisialisasi hingga proses *roasting* selesai. Sistem diawali dengan proses setup yang bertujuan untuk menginisialisasi seluruh perangkat keras dan perangkat lunak yang digunakan. Pada tahap ini ESP32 melakukan inisialisasi LCD, RTC DS3231, sensor suhu MAX6675, *PID Controller*, *rotary encoder*, koneksi *WiFi*, dan *Firebase*. Setelah seluruh proses inisialisasi selesai, sistem menampilkan tampilan booting pada LCD sebagai indikator bahwa alat telah siap digunakan.

Selanjutnya sistem menjalankan fungsi *resetEmergencyOnBoot()* untuk memastikan kondisi awal alat berada pada keadaan aman. Pada proses ini seluruh aktuator seperti *heater*, motor, dan *blower* dimatikan serta status *emergency* pada *Firebase* direset menjadi *false*.

Setelah proses inisialisasi selesai, sistem masuk ke *Idle Mode (Preheat)*. Pada mode ini *heater* dan *blower* akan bekerja hingga suhu ruang *roasting* mencapai suhu *preheat* yang telah ditentukan. Sensor MAX6675 secara berkala membaca suhu biji kopi dan suhu drum setiap 300 ms. Apabila suhu telah mencapai nilai *preheat*, maka sistem mengubah status menjadi *ready mode* dan menampilkan menu utama pada LCD.

Pada kondisi *ready mode*, pengguna dapat memilih mode operasi yang terdiri dari mode otomatis dan mode manual menggunakan *rotary encoder*. Pada mode otomatis, pengguna memilih jenis biji kopi dan tingkat kematangan *roasting* yang diinginkan. Sedangkan pada mode manual, pengguna dapat menentukan suhu dan waktu *roasting* sesuai kebutuhan.

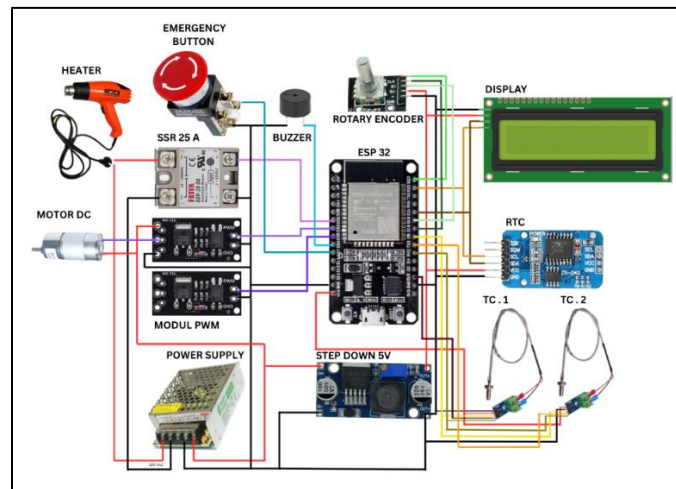
Setelah tombol start ditekan, sistem masuk ke proses *roasting*. Pada tahap ini suhu yang terbaca oleh sensor digunakan sebagai masukan *PID Controller*. Nilai keluaran PID digunakan untuk mengendalikan kerja *heater* sehingga suhu *roasting* dapat dipertahankan mendekati nilai setpoint yang telah ditentukan. Selain itu, *blower* juga dikendalikan untuk membantu proses distribusi panas selama *roasting* berlangsung. Informasi suhu, waktu tersisa, dan status proses ditampilkan secara realtime pada LCD.

Selama proses *roasting* berlangsung, ESP32 mengirimkan data suhu, durasi *roasting*, serta status sistem ke *Firebase* secara berkala setiap 2,5 detik apabila koneksi internet tersedia. Data tersebut kemudian ditampilkan pada *website* monitoring sehingga pengguna dapat memantau kondisi mesin secara *real-time*.

Selain fungsi monitoring, sistem juga menyediakan fitur *Emergency Stop* baik melalui tombol fisik maupun melalui *website*. Ketika tombol *emergency* ditekan atau perintah *emergency* diterima dari *Firebase*, sistem akan menjalankan fungsi *emergencyStop()* yang akan mematikan *heater*, motor, dan *blower* secara langsung serta menampilkan status *emergency* pada LCD dan *website*.

Proses *roasting* akan berakhir ketika waktu *roasting* yang telah ditentukan telah habis. Setelah proses selesai, seluruh aktuator dimatikan dan sistem kembali ke menu utama sehingga siap digunakan untuk proses *roasting* berikutnya.

2.5 Perancangan elektrikal



Gambar 2. 4 *Wiring Diagram*

Gambar 2.4 menunjukkan rangkaian keseluruhan sistem mesin *roasting* kopi berbasis mikrokontroler ESP32. Rangkaian ini terdiri dari komponen-komponen utama yang saling terhubung untuk membuat sistem monitoring dan pengendalian proses *roasting* kopi secara otomatis maupun manual.

Sumber tegangan utama sistem berasal dari jaringan listrik AC 220 V yang kemudian dikonversi menjadi tegangan DC 12 V menggunakan power supply. Tegangan 12 V berguna mensuplai aktuator seperti motor DC, *exhaust fan*, dan *heater* melalui rangkaian pengendali. Selain itu, tegangan 12 V juga diturunkan menjadi 5 V menggunakan modul *step-down converter* yang digunakan sebagai catu daya mikrokontroler ESP32 dan beberapa modul pendukung lainnya.

ESP32 memiliki fungsi untuk menjadi pusat kontrol sistem untuk menerima data dari berbagai perangkat masukan. Data suhu diperoleh dari dua sensor termokopel tipe-K yang dihubungkan melalui modul MAX6675. Sensor pertama (TC.1) digunakan untuk mengukur suhu biji kopi, sedangkan sensor kedua (TC.2) digunakan untuk mengukur suhu ruang *roasting* atau drum. Informasi waktu diperoleh dari modul Real Time Clock (RTC) yang memungkinkan sistem melakukan pencatatan durasi proses *roasting* secara akurat.

Interaksi pengguna dengan sistem dilakukan melalui *rotary encoder* dan LCD 20×4. *Rotary encoder* digunakan untuk memilih menu, mengubah parameter suhu, serta mengatur waktu *roasting*. Informasi mengenai suhu, waktu, mode operasi, dan status sistem ditampilkan pada LCD sehingga pengguna dapat memantau proses secara langsung. Selain itu, terdapat tombol *emergency* yang berfungsi sebagai sistem pengaman untuk menghentikan seluruh proses secara cepat apabila terjadi

kondisi yang tidak diinginkan. Sistem juga dilengkapi buzzer yang berfungsi memberi indikasi suara untuk mengisyaratkan tanda kepada pengguna.

Pada bagian *aktuator*, *heater* digunakan sebagai sumber panas utama dalam proses *roasting*. Pengendalian *heater* menggunakan *Solid State Relay (SSR)* 25A yang menerima sinyal kontrol dari ESP32. Penggunaan SSR memungkinkan pengaturan daya *heater* secara aman karena terjadi isolasi antara rangkaian tegangan tinggi dan rangkaian kontrol *mikrokontroler*. *Heater* yang digunakan memiliki daya 1600 Watt. Dengan daya tersebut dikontrol dengan menggunakan SSR 25A sangatlah mumpuni dan jauh dibawah ambang batas penggunaan SSR. Pada penelitian ini SSR bekerja pada beban sekitar 7 A sehingga panas yang dihasilkan relatif kecil dan selama pengujian tidak ditemukan kenaikan suhu yang menyebabkan kegagalan operasi. Namun pada penggunaan jangka panjang heatsink tetap direkomendasikan.

Motor DC yang digunakan sebagai penggerak drum serta exhaust fan sebagai sistem sirkulasi udara dikendalikan menggunakan modul PWM D4184. ESP32 menghasilkan sinyal *Pulse Width Modulation (PWM)* yang diteruskan ke modul D4184 untuk mengatur kecepatan putaran motor dan *exhaust fan* sesuai kebutuhan proses *roasting*. Dengan metode ini, kecepatan aktuator dapat diatur secara fleksibel sehingga proses pemanasan dan sirkulasi udara dapat berlangsung lebih optimal.

Secara garis besar, rangkaian yang tampak Gambar 2.4 menunjukkan integrasi antara sistem pengukuran suhu, pengendalian aktuator, antarmuka pengguna, dan sistem keamanan yang dikendalikan oleh ESP32. Integrasi tersebut memungkinkan proses *roasting* kopi berlangsung secara otomatis, terkontrol, serta dapat dipantau secara *real-time* oleh pengguna.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Hasil perancangan

Hasil perancangan dan implementasi sistem *roasting* kopi berbasis ESP32 dengan fitur monitoring berbasis web diwujudkan dalam sebuah mesin yang menggunakan rangka menyerupai oven. Mesin tersebut memiliki dimensi 60 cm x 40 cm x 35 cm, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 3.1.



Gambar 3.1. 1 Tampak Depan



Gambar 3.1. 2 Tampak Samping



Gambar 3.1. 3 Tampak Belakang



Gambar 3.1. 4 Tampak Atas

Gambar 3.1 Tampak Mesin *Roasting*

Berdasarkan Gambar 3.1.1, pada sisi kiri rangka mesin terdapat sebuah *box panel* terdapat pada Gambar 3.2. yang berfungsi sebagai pusat pengendali (control panel) sistem. Di dalam *box panel* tersebut terdapat berbagai komponen elektronika yang berfungsi sebagai pengendali sistem, seperti mikrokontroler ESP32, modul sensor, catu daya, serta rangkaian pendukung lainnya. Selain itu, pada bagian depan *box panel* juga dipasang LCD 20×4 sebagai antarmuka pengguna yang digunakan untuk menampilkan informasi dan memantau kondisi sistem selama proses *roasting* berlangsung.



Gambar 3.2. 1 Tampak dalam Box Panel



Gambar 3.2. 2 Tampak depan Box Panel

Gambar 3.2. Box Panel *Control*

Pada sisi kanan mesin terdapat motor DC yang berfungsi sebagai penggerak utama untuk memutar drum *roasting*. Motor dihubungkan dengan poros drum memanfaatkan *belt* dan *pulley* dengan perbandingan diameter pulley sebesar 1:1 antara *pulley* motor dan *pulley* drum. Penggunaan sistem transmisi tersebut bertujuan untuk meneruskan putaran motor secara langsung ke drum tanpa mengubah kecepatan putarnya. Selain itu, pada sisi kanan bagian bawah rangka juga dipasang sebuah elemen pemanas (*heater*) yang berfungsi sebagai sumber panas utama selama proses *roasting* berlangsung, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 3.1.2.

Di bagian dalam rangka mesin terdapat sebuah drum *roasting* yang berfungsi sebagai wadah untuk menampung biji kopi selama proses *roasting*. Drum berbentuk tabung dengan diameter 25 cm

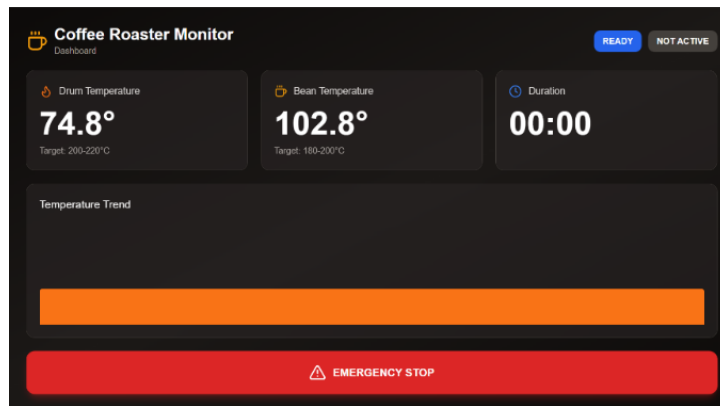
dan panjang 50 cm. Material drum menggunakan *stainless steel* 304 yaitu jenis baja tahan karat dengan material 18% kromium dan 8% nikel yang sangat tahan karat dan bersifat *food grade* dikarenakan mempunyai ketahanan yang baik terhadap korosi, mampu menghantarkan panas secara merata, serta memenuhi standar *food grade* sehingga aman digunakan pada proses pengolahan bahan pangan. Bentuk dan konstruksi drum *roasting* dapat dilihat pada Gambar 3.3.



Gambar 3. 3 Tampak Drum Kopi

Di dalam ruang oven juga dipasang lapisan aluminium foil yang berfungsi sebagai isolator termal untuk membantu mempertahankan kestabilan suhu selama proses *roasting*. Aluminium foil dipilih karena memiliki kemampuan memantulkan radiasi panas sehingga dapat mengurangi kehilangan panas ke lingkungan. Dengan adanya lapisan tersebut, panas di dalam ruang oven dapat dipertahankan dengan lebih baik sehingga distribusi suhu menjadi lebih merata dan proses *roasting* berlangsung lebih stabil. Secara teoritis volume drum memungkinkan kapasitas lebih besar, namun pada penelitian ini kapasitas dibatasi sebesar 1 kg untuk memperoleh distribusi panas yang lebih merata dan menyesuaikan daya *heater* 1600 W.

Kemudian, sistem dirancang juga dengan fitur monitoring berbasis *web* yang dapat diakses secara online. Fitur ini berfungsi sebagai media pemantauan (monitoring) secara *nirkabel* (*wireless*), sehingga pengguna bisa mudah memantau kondisi mesin *roasting* tanpa harus berada di dekat alat. Informasi yang ditampilkan pada halaman web meliputi suhu biji kopi, suhu drum, status proses *roasting*, durasi *roasting*, serta status *emergency*. Dengan adanya sistem monitoring berbasis web, pengguna dapat melakukan pemantauan proses *roasting* secara lebih praktis dan efisien, terutama ketika sedang mengerjakan aktivitas lain. Tampilan *dashboard web monitoring coffee roaster* ditunjukkan pada Gambar 3.4.

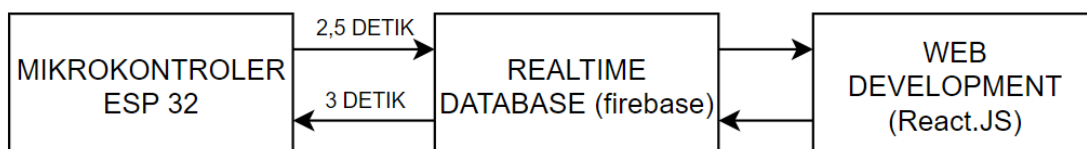


Gambar 3. 4 Tampilan Dashboard Monitoring Web.

Melalui halaman web monitoring, pengguna bisa memantau kondisi mesin *roasting* dengan *real-time*. Informasi yang ditampilkan meliputi suhu yang terbaca oleh masing-masing sensor, durasi proses *roasting*, serta status atau mode operasi sistem. Sebagai contoh, pada Gambar 3.4 ditunjukkan bahwa sistem berada pada kondisi *Ready*, yang menandakan bahwa proses *preheating* telah selesai dan mesin telah mencapai suhu awal yang ditentukan sehingga siap digunakan untuk proses *roasting*.

Ketika proses *roasting* dimulai, status sistem pada dashboard akan berubah dari *Ready* menjadi *Roasting*, sedangkan indikator status proses yang semula *Not Active* akan berubah menjadi *Active*. Perubahan status tersebut memberikan informasi kepada pengguna mengenai kondisi mesin secara langsung sehingga proses *roasting* dapat dipantau dengan lebih mudah.

Selain berfungsi sebagai media monitoring, website juga dilengkapi dengan fitur *Emergency Stop* yang dapat diakses secara jarak jauh. Fitur ini memungkinkan pengguna untuk menghentikan proses *roasting* apabila terjadi kondisi darurat, seperti kenaikan suhu yang tidak terkendali atau gangguan pada sistem. Ketika tombol *Emergency Stop* diaktifkan melalui *website*, ESP32 akan menerima perintah dari Firebase, kemudian secara otomatis mematikan *heater*, motor penggerak drum, dan *blower* sehingga proses *roasting* berhenti dengan aman.



Gambar 3. 5 Arsitektur pengiriman dan penerimaan data *Web*.

Gambar 3.5 menunjukkan arsitektur pengiriman data pada sistem, mulai dari pembacaan data oleh sensor hingga data ditampilkan pada *website monitoring*. Proses diawali dengan pembacaan suhu oleh sensor termokopel setiap 1 detik, kemudian data tersebut diproses oleh mikrokontroler ESP32. Hasil pembacaan terlebih dahulu digunakan untuk memperbarui informasi pada LCD sebagai tampilan

lokal, selanjutnya data suhu dikirim ke Firebase agar dapat ditampilkan pada website monitoring secara *real-time*. Setelah proses pengiriman data selesai, ESP32 melakukan pengecekan status *Emergency Stop*, baik dari tombol fisik maupun perintah yang diterima melalui Firebase. Setiap tahapan proses diberikan jeda sekitar 500 ms untuk mengatur urutan eksekusi program sehingga proses pembacaan sensor, pembaruan LCD, komunikasi dengan Firebase, dan pengecekan status emergency dapat berjalan secara stabil tanpa saling mengganggu ataupun menyebabkan kegagalan komunikasi.

Pemberian jeda tersebut bukan disebabkan oleh keterbatasan kemampuan ESP32, melainkan untuk mengurangi beban komunikasi yang berlangsung secara bersamaan, terutama pada proses akses Firebase melalui jaringan Wi-Fi, sehingga sistem dapat bekerja dengan lebih stabil dan mengurangi kemungkinan terjadinya kehilangan data atau timeout komunikasi.

3.2 Hasil Pengujian

3.2.1 Pengujian akurasi sensor suhu termokopel tipe – k

Pengujian dilakukan untuk memeriksa tingkat akurasi sensor termokopel yang digunakan pada sistem dengan membandingkan hasil pembacaan sensor terhadap alat ukur suhu sebagai referensi. Perbandingan antara nilai yang dihasilkan oleh sensor termokopel dan alat ukur referensi digunakan untuk menghitung nilai kesalahan (*error*) sehingga dapat diketahui tingkat ketelitian sensor dalam mengukur suhu.

Tabel 1. Tabel Hasil Pengujian Suhu 1 (Drum)

No.	Termometer Referensi	Sensor Suhu Drum	Error (%)
1	30°C	31,3°C	4%
2	41,8°C	43,2°C	3%
3	72°C	73,8°C	2%
4	92,3°C	94,2°C	2%
5	100,2°C	99,8°C	0%

Pengujian yang telah dilakukan menyajikan data pada Tabel 3.1, dapat diketahui bahwa sensor termokopel memiliki tingkat akurasi yang cukup baik jika dibandingkan dengan alat ukur suhu yang digunakan sebagai referensi. Pengujian dilakukan sebanyak lima kali pada rentang suhu yang berbeda untuk mengetahui tingkat kesesuaian hasil pembacaan sensor terhadap alat ukur referensi.

Berdasarkan data pengujian, nilai persentase *error* terbesar terjadi pada pengujian pertama. Pada pengujian tersebut, sensor termokopel membaca suhu sebesar 31,3°C, sedangkan alat ukur referensi menunjukkan suhu 30°C, sehingga diperoleh nilai *error* sebesar sekitar 4%. Selanjutnya,

pada pengujian kedua nilai *error* menurun menjadi sekitar 3%. Seiring meningkatnya suhu pengujian, nilai *error* yang dihasilkan semakin kecil hingga mendekati 0% pada pengujian suhu yang lebih tinggi. Hasil tersebut menunjukkan bahwa sensor termokopel memiliki tingkat akurasi yang semakin baik pada rentang suhu tinggi.

Selain itu, hasil pengujian menunjukkan bahwa pembacaan sensor termokopel cenderung sedikit lebih tinggi dibandingkan alat ukur referensi. Perbedaan tersebut dipengaruhi oleh metode pengukuran yang digunakan. Alat ukur referensi menggunakan sensor inframerah (infrared thermometer) yang mengukur suhu berdasarkan radiasi panas yang dipancarkan oleh permukaan objek tanpa kontak langsung. Sementara itu, sensor termokopel dipasang secara langsung pada drum *roasting* sehingga pengukuran suhu dipengaruhi oleh perpindahan panas secara konduksi dari drum serta radiasi panas di sekitarnya. Oleh karena itu, pembacaan sensor termokopel cenderung lebih tinggi dibandingkan pembacaan alat ukur inframerah.

Tabel 2. Tabel Hasil Pengujian Sensor Suhu 2 (Biji)

No.	Termometer Referensi	Sensor Suhu Biji	Error (%)
1	31,00°C	30,10°C	0%
2	48,90°C	44,60°C	-10%
3	73,10°C	69,73°C	-5%
4	108,00°C	104,08°C	-4%
5	121,00°C	117,00°C	-3%

Pengujian kedua dilakukan untuk mengevaluasi kinerja sensor termokopel kedua yang dipasang pada bagian belakang drum *roasting*, tepat di dekat sumber panas (*heater*). Pengujian memiliki tujuan untuk mengukur tingkat akurasi sensor dengan metode perbandingan hasil pembacaan sensor terhadap alat ukur suhu yang digunakan sebagai referensi. Hasil pengujian disajikan pada Tabel 2.

Berdasarkan hasil pengujian, pada pengambilan data pertama diperoleh hasil pembacaan sensor termokopel yang sangat mendekati hasil pembacaan alat ukur referensi. Hal tersebut disebabkan karena pengujian masih dilakukan pada suhu ruang sehingga distribusi panas di sekitar sensor relatif seragam.

Pada pengambilan data kedua, alat ukur referensi menunjukkan suhu sebesar 48,9°C, sedangkan sensor termokopel membaca suhu sebesar 44,6°C, sehingga diperoleh nilai *error* sekitar 10%. Nilai *error* tersebut merupakan yang terbesar pada pengujian sensor kedua. Nilai *error* besar

disebabkan penempatan sensor yang berada dibelakang sumber panas sehingga pada pengujian kedua panas belum menyebar merata. Selanjutnya, pada pengambilan data berikutnya nilai *error* semakin kecil sehingga hasil pembacaan sensor termokopel semakin mendekati hasil pengukuran alat ukur referensi.

Berdasarkan hasil pengujian tersebut, pembacaan alat ukur referensi cenderung lebih tinggi dibandingkan pembacaan sensor termokopel. Perbedaan ini dipengaruhi oleh posisi pemasangan sensor dan metode pengukuran yang digunakan. Sensor termokopel dipasang pada bagian belakang jalur semburan panas dari *heater* sehingga suhu yang diterima sensor dipengaruhi oleh proses perpindahan panas di dalam ruang *roasting*. Sementara itu, alat ukur inframerah diarahkan melalui cerobong mesin menuju permukaan di sekitar lokasi sensor sehingga memperoleh radiasi panas yang lebih langsung. Kondisi tersebut menyebabkan hasil pengukuran alat ukur referensi cenderung lebih tinggi dibandingkan pembacaan sensor termokopel.

Meskipun terdapat perbedaan nilai pengukuran pada beberapa titik pengujian, hasil yang diperoleh menunjukkan bahwa perbedaan suhu antara kedua metode pengukuran relatif kecil pada suhu operasi. Hal ini mengindikasikan bahwa distribusi panas di dalam ruang *roasting* telah berlangsung dengan cukup baik sehingga sensor mampu merepresentasikan kondisi suhu di dalam mesin secara akurat.

Tabel 3. Uji Konsistensi Sensor Termokel 1 dan 2

No.	Waktu	Sensor Suhu Biji	Sensor Drum	Rata - rata	Selisih
1	1 menit	95°C	96,50°C	95,75	1,50°C
2	3 menit	150,45°C	149,75°C	150,10	-0,70°C
3	6 menit	203,96°C	206,42°C	205,19	2,46°C
4	9 menit	202,34°C	208,00°C	205,17	5,66°C
5	12 menit	204,62°C	205,50°C	205,06	0,88°C

Pengujian selanjutnya untuk mengevaluasi konsistensi hasil pembacaan suhu kedua sensor termokopel selama proses *roasting* berlangsung. Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui kesesuaian pembacaan antara sensor suhu biji kopi dan sensor suhu drum pada kondisi operasi sebenarnya. Proses pengujian dilakukan dengan melakukan *roasting* kopi selama 12 menit menggunakan setpoint suhu 205°C. Hasil pengujian ditampilkan Tabel 3.

Pengujian menghasilkan data pada Tabel 3, pada menit ke-1 sensor suhu biji membaca suhu sebesar 95,0°C, sedangkan sensor suhu drum membaca suhu sebesar 96,5°C. Dengan demikian, rata-

rata suhu yang diperoleh dari kedua sensor adalah $95,75^{\circ}\text{C}$, dengan selisih pembacaan sebesar $1,5^{\circ}\text{C}$. Selanjutnya, pada menit ke-3 sensor suhu drum membaca suhu sebesar $149,75^{\circ}\text{C}$, sedangkan sensor suhu biji membaca $150,45^{\circ}\text{C}$, sehingga diperoleh rata-rata suhu sebesar $150,10^{\circ}\text{C}$ dengan selisih pembacaan yang relatif kecil.

Memasuki menit ke-6, ke-9, dan ke-12, suhu rata-rata kedua sensor telah mendekati dan mampu dipertahankan pada nilai setpoint 205°C . Pada menit ke-9 diperoleh selisih pembacaan sebesar $5,66^{\circ}\text{C}$ antara sensor suhu biji dan sensor suhu drum. Perbedaan ini disebabkan oleh posisi pemasangan sensor yang berbeda. Sensor pertama mengukur suhu biji kopi (Bean Temperature), sedangkan sensor kedua mengukur suhu ruang roasting (Environment Temperature). Pada proses roasting kopi, perbedaan suhu antara bean temperature dan environment temperature merupakan kondisi yang umum terjadi akibat perpindahan panas secara konveksi dan konduksi di dalam drum. Oleh karena itu, selisih tersebut tidak menunjukkan kesalahan sensor, melainkan perbedaan titik pengukuran.

Menurut data pada Tabel 3, hasil pengujian menunjukkan bahwa akurasi yang dimiliki kedua sensor memiliki tingkat konsistensi yang baik selama proses *roasting* berlangsung. Selisih pembacaan yang relatif kecil menunjukkan bahwa distribusi panas di dalam ruang *roasting* cukup merata serta sistem pengendalian suhu mampu menjaga temperatur mendekati nilai setpoint yang telah ditentukan.

Selain menunjukkan konsistensi pembacaan kedua sensor, hasil pengujian juga mengindikasikan bahwa sistem kendali PID mampu mempertahankan suhu *roasting* di sekitar nilai setpoint. Hal ini terlihat dari suhu rata-rata kedua sensor yang stabil pada menit ke-6 hingga menit ke-12 dengan selisih pembacaan yang relatif kecil. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa sistem kendali yang diterapkan mampu menjaga kestabilan suhu selama proses *roasting* berlangsung.

3.2.2 Pengujian Monitoring web

Pengujian sistem monitoring berbasis web dilakukan untuk mengevaluasi kinerja website sebagai media pemantauan (monitoring) mesin *roasting* secara jarak jauh. Pengujian ini bertujuan untuk memastikan bahwa data yang dikirimkan oleh mikrokontroler ESP32 dapat diterima dengan baik oleh database Firebase dan selanjutnya ditampilkan pada halaman website secara *real-time*.

Pengujian dilakukan menggunakan beberapa parameter, yaitu keberhasilan pengiriman data suhu sensor, status proses *roasting*, durasi *roasting*, serta status emergency dari ESP32 menuju database Firebase. Selain itu, dilakukan pengujian terhadap keberhasilan website dalam menampilkan data yang tersimpan pada database serta kemampuan website dalam mengirimkan perintah *Emergency Stop* kepada sistem.

Hasil pengujian digunakan untuk mengetahui tingkat keberhasilan komunikasi antara perangkat keras, database Firebase, dan website monitoring, sehingga dapat dipastikan bahwa sistem monitoring bekerja sesuai dengan fungsi yang telah dirancang.

Tabel 3. Pengujian Monitoring Web

Pengujian	Hasil
Data suhu tampil web	Berhasil
Status <i>roasting</i> tampil	Berhasil
Emergency dari web	Berhasil
Delay update	2,5 detik

Berdasarkan hasil pengujian yang disajikan pada Tabel 4, sistem monitoring berbasis web mampu menerima dan menampilkan data yang dikirimkan oleh perangkat keras (ESP32) melalui database Firebase. Data yang berhasil ditampilkan meliputi suhu dari kedua sensor, status proses *roasting*, durasi *roasting*, serta status *Emergency Stop*.

Hasil pengujian menunjukkan bahwa proses pengiriman data dari perangkat keras menuju database sangat dipengaruhi oleh kualitas koneksi internet yang digunakan. Pada kondisi jaringan saat pengujian dilakukan, rata-rata waktu tunda (delay) pengiriman data dari ESP32 hingga ditampilkan pada website adalah sekitar 2,5 detik. Monitoring berbasis web pada penelitian ini hanya berfungsi sebagai media pemantauan (monitoring), sedangkan seluruh proses pengendalian suhu dilakukan secara lokal oleh ESP32. Oleh karena itu keterlambatan sekitar 2,5 detik tidak mempengaruhi proses pengendalian PID maupun keamanan utama sistem.

Secara keseluruhan, sistem monitoring berbasis web telah berfungsi sesuai dengan perancangan. Website mampu menampilkan informasi kondisi mesin secara *real-time* dengan jeda waktu yang relatif singkat, sehingga dapat membantu pengguna dalam memantau proses *roasting* dari jarak jauh. Selain itu, fitur *Emergency Stop* yang tersedia pada website juga dapat mengirimkan perintah kepada ESP32 melalui Firebase dengan baik, sehingga dapat digunakan sebagai sistem keamanan tambahan apabila terjadi kondisi darurat selama proses *roasting* berlangsung.

Penggunaan *realtime database firebase* dikarenakan implementasinya yang mudah di integrasikan dengan mikrokontroler ESP 32 dan juga aplikasi web, sehingga penggunaan *realtime database firebase* sangat cukup untuk proses monitoring tambahan sistem ini. Pada penelitian ini Firebase digunakan sebagai media komunikasi data untuk keperluan pengujian sistem pada jaringan terbatas (local testing). Implementasi autentikasi pengguna, enkripsi lanjutan, dan pengaturan Firebase Security Rules belum menjadi fokus penelitian sehingga masih dapat dikembangkan pada penelitian

selanjutnya. Penelitian selanjutnya dapat menambahkan Firebase Authentication, Firebase Security Rules, serta mekanisme autentikasi pengguna agar akses terhadap sistem hanya dapat dilakukan oleh pengguna yang berwenang

3.2.3 Pengujian *Emergency Stop*

Pengujian *Emergency Stop* dilakukan untuk mengevaluasi kinerja sistem keamanan yang telah dirancang pada mesin *roasting* kopi. Pengujian ini bertujuan untuk memastikan bahwa fitur *Emergency Stop* dapat berfungsi dengan baik dalam menghentikan seluruh proses *roasting* ketika terjadi kondisi darurat. Selain itu, pengujian juga dilakukan untuk mengetahui respons sistem terhadap perintah *Emergency Stop* yang diberikan baik melalui tombol fisik maupun melalui website monitoring.

Pada pengujian ini diamati beberapa parameter, antara lain kemampuan sistem dalam mematikan *heater*, motor penggerak drum, dan *blower*, serta perubahan status sistem yang ditampilkan pada LCD dan website. Hasil pengujian digunakan untuk memastikan bahwa seluruh aktuator dapat dihentikan secara otomatis dan status *Emergency Stop* dapat ditampilkan dengan benar sebagai bentuk perlindungan terhadap pengguna maupun perangkat ketika terjadi kondisi yang tidak diinginkan.

Tabel 4. Pengujian *Emergency Stop*

Kondisi	Heater	Motor
Tombol fisik tidak ditekan	Nyala	Nyala
Tombol fisik ditekan	Mati	Mati
Perintah web emergency	Mati	Mati

Berdasarkan hasil pengujian yang disajikan pada Tabel 5, fitur *Emergency Stop* dapat berfungsi sesuai dengan perancangan sistem. Pada kondisi awal, tombol *Emergency Stop* fisik berada pada kondisi tidak ditekan sehingga sistem dapat melanjutkan proses inisialisasi. Sebelum memulai proses *roasting*, program terlebih dahulu memeriksa status tombol *Emergency Stop*. Apabila tombol berada pada kondisi aktif (ditekan), maka sistem tidak akan melanjutkan proses dan seluruh aktuator tetap berada pada kondisi mati sebagai langkah pengamanan.

Sebaliknya, apabila tombol *Emergency Stop* berada pada kondisi tidak aktif, sistem akan melanjutkan proses preheating untuk memanaskan drum hingga mencapai suhu yang telah ditentukan. Setelah suhu preheating tercapai, pengguna dapat memulai proses *roasting* sesuai dengan mode yang dipilih.

Selama proses *roasting* berlangsung, dilakukan pengujian dengan menekan tombol *Emergency Stop* fisik. Hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem secara otomatis menghentikan proses *roasting* dengan mematikan *heater*, motor penggerak drum, dan *blower*. Selain itu, LCD menampilkan status Emergency sebagai informasi kepada pengguna bahwa sistem telah memasuki kondisi darurat.

Pengujian juga dilakukan menggunakan fitur *Emergency Stop* pada website monitoring. Ketika perintah emergency dikirimkan melalui website, ESP32 menerima perintah tersebut melalui database Firebase dan menjalankan fungsi *Emergency Stop*. Sistem kemudian mematikan *heater*, motor penggerak drum, dan *blower* serta mengubah status sistem menjadi Emergency pada LCD maupun website. Hasil tersebut menunjukkan bahwa fitur *Emergency Stop*, baik melalui tombol fisik maupun website, mampu bekerja dengan baik sebagai sistem pengaman untuk menghentikan proses *roasting* ketika terjadi kondisi darurat.

3.2.4 Pengujian Koneksi Internet

Tabel 6. pengujian koneksi internet

Kondisi	Hasil
WiFi terhubung	Monitoring aktif
WiFi terputus	<i>Roasting</i> tetap berjalan
WiFi tersambung kembali	Data kembali terkirim

Pengujian koneksi internet dilakukan untuk mengevaluasi kinerja sistem ketika terhubung maupun tidak terhubung dengan jaringan WiFi. Pengujian ini bertujuan untuk memastikan bahwa sistem monitoring berbasis web hanya aktif ketika koneksi internet tersedia, sedangkan fungsi utama mesin *roasting* tetap dapat berjalan meskipun koneksi internet terputus.

Berdasarkan hasil pengujian pada Tabel 6, ketika ESP32 berhasil terhubung dengan jaringan WiFi, sistem secara otomatis mengaktifkan fitur monitoring berbasis web. Pada kondisi ini, data suhu, status proses *roasting*, durasi *roasting*, serta status *Emergency Stop* dapat dikirim ke database Firebase dan ditampilkan pada website secara *real-time*.

Sebaliknya, ketika koneksi WiFi terputus, proses pengiriman data ke Firebase dihentikan sehingga website tidak dapat menampilkan kondisi terbaru dari mesin *roasting*. Meskipun demikian, proses *roasting* tetap berlangsung secara normal karena seluruh proses pengendalian suhu, pembacaan sensor, serta pengoperasian *heater*, motor, dan *blower* dilakukan secara lokal oleh mikrokontroler ESP32 tanpa bergantung pada koneksi internet.

Ketika koneksi WiFi kembali tersedia, ESP32 secara otomatis melakukan koneksi ulang ke jaringan dan melanjutkan proses pengiriman data ke Firebase. Dengan demikian, fungsi monitoring

berbasis web dapat kembali digunakan tanpa mengganggu proses *roasting* yang sedang berlangsung. Hasil pengujian ini menunjukkan bahwa sistem memiliki tingkat keandalan yang baik, karena fungsi utama mesin tetap dapat beroperasi meskipun terjadi gangguan pada koneksi internet, sedangkan fitur monitoring berbasis web berfungsi sebagai fasilitas tambahan untuk memudahkan pengguna dalam memantau proses *roasting* dari jarak jauh.

3.2.5 Pengujian Kinerja Roasting

Tabel 7. Pengujian Kinerja *Roasting*

Parameter	Light Roast	Medium Roast	Dark Roast
Suhu	185°C	200°C	215°C
Waktu	15 menit	20 menit	25 menit
Warna Biji	Light Brown	Brown	Dark Brown

Pengujian terakhir dilakukan untuk mengevaluasi kinerja keseluruhan sistem *roasting* kopi yang telah dirancang. Pengujian ini bertujuan untuk memastikan bahwa seluruh komponen sistem, mulai dari sensor suhu, sistem kendali PID, *heater*, motor penggerak drum, *blower*, hingga sistem monitoring berbasis web, dapat bekerja secara terintegrasi sehingga menghasilkan tingkat kematangan biji kopi sesuai dengan parameter *roasting* yang telah ditentukan.

Berdasarkan hasil pengujian yang disajikan pada Tabel 7, sistem mampu menghasilkan tiga tingkat kematangan (roast level), yaitu Light Roast, Medium Roast, dan Dark Roast. Untuk menghasilkan Light Roast, sistem mempertahankan suhu *roasting* pada 185°C selama 15 menit, sehingga diperoleh biji kopi dengan warna cokelat muda. Selanjutnya, untuk menghasilkan Medium Roast, sistem mengendalikan suhu pada 200°C selama 20 menit, sehingga diperoleh biji kopi dengan warna cokelat yang lebih gelap dibandingkan Light Roast. Sementara itu, untuk menghasilkan Dark Roast, sistem mempertahankan suhu *roasting* pada 215°C selama 25 menit, sehingga dihasilkan biji kopi dengan warna cokelat tua yang merupakan karakteristik dari tingkat kematangan tersebut.

Hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem kendali yang diterapkan mampu mempertahankan suhu *roasting* mendekati nilai setpoint selama proses berlangsung. Hal tersebut ditunjukkan dengan keberhasilan sistem menghasilkan tingkat kematangan biji kopi sesuai dengan parameter suhu dan waktu yang telah ditentukan. Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa sistem *roasting* kopi berbasis ESP32 dan monitoring berbasis web telah bekerja sesuai dengan perancangan dan mampu menghasilkan proses *roasting* yang stabil serta konsisten.

4. PENUTUP

Hasil dari perancangan, implementasi, dan pengujian sistem *roasting* kopi berbasis ESP32 dengan monitoring berbasis web dapat disimpulkan bahwa telah dirancang dan diimplementasikan dengan berhasil sesuai dengan tujuan penelitian. Sistem memiliki kemampuan untuk mengendalikan proses *roasting* secara otomatis, yang berarti suhu *roasting* dapat dipertahankan dekat dengan titik *setpoint* yang ditentukan pengguna.

Sensor termokopel yang digunakan mampu mengukur suhu ruang *roasting* dengan tingkat akurasi yang baik berdasarkan hasil pengujian terhadap alat ukur referensi. Data suhu yang diperoleh digunakan sebagai masukan bagi sistem kendali PID untuk mengatur kerja *heater* sehingga proses *roasting* berlangsung secara stabil sesuai dengan parameter suhu dan waktu yang telah ditentukan.

Fitur monitoring berbasis web juga berhasil diimplementasikan dengan memanfaatkan ESP32 dan Firebase sebagai media komunikasi data. Website mampu menampilkan informasi suhu, status proses *roasting*, durasi proses, serta status *Emergency Stop* secara *real-time*. Selain itu, sistem tetap dapat menjalankan proses *roasting* secara normal ketika koneksi internet terputus karena fungsi monitoring hanya berperan sebagai fitur pendukung, sedangkan seluruh proses pengendalian dilakukan secara lokal oleh ESP32.

Sistem keamanan melalui fitur *Emergency Stop*, baik menggunakan tombol fisik maupun melalui website, juga telah berfungsi dengan baik. Ketika kondisi emergency diaktifkan, sistem secara otomatis menghentikan kerja *heater*, motor penggerak drum, dan *blower* sehingga proses *roasting* dapat dihentikan dengan aman. Berdasarkan keseluruhan hasil pengujian, sistem mampu menghasilkan tiga tingkat kematangan biji kopi, yaitu *Light Roast*, *Medium Roast*, dan *Dark Roast* sesuai dengan parameter suhu dan waktu yang telah ditentukan.

Berdasarkan temuan penelitian, beberapa ide dapat digunakan untuk penelitian lanjutan, sebagai berikut:

1. Melakukan pengembangan desain mekanik mesin *roasting*, terutama pada dimensi drum *roasting*, tata letak *heater*, dan sistem distribusi panas agar proses pemanasan menjadi lebih merata dan efisien.
2. Menambahkan material isolator termal yang lebih baik pada ruang *roasting* untuk mengurangi kehilangan panas (heat loss) sehingga efisiensi energi dan kestabilan suhu dapat ditingkatkan.
3. Menggunakan rotary encoder dengan kualitas dan spesifikasi yang lebih baik atau menambahkan rangkaian debouncing untuk meningkatkan keakuratan pembacaan menu serta mengurangi kesalahan pembacaan akibat noise.

4. Mengembangkan sistem monitoring berbasis web dengan fitur pencatatan (data logging), penyimpanan histori proses *roasting*, serta pengaturan profil *roasting* secara otomatis sehingga sistem menjadi lebih fleksibel dan mudah digunakan.

PERSANTUNAN

Alhamdulillah. Puji serta syukur penulis haturkan ke hadirat Allah subhanahuwata'la atas segala rahmat, karunia dan hidayah-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan penyusunan tugas akhir penulis dengan judul "*Rancang Bangun Sistem Roasting Kopi Dengan Monitoring Berbasis Web*" ini dengan banyak kemudahan dan kelancaran. Penulis sadar bahwa tugas akhir ini tidak akan berhasil tanpa bantuan, bimbingan, dan kritik dari berbagai pihak. Oleh karena itu, penulis mengucapkan terima kasih yang tulus kepada:

1. Ibu dan bapak terkasih serta kakak dan adek tersayang yang senantiasa selalu mendoakan, memberikan kasih sayang, dukungan moral dan material, serta memberikan doa yang tak pernah putus dalam setiap langkah penulis.
2. Bapak Bambang Hari Purwoto, S.T., M.T selaku dosen pembimbing yang telah dengan sabar memberikan arahan, masukan, serta dukungan selama proses penulisan skripsi ini berlangsung.
3. Saudari apt.Nadiatul Khaira S.Farm. dari awal pertemuan yang tidak disengaja, terimakasih atas segala support dari penulis memulai penelitian ini hingga berhasil mengakhiri penelitian ini dengan hasil yang memuaskan, Terimakasih teman perjalanan, thaks a lot of you..., kapan next trip kita yaa??
4. Saudari Sarah Faizah, S.Tr.Kes., Saudara Harits Abdullah, S.Pd., Didit Dermawan serta teman teman yang menemani penulis dari awal perkuliahan hingga bisa mencapai akhir kelulusan, terimakasih atas segala cerita keluh kesah dan pengalaman berharga yang kalian bagikan.
5. Saudara Hasby Asshodiq, Ridwan El Hakim, Roma Febrian, Khitananda Timor, Farhan Rahmadani Nugraha, Tegar Maulana Akmal, serta teman-teman yang telah berbagi ilmu , saran, kritik, serta pengalaman dalam pembuatan tugas akhir ini.
6. Segenap Civitas Akademik Laboratorium Teknik Elektro Universitas Muhammadiyah Surakartayang telah memmbimbing penulis serta memberikan tempat, fasilitas, dan lingkungan yang baik bagi penulis.
7. Dan seluruh insan yang menemani dan membantu penulis dalam menempuh perkuliahan dan mengerjakan penelitian ini dari awal penulis membuat proposal hingga lulus.

Semoga semua bantuan yang telah diberikan menjadi amal jariyah dan semoga mendapat balasan sebaik-baiknya dari Allah SWT.

DAFTAR PUSTAKA

- BPS, B. P. S. (2024). Statistik Kopi Indonesia 2023. In *Badan Pusat Statistik* (Vol. 8).
- Espressif Systems. (2025). ESP32 Series. *Esp32*, 1–65. https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32-s2_datasheet_en.pdf
- Kementerian Pertanian RI. (2019). *Pelatihan Budidaya Berkelanjutan (Good Agricultural Practices-GAP) dan Pascapanen (Post-Harvest) Kopi Arabika*. www.pertanian.go.id
- Nggala, L. H., Nachrowie, N., & Subairi, S. (2023). Implementasi Metode Proportional Integral Derivative (PID) Ziegler Nichols pada Kontrol Mesin Penyangrai Biji Kopi. *Energy - Jurnal Ilmiah Ilmu-Ilmu Teknik*, 13(1), 16–27. <https://doi.org/10.51747/energy.v13i1.1209>
- Ni'maturrakhmat, V., Puspanintyas, S., & Nurhayati, D. (2025). Analisis Nilai Tambah Produk Olahan Kopi Robusta. *Jurnal Teknologi Dan Manajemen Industri Terapan*, 4(4), 1440–1447.
- Oematan, A. J., Kelen, Y. P. K., Baso, B., & Sucipto, W. (2024). Rancang Bangun Mesin Roasted Biji Kopi Timor Portabel Berbasis Internet Of Things (IoT) dengan Mikrokontroler ESP32. *Jurnal Krisnadana*, 3(3), 155–165. <https://doi.org/10.58982/krisnadana.v3i3.606>
- Widiawati, D., & Renaldi, E. (2024). *Analisis Nilai Tambah Agribisnis Kopi Arabika di Kecamatan Doloksanggul, Kabupaten Humbang Hasundutan, Sumatera Utara*. 10, 2827–2836.
- Yusibani, E., Ikramullah, Yufita, E., Jalil, Z., & Suhendi, E. (2024). *THE EFFECT OF TEMPERATURE AND ROASTING TIME ON THE PHYSICAL PROPERTIES OF ARABICA AND ROBUSTA GAYO COFFEE BEAN*. 2(2), 306–312.