

Integrasi IoT pada Mesin Roasting Kopi *Fluidized Bed*

Wijaya Kusuma^{a)}, Rahman Azis Prasojo^{*a)}, Ibrahim^{a)}, Lukman Hakim^{a)}, Muhammad Arief Furqon^{a)}, Mochammad Erfian Ramadhan^{a)}

(Received 25 April 2025 || Revised 19 Mei 2025 || Published 30 Juni 2025)

Abstract: This research presents the development of an electric coffee roasting machine using the fluidized bed method, integrated with an Internet of Things (IoT)-based monitoring and control system. The system was designed to address limitations of previous prototypes that lacked remote temperature monitoring and automation. The roasting chamber utilizes a hot air stream to create fluidization, enabling uniform bean agitation and heat distribution. Key hardware includes a thermocouple sensor (MAX6675), an ESP32-S3 microcontroller, an AC light dimmer for heater control, and an electronic speed controller (ESC) for blower regulation. A user interface is provided via a TFT LCD screen and a custom mobile application connected through Firebase Realtime Database. Roasting profiles—consisting of bean type, target roast level, and batch weight—can be selected and executed automatically. The system was tested with various bean weights (50–250 g), demonstrating accurate temperature control, stable fluidization, and consistent roast levels. Results showed a temperature deviation below $\pm 1^\circ\text{C}$ from reference measurements, and all tests produced medium roast coffee with uniform color and aroma. The integration of IoT improves usability, process reliability, and potential scalability for small-scale roasting operations.

Keywords: IoT, coffee roasting, fluidized bed, ESP32-S3, automation, temperature control.

1. Pendahuluan

Kopi merupakan salah satu komoditas perkebunan utama yang memiliki nilai ekonomi tinggi di Indonesia. Berdasarkan data Badan Pusat Statistik (2023), produksi kopi Indonesia mencapai 758,7 ribu ton, menjadikan Indonesia sebagai salah satu negara penghasil kopi terbesar di dunia [1]. Untuk menjaga mutu dan cita rasa kopi, proses pascapanen seperti sangrai (*roasting*) memegang peranan yang sangat penting dalam menentukan kualitas akhir biji kopi. Proses sangrai bertujuan untuk mengembangkan aroma dan rasa khas kopi melalui reaksi kimia seperti Maillard reaction dan karamelisasi yang terjadi saat biji dipanaskan [2]. Metode tradisional seperti pemanggangan dengan wajan masih banyak digunakan, namun kurang mampu menghasilkan hasil sangrai yang konsisten dan seragam. Oleh karena itu, penggunaan mesin roasting menjadi solusi yang lebih efisien dan terkontrol.

Proses *fluidized bed roasting* menggunakan aliran udara panas berkecepatan tinggi untuk mengangkat dan mengaduk biji kopi dalam kondisi seperti cairan (*fluidisasi*), sehingga menciptakan pencampuran dan distribusi panas yang lebih merata dibanding metode drum tradisional. Karena pemanasan utama terjadi melalui perpindahan panas konvektif, teknik ini mampu memangkas waktu sangrai secara signifikan dan meningkatkan keseragaman hasil. Selain itu, studi menunjukkan bahwa *fluidized bed* menghasilkan profil rasa dan aroma yang lebih baik, dengan hasil lebih cepat dan homogen, meskipun memerlukan kontrol parameter yang lebih presisi, karena tidak ada penumpukan panas seperti pada drum roaster, sehingga respons terhadap perubahan suhu bersifat lebih cepat [3].

Namun demikian, banyak mesin sangrai skala kecil masih beroperasi secara manual, tanpa dukungan sistem monitoring dan kontrol otomatis. Beberapa studi telah mengembangkan alat sangrai berbasis mikrokontroler, seperti yang dilakukan oleh [4], [5], [6], [7], [8]. Selain itu, [9] mengembangkan *coffee bean roaster* berbasis IoT menggunakan ESP32, namun masih berfokus pada pengontrolan suhu sederhana tanpa kemampuan monitoring *real-time* yang komprehensif. Di sisi lain, kemajuan teknologi Internet of Things (IoT) membuka peluang baru untuk integrasi sistem pengendalian jarak jauh dan pemantauan berbasis aplikasi *mobile*. Misalnya, sistem monitoring kualitas kopi di Rwanda mengimplementasikan sensor suhu, pH, dan kelembapan yang

terhubung melalui mikrokontroler dan IoT untuk memantau proses pengolahan kopi secara real-time [10]. Dengan demikian, integrasi IoT pada alat sangrai skala kecil berpotensi merevolusi proses sangrai melalui pemantauan suhu *real-time*, kontrol otomatis, dan interaksi pengguna berbasis aplikasi.

Sebagai respons terhadap tantangan tersebut, penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan sistem monitoring dan kontrol berbasis IoT pada mesin *roasting* biji kopi elektrik dengan metode *fluidized bed*. Sistem ini dirancang menggunakan mikrokontroler ESP32-S3, sensor suhu termokopel, modul pemanas dan *blower* yang dikendalikan secara otomatis, serta antarmuka berbasis aplikasi Android yang terhubung melalui *Firebase Realtime Database*. Dengan pendekatan ini, diharapkan sistem mampu meningkatkan efisiensi, konsistensi hasil sangrai, serta kenyamanan pengguna dalam proses sangrai skala kecil hingga menengah.

2. Metode

2.1 Proses Sangrai Biji Kopi

Proses *sangrai (roasting)* merupakan tahapan vital dalam pengolahan biji kopi bertujuan untuk mengembangkan aroma, rasa, dan warna khas kopi melalui reaksi kimia kompleks [11]. Selama pemanggangan, terjadi reaksi Maillard (reaksi non-enzimatik antara gugus amino dan gula pereduksi) serta karamelisasi (thermal degradation gula), yang menghasilkan beragam senyawa volatil dan melanoidin penyokong profil sensorik kopi [12].

Beberapa parameter utama sangat menentukan kualitas hasil sangrai kopi antara lain suhu, waktu pemanggangan, dan distribusi panas [13]. Suhu biji kopi selama pemanggangan berperan penting karena mempengaruhi reaksi kimia, pelepasan air, dan perubahan volumetrik biji kopi [14]. Ketidakterkendalian terhadap suhu dan waktu membuat reaksi menjadi tidak optimal. Selain suhu dan waktu, distribusi panas juga memegang peran penting; pemanasan tidak merata, khususnya pada roaster drum atau wajan, dapat menciptakan perbedaan suhu di dalam *batch*, sehingga hanya sebagian biji yang mencapai tingkat kematangan optimal.

Metode pemanggangan drum adalah salah satu metode sangrai tradisional yang paling umum digunakan, terutama dalam skala rumah tangga dan sebagian usaha kecil. Teknik ini menggunakan drum berputar untuk mengaduk biji kopi, sehingga

*Korespondensi: rahmanazisp@polinema.ac.id

a) Prodi Teknik Listrik, Jurusan Teknik Elektro, Politeknik Negeri Malang, Malang, Indonesia.

memungkinkan perpindahan panas melalui konduksi dan radiasi dari permukaan drum ke biji [15].

Namun, metode ini memiliki beberapa keterbatasan penting. Distribusi panas didalam drum bisa jadi tidak merata tanpa dukungan aliran udara memadai. Beberapa biji dapat mengalami *over-roasting* atau gosong, sementara yang lain kurang matang. Selain itu, proses pemanasan bergantung pada transfer panas melalui permukaan drum, sehingga suhu naiknya lebih lambat dibandingkan metode konvektif seperti *fluidized bed*.

2.2 *Fluidized Bed*

Metode *fluidized bed roasting* menggunakan aliran udara panas berkecepatan tinggi untuk mengangkat dan mencampur biji kopi dalam kondisi *fluidisasi*, sehingga menciptakan distribusi panas yang lebih merata dibandingkan metode drum tradisional. Penelitian [3] menunjukkan bahwa metode *fluidized bed* menghasilkan variasi suhu roasting yang lebih rendah pada tingkat medium dan dark roast dibandingkan drum roaster, serta waktu *first crack* yang lebih singkat. Selain itu, studi desain dan evaluasi roaster *fluidized bed* [4] menyimpulkan bahwa metode ini menawarkan efisiensi energi yang tinggi dan hasil sangrai yang lebih cepat dan seragam. Keunggulan utama metode ini dibandingkan metode drum konvensional adalah kecepatan pemanasan yang lebih tinggi, waktu proses yang lebih singkat, dan hasil sangrai yang lebih konsisten. Karena tidak terjadi kontak langsung antara sumber panas dan biji kopi, risiko *over-roasting* atau terbakar dapat diminimalkan [16]. Selain itu, metode ini juga memungkinkan desain mesin dengan sistem tertutup, sehingga dapat lebih mudah dikendalikan dan diintegrasikan dengan sistem otomatisasi.

Dalam penelitian ini, sistem *fluidized bed* diterapkan dengan konfigurasi ruang pemanggangan berbahan stainless steel, pemanas listrik di bagian bawah, dan *blower* DC yang menghasilkan aliran udara panas ke atas. Biji kopi diletakkan di atas saringan logam berlubang, yang memungkinkan udara panas melewati dan mengangkat biji secara merata. Variasi aliran udara dan suhu dikendalikan secara elektronik melalui mikrokontroler untuk memastikan *fluidisasi* tetap stabil sesuai kapasitas biji kopi.

Rancangan ini didasarkan pada prinsip kerja alat sangrai sebelumnya yang telah diuji, dengan perbaikan pada efisiensi pemanasan, ukuran saringan, dan integrasi sensor suhu untuk meningkatkan akurasi pemantauan proses. Integrasi sistem *fluidized bed* ini menjadi fondasi utama dari inovasi alat roasting yang dikembangkan dalam penelitian ini.

2.3 Keunikan dan Kontribusi Penelitian

Penelitian ini menawarkan pendekatan yang terintegrasi dan inovatif dalam pengembangan mesin sangrai biji kopi elektrik, khususnya untuk skala kecil. Keunikan dari sistem yang dikembangkan terletak pada kombinasi metode *fluidized bed* dengan sistem monitoring dan kontrol berbasis *Internet of Things* (IoT), yang belum banyak dijumpai pada penelitian-penelitian terdahulu. Beberapa kontribusi utama dari penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Integrasi Metode *Fluidized Bed* dengan Kontrol Digital. Sistem pemanggangan menggunakan prinsip *fluidized bed* yang menghasilkan distribusi panas lebih merata dan waktu proses yang lebih singkat dibandingkan metode drum konvensional. Alat ini juga dilengkapi elemen pemanas dan *blower* yang dikontrol secara otomatis melalui mikrokontroler ESP32-S3.

2. Pemantauan dan Pengendalian *Real-Time* Berbasis IoT.

Alat dikembangkan dengan kemampuan konektivitas nirkabel menggunakan *Firebase Realtime Database* dan aplikasi Android, sehingga pengguna dapat memantau suhu dan mengontrol proses dari jarak jauh secara real-time.

3. Desain Modular dan Terjangkau.

Sistem dirancang dengan mempertimbangkan kemudahan perakitan dan biaya yang efisien, sehingga memungkinkan untuk direplikasi atau dikembangkan lebih lanjut oleh pelaku UMKM maupun kalangan akademik vokasional.

4. Pengembangan Antarmuka *Aplikasi Mobile* yang Sederhana. Aplikasi yang dibuat menggunakan platform Kodular menyediakan tampilan intuitif, lengkap dengan indikator suhu dan tombol fungsi seperti *preheat*, *start roasting*, dan *cooling*, mendukung kemudahan.

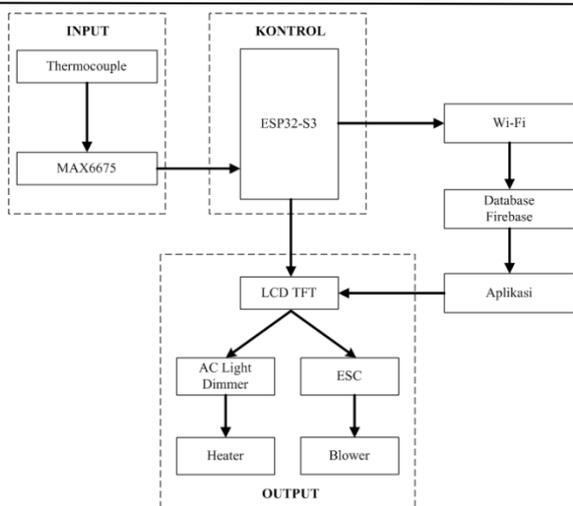
Dengan gabungan fitur-fitur tersebut, penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi nyata dalam pengembangan alat rekayasa terapan yang fungsional, efisien, dan sesuai kebutuhan industri kecil pengolahan kopi. Selain itu, pendekatan ini juga dapat menjadi contoh implementasi teknologi IoT dalam bidang agroindustri lokal.

2.4 Desain Sistem

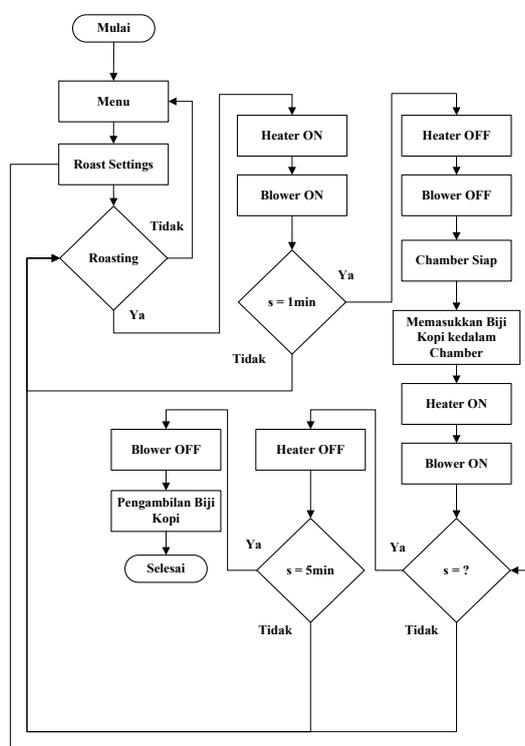
Penelitian ini dimulai dengan tahapan perancangan sistem secara menyeluruh, yang terdiri atas tiga komponen utama: sistem mekanik pemanggangan, sistem pemanas dan *fluidisasi*, serta sistem monitoring dan kontrol berbasis IoT. Desain alat dibuat menggunakan perangkat lunak desain CAD untuk memvisualisasikan bentuk ruang sangrai (*roasting chamber*), penempatan elemen pemanas, *blower*, serta jalur sirkulasi udara.

Gambar 3.1 menunjukkan diagram blok sistem kontrol mesin sangrai biji kopi elektrik berbasis metode *fluidized bed*. Sistem terdiri atas tiga komponen utama: masukan, kontrol, dan keluaran. Pada bagian masukan, sensor suhu tipe termokopel K mendeteksi suhu udara panas dalam ruang sangrai. Sinyal dari termokopel kemudian diubah menjadi data digital oleh modul MAX6675 sebelum dikirim ke mikrokontroler. Bagian kontrol menggunakan ESP32-S3 yang berperan sebagai pusat pengendali sistem. Mikrokontroler ini menerima data suhu dari MAX6675 dan menampilkannya secara *real-time* melalui layar LCD TFT. Mikrokontroler juga mengatur kinerja pemanas listrik (*heater*) melalui modul AC *Light Dimmer*, serta *blower* DC melalui *Electronic Speed Controller* (ESC) untuk menjaga aliran udara panas yang stabil dalam *chamber*. Selain kontrol lokal, ESP32-S3 terhubung ke jaringan Wi-Fi dan berkomunikasi dengan *Firebase Realtime Database*. Aplikasi mobile yang dikembangkan menggunakan platform Kodular mengambil dan mengirim data melalui *Firebase*, memungkinkan pengguna untuk memantau suhu serta mengendalikan alat secara jarak jauh menggunakan *smartphone*. Dengan integrasi ini, sistem memungkinkan pemanggangan biji kopi yang lebih akurat, efisien, dan dapat dikendalikan dari jarak jauh.

Gambar 2.2 menunjukkan diagram alir (flowchart) proses kerja alat sangrai biji kopi elektrik berbasis metode *fluidized bed*. Proses diawali dari menu utama yang ditampilkan pada layar monitor LCD TFT. Pengguna terlebih dahulu memilih menu *Roast Settings* untuk menentukan parameter pemanggangan, termasuk durasi dan suhu target.



GAMBAR 2.1 BLOK DIAGRAM SISTEM



GAMBAR 2.2 FLOWCHART KERJA ALAT

Setelah parameter ditentukan, sistem akan masuk ke mode *preheating*, yaitu ketika *heater* dan *blower* menyala secara bersamaan untuk memanaskan *chamber* selama ± 1 menit. Setelah suhu tercapai, sistem akan mematikan *heater* dan *blower*, dan menampilkan status “Chamber Siap”. Pengguna kemudian diminta untuk memasukkan biji kopi ke dalam *chamber*. Setelah biji dimasukkan, proses sangrai dimulai secara otomatis. *Heater* dan *blower* kembali diaktifkan, dan proses sangrai berlangsung selama waktu yang telah ditentukan sebelumnya pada menu pengaturan. Durasi ini dapat bervariasi tergantung jenis dan jumlah biji kopi. Setelah waktu sangrai berakhir, sistem secara otomatis mematikan *heater* dan beralih ke mode pendinginan, yaitu *blower* tetap menyala selama ± 5 menit untuk menurunkan suhu *chamber* dan menghindari biji kopi terlalu matang karena panas residual. Setelah proses pendinginan selesai, *blower* akan mati dan alat menampilkan instruksi pengambilan biji kopi. Dengan demikian,

seluruh proses sangrai dianggap selesai dan alat kembali ke kondisi awal.

2.5 Perancangan Perangkat Keras

Perangkat keras sistem terdiri dari:

- Pemanas listrik, menggunakan elemen pemanas tipe coil dengan daya sekitar 400 Watt untuk menghasilkan suhu panas yang dibutuhkan dalam proses sangrai.
- *Blower*, menggunakan *blower* DC untuk menghasilkan aliran udara panas dari bawah *chamber*, menciptakan efek *fluidized bed*.
- Sensor suhu, menggunakan sensor termokopel tipe K yang dihubungkan dengan modul MAX6675 untuk membaca suhu udara dan suhu biji kopi secara akurat.
- Mikrokontroler ESP32-S3, bertugas sebagai pusat kontrol, menerima data dari sensor, mengatur pemanas dan *blower*, serta mengirimkan data suhu ke server *Firebase*.

2.6 Perancangan Aplikasi IoT

Aplikasi Android dikembangkan menggunakan platform Kodular, yang memungkinkan antarmuka pengguna dapat menampilkan suhu secara *real-time* serta memberikan kontrol terhadap alat melalui perintah:

- *preheat* – mengaktifkan pemanas untuk pemanasan awal;
- *start roasting* – menjalankan proses pemanggangan;
- *cooling* – menghentikan pemanas dan mengaktifkan pendinginan.

Firebase Realtime Database digunakan sebagai media komunikasi antara aplikasi dan mikrokontroler.

2.7 Tahapan Pembuatan dan Integrasi Sistem

Pembuatan dan integrasi sistem diawali dengan perakitan komponen yang melibatkan pembuatan *chamber* sangrai berbahan stainless steel, instalasi pemanas dan *blower*, serta pemasangan sensor. Dilanjutkan dengan pemasangan dan pemrograman mikrokontroler yang meliputi konfigurasi ESP32-S3, pengolahan data suhu, dan pengendalian aktuator berdasarkan logika kendali. Selanjutnya integrasi *firebase* dan aplikasi mobile dengan menghubungkan perangkat keras ke aplikasi Android melalui *Firebase* agar dapat beroperasi secara *real-time*.

2.8 Pengujian dan Evaluasi Kinerja

Pengujian dilakukan untuk mengukur:

- stabilitas suhu pemanggangan;
- respon sistem terhadap perintah dari aplikasi;
- konsistensi kerja blower dan pemanas saat suhu mencapai nilai referensi;
- keandalan koneksi antara perangkat dan aplikasi.

Data pengujian digunakan untuk mengevaluasi apakah sistem sudah bekerja sesuai dengan fungsinya dan untuk mengidentifikasi kebutuhan penyempurnaan.

3. Hasil dan Pembahasan

3.1 Hasil Perakitan Alat

Setelah proses desain dan perakitan selesai, diperoleh alat sangrai biji kopi elektrik berbasis metode *fluidized bed* seperti ditunjukkan pada Gambar 3.1. Alat ini terdiri dari dua bagian utama, yaitu bagian *roasting chamber* di bagian atas dan unit kontrol di

bagian bawah.



GAMBAR 3.1 ALAT ROASTING BIJI KOPI ELEKTRIK BERBASIS FLUIDIZED BED

Roasting chamber dibuat dari bahan *stainless steel* berbentuk silinder vertikal, dilengkapi dengan saringan udara di bagian dasar untuk memungkinkan aliran udara panas mengangkat biji kopi selama proses pemangangan. Gagang kayu ditambahkan untuk memudahkan penanganan dan mengurangi risiko panas saat digunakan. Unit kontrol berfungsi sebagai pusat kendali sistem dan terdiri atas:

- Mikrokontroler ESP32-S3 sebagai otak sistem.
- Layar LCD TFT 3,5 inci untuk menampilkan suhu dan menu pengoperasian.
- Tombol *rotary encoder* untuk navigasi menu.
- Indikator suhu digital dan saklar fungsi.

Terdapat pula konektor dan port daya untuk *blower* dan pemanas, serta antena Wi-Fi internal untuk komunikasi data dengan *Firebase*. Alat ini dirancang secara modular sehingga mudah untuk dilakukan pengembangan lanjutan atau pemeliharaan. Dengan desain seperti ini, alat mampu melakukan proses *preheating*, *roasting*, dan *cooling* secara otomatis dan terpantau melalui aplikasi Android berbasis IoT. Setelah seluruh komponen sistem terpasang dan terintegrasi, antarmuka pengguna dikembangkan untuk memberikan kemudahan dalam pengoperasian alat. Antarmuka ini ditampilkan pada layar LCD TFT 3,5 inci dan terdiri dari beberapa menu utama yang dapat diakses melalui *rotary encoder*. Tampilan antarmuka meliputi:

- pengaturan sangrai, seperti jenis kopi, tingkat kematangan (*light/medium/dark*), kapasitas biji kopi, kecepatan kipas (fan), dan daya pemanas;
- mode operasi, termasuk tombol *Preheat*, *Start Roast*, dan *Cooling*.
- monitoring suhu, menampilkan data suhu udara panas (*Air Temperature/AT*) dan suhu biji kopi (*Bean Temperature/BT*) secara *real-time*.
- Indikator visual waktu sangrai dan status pendinginan.

Gambar 3.2 berikut menunjukkan tiga tampilan utama pada layar LCD selama proses sangrai. Antarmuka ini dirancang agar sederhana dan intuitif, memungkinkan pengguna tanpa latar belakang teknis untuk dapat mengoperasikan alat dengan mudah. Kombinasi antara tampilan suhu, waktu, dan kontrol langsung dari layar maupun aplikasi mendukung fleksibilitas dan efisiensi dalam

penggunaan alat sangrai berbasis *fluidized bed* ini.



GAMBAR 3.2 TAMPILAN ANTARMUKA LCD TFT ALAT SANGRAI KOPI (A) MENU PENGATURAN SANGRAI; (B) MODE *PREHEAT* DAN MONITORING SUHU; (C) PROSES PENDINGINAN (*COOLING MODE*)

3.2 Pengujian Sistem Pemanasan dan Fluidisasi

Pengujian awal dilakukan untuk mengevaluasi kinerja sistem pemanas dan blower dalam menghasilkan suhu udara panas yang stabil, serta efektivitas metode *fluidized bed* dalam mengangkat biji kopi. Pengujian dilakukan tanpa biji kopi terlebih dahulu untuk mengamati respons suhu terhadap waktu pemanasan.

Pengukuran suhu dilakukan menggunakan dua jenis sensor:

- Sensor AT (*Air Temperature*) untuk mengukur suhu udara panas dalam chamber.
- Sensor BT (*Bean Temperature*) untuk mengukur suhu mendekati permukaan biji kopi (dalam simulasi tanpa biji, sensor diletakkan pada posisi target aliran udara).

Hasil pengukuran suhu dari sensor sistem dibandingkan dengan alat ukur eksternal untuk mengetahui deviasi dan akurasi pembacaan. Tabel 3.1 menunjukkan hasil perbandingan antara sensor suhu dengan alat ukur eksternal. Hasil menunjukkan bahwa perbedaan antara pembacaan sensor sistem dan alat ukur eksternal relatif kecil, umumnya dalam rentang $\pm 1^\circ\text{C}$, yang masih dapat diterima dalam pengujian suhu proses. Hal ini menunjukkan bahwa sistem pemantauan suhu berbasis MAX6675 cukup akurat untuk digunakan dalam proses sangrai biji kopi.

TABEL 3.1 HASIL PENGUKURAN SENSOR DAN ALAT UKUR EKSTERNAL

Pengukuran ke-	Sensor AT	Alat Ukur AT	Sensor BT	Alat Ukur BT
1	32,4°C	32,1°C	35,6°C	35,4°C
2	57,8°C	58,0°C	62,2°C	63,3°C
3	77,2°C	76,3°C	84,5°C	83,9°C
4	101,6°C	101,1°C	132,7°C	133,3°C
5	153,4°C	153,0°C	172,3°C	170,9°C
6	178,7°C	177,9°C	193,1°C	192,4°C
7	204,6°C	202,7°C	224,6°C	223,2°C
8	220,1°C	219,3°C	238,3°C	238,0°C
9	246,3°C	244,9°C	251,7°C	251,2°C
10	253,7°C	253,7°C	265,8°C	265,2°C

Setelah proses *preheat*, *blower* diaktifkan untuk mengalirkan udara panas ke dalam *chamber*. Uji visual menunjukkan bahwa dengan berat biji kopi hingga 100–120 gram, proses fluidisasi berjalan stabil dan biji kopi dapat melayang secara merata dalam ruang sangrai. Jika jumlah biji terlalu banyak atau tekanan udara tidak mencukupi, fluidisasi menjadi tidak optimal.

3.3 Prosedur Pengujian Alat

Pengujian alat dilakukan untuk menguji fungsionalitas sistem

pemanas, *blower*, kontrol otomatis, serta evaluasi kualitas hasil roasting berdasarkan variasi berat biji kopi. Prosedur pengujian dilaksanakan melalui langkah-langkah berikut.

a) Persiapan Biji Kopi.

Pada tahap ini dipilih biji kopi dengan kualitas dan kondisi yang seragam untuk memastikan konsistensi hasil pengujian.

b) Form Pengujian.

Pada tahap ini Disiapkan form pengujian untuk mencatat semua parameter dan hasil setiap percobaan, termasuk suhu, waktu, serta tingkat kematangan.

c) Penimbangan Awal.

Biji kopi ditimbang sesuai dengan skenario percobaan yang direncanakan:

- Percobaan 1: 50 gram
- Percobaan 2: 100 gram
- Percobaan 3: 150 gram
- Percobaan 4: 200 gram
- Percobaan 5: 250 gram

d) Aktivasi Sistem.

Alat dihidupkan menggunakan saklar utama. Pada tampilan LCD, pengguna diarahkan memilih menu *Roast Settings*.

e) Pemilihan Profil dan Tingkat Sangrai

Pengguna memilih profil sangrai sesuai preferensi jenis kopi dan tingkat kematangan yang diinginkan (*light*, *medium*, atau *dark*). Profil ini menentukan kombinasi waktu dan suhu pemanggangan.

f) *Preheating* dan Pemasangan Sensor.

Sensor suhu dipasang pada *chamber*, kemudian sistem menjalankan mode *preheat* selama ± 1 menit untuk menstabilkan suhu awal pemanggangan.

g) Proses Sangrai.

Setelah *preheating*, biji kopi dimasukkan ke dalam *chamber*, dan tombol *Start Roast* ditekan. Sistem akan mengatur pemanas dan *blower* sesuai parameter dalam profil yang dipilih.

h) Monitoring Melalui Aplikasi.

Selama proses berlangsung, pengguna dapat memantau suhu dan status alat secara *real-time* melalui aplikasi Android yang terhubung ke *Firebase*. Menu *Wi-Fi Settings* digunakan untuk menyambungkan alat ke internet.

i) Pendinginan dan Penyelesaian

Setelah sangrai selesai, alat otomatis masuk ke mode *cooling* selama ± 5 menit. Setelah proses pendinginan selesai dan suhu stabil, alat akan berhenti otomatis dan biji kopi dapat diambil dari *chamber*.

3.4 Pengujian Kinerja Sistem Kontrol IoT

Sistem kontrol dan monitoring berbasis *Firebase* dan aplikasi Android diuji dalam berbagai kondisi koneksi.

- Perintah *preheat*, *start roasting*, dan *cooling* berhasil diteruskan dari aplikasi ke ESP32-S3 tanpa jeda berarti (rata-rata < 1 detik) pada koneksi Wi-Fi stabil.
- Tampilan suhu dalam aplikasi mampu memperbarui data setiap ± 1 detik, mengikuti pembacaan dari sensor suhu.

Hal ini menunjukkan bahwa integrasi antara sensor, mikrokontroler, *Firebase*, dan antarmuka aplikasi berjalan efektif untuk pemantauan suhu secara *real-time*.

3.5 Evaluasi Proses Sangrai

Setelah tahap *preheating* dan proses fluidisasi berjalan stabil, pengujian sangrai dilakukan dengan variasi massa biji kopi dari 50 gram hingga 250 gram. Tujuan pengujian ini adalah untuk

mengevaluasi kinerja alat dalam menjaga suhu dan menghasilkan tingkat kematangan yang konsisten pada berbagai kapasitas. Seluruh proses dilakukan menggunakan kontrol suhu otomatis dan kecepatan *blower* yang disesuaikan secara bertahap. Parameter yang diamati meliputi suhu udara (*air temperature*), suhu biji kopi (*bean temperature*), kecepatan kipas, daya pemanas (*heater*), serta durasi waktu pemanggangan.

TABEL 3.2 RINGKASAN HASIL UJI ROASTING BERDASARKAN BERAT BIJI KOPI

Berat/g	Air Temp	Bean Temp	Fan	Heater	Time /Min	Hasil
50	219°C	232°C	20%	100%	5	Medium
100	211°C	225°C	40%	100%	7	Medium
150	217°C	238°C	60%	100%	9	Medium
200	215°C	239°C	80%	100%	13	Medium
250	222°C	247°C	100%	100%	15	Medium

Gambar 3.3 menunjukkan hasil sangrai dari salah satu pengujian dengan berat biji kopi sebesar 123,3 gram. Berdasarkan hasil tersebut, sistem mampu mempertahankan kestabilan suhu dan menghasilkan tingkat kematangan yang seragam (*medium roast*) untuk berbagai berat biji. Durasi pemanggangan bertambah seiring dengan kenaikan massa biji kopi, namun sistem tetap dapat mengatur suhu dan aliran udara secara efektif untuk mencapai hasil optimal.



GAMBAR 3.3 HASIL SANGRAI BIJI KOPI DENGAN TINGKAT KEMATANGAN MEDIUM

Evaluasi visual menunjukkan bahwa biji kopi sangrai tidak mengalami gosong (*scorching*) maupun *underdeveloped*, serta menghasilkan aroma yang cukup kuat dan warna yang seragam. Hal ini menandakan bahwa sistem kontrol suhu dan fluidisasi berjalan sesuai rancangan.

4. Kesimpulan

Penelitian ini berhasil mengembangkan sistem monitoring dan kontrol berbasis *Internet of Things* (IoT) pada mesin roasting kopi elektrik dengan metode *fluidized bed*. Sistem ini mengintegrasikan mikrokontroler ESP32-S3, sensor suhu termokopel MAX6675, dimmer pemanas AC, pengendali kecepatan *blower* (ESC), serta aplikasi mobile berbasis Android yang terhubung melalui *Firebase Realtime Database*. Hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem mampu mengendalikan suhu dengan stabil, dengan deviasi pengukuran di bawah $\pm 1^\circ\text{C}$ dibandingkan alat ukur eksternal. Proses fluidisasi berlangsung efektif untuk kapasitas hingga 120 gram biji kopi, dengan hasil sangrai yang konsisten pada berbagai variasi berat uji. Antarmuka pengguna melalui layar LCD dan aplikasi memungkinkan pemantauan suhu serta pengoperasian

alat secara *real-time*, baik lokal maupun jarak jauh. Integrasi antara metode *fluidized bed* dan kontrol IoT terbukti meningkatkan kemudahan penggunaan, fleksibilitas pengoperasian, dan konsistensi hasil sangrai. Sistem ini cocok diterapkan pada skala kecil, seperti di lingkungan pendidikan vokasi atau pelaku UMKM, serta memberikan dasar kuat untuk pengembangan lebih lanjut seperti otomatisasi profil roasting dan pencatatan data historis.

Referensi

- [1] BPS-Statistics Indonesia, "Indonesia Coffee Statistics," 2024.
- [2] E. B. Tarigan, E. Wardiana, Y. S. Hilmi, and N. A. Komarudin, "The changes in chemical properties of coffee during roasting: A review," in *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, IOP Publishing Ltd, Feb. 2022. doi: 10.1088/1755-1315/974/1/012115.
- [3] A. Rahayuningtyas *et al.*, "Evaluation of Fluidized-Bed and Drum Roaster Performance in Roasting of Robusta Green Bean," in *BIO Web of Conferences*, EDP Sciences, Oct. 2023. doi: 10.1051/bioconf/20236903006.
- [4] R. Agustian, A. Bintoro, R. Rosdiana, M. Jannah, S. Salahuddin, and W. K. A. Al-Ani, "Design of Automatic Coffee Bean Roaster Based on Arduino Uno Microcontroller," *International Journal of Advances in Data and Information Systems*, vol. 3, no. 2, pp. 49–57, Nov. 2022, doi: 10.25008/ijadis.v3i2.1238.
- [5] Yao Xu, Jonathan Shaull, Travis Bavar, and Lizhe Tan, "Smart Coffee Roaster Design with Connected Devices," in *2018 IEEE International Conference on Consumer Electronics (ICCE)*, IEEE, 2018.
- [6] Siti Amra, Rachmawati Rachmawati, Raisah Hayati, and Desitari Yusian TB, "Rancang Bangun Alat Penyangrai Kopi Secara Otomatis Berbasis Mikrokontroler," in *Prosiding Seminar Nasional Politeknik Negeri Lhokseumawe*, 2020.
- [7] A. Zamri, "Perancangan Mesin Penyangrai Kopi Tipe Rotari Berbasis Mikrokontroler Arduino," *Jurnal Teknik Mesin*, vol. 16, no. 1, pp. 92–96, Jun. 2023, doi: 10.30630/jtm.16.1.1081.
- [8] Ari Rahayuningtyas, Dadang Dayat Hidayat, Maulana Furqon, and Teguh Santoso, "SISTEM MONITORING DAN KONTROL SUHU ALAT SANGRAI BIJI KOPI OTOMATIS BERBASIS MIKROKONTROLER," *Agrointek: Jurnal Teknologi Industri Pertanian*, vol. 13, no. 2, 2023.
- [9] Bayu Geriyandi, "Design of an Internet of Things Based Coffee Bean Roaster Tool using ESP32 Microcontroller," University of Technology Yogyakarta, 2023.
- [10] J. Rutayisire, S. Markon, and N. Raymond, "IoT based Coffee quality monitoring and processing system in Rwanda," in *2017 International Conference on Applied System Innovation (ICASI)*, IEEE, May 2017, pp. 1209–1212. doi: 10.1109/ICASI.2017.7988106.
- [11] D. G. Debona *et al.*, "Heat and Mass Transfer Kinetics on the Chemical and Sensory Quality of Arabica Coffee Beans," *Agronomy*, vol. 12, no. 11, p. 2880, Nov. 2022, doi: 10.3390/agronomy12112880.
- [12] J. M. Yu, M. Chu, H. Park, J. Park, and K. G. Lee, "Analysis of volatile compounds in coffee prepared by various brewing and roasting methods," *Foods*, vol. 10, no. 6, Jun. 2021, doi: 10.3390/foods10061347.
- [13] S. Saloko, Y. Sulastri, Murad, and M. A. Rinjani, "The effects of temperature and roasting time on the quality of ground Robusta coffee (*Coffea robusta*) using Gene Café roaster," 2019, p. 060001. doi: 10.1063/1.5141310.
- [14] J. D. Bustos-Vanegas, M. A. Martins, P. C. Corrêa, F. M. Baptestini, and G. H. H. de Oliveira, "Modeling and simulation of coffee bean heating during roasting: effect of heat generation," *Frontiers in Food Science and Technology*, vol. 5, 2025, doi: 10.3389/frfst.2025.1603783.
- [15] D. D. Hidayat, A. Sudaryanto, Y. R. Kurniawan, A. Indriati, and D. Sagita, "Development and evaluation of drum coffee roasting machine for small-scale enterprises," *INMATEH - Agricultural Engineering*, vol. 60, no. 1, pp. 79–88, 2020, doi: 10.35633/INMATEH-60-09.
- [16] D. Ariwibowo, S. Sutrisno, S. Darmanto, J. Mrihardjono, M. E. Yulianto, and R. Sitawati, "INTRODUKSI TEKNOLOGI ROASTING UNTUK MENINGKATKAN PRODUKTIVITAS INDUSTRI KOPI ROBUSTA GUNUNG KELIR," *Jurnal Pengabdian Vokasi*, vol. 1, no. 4, pp. 264–267, Nov. 2020.