

BAB 2. TINJAUAN TEORI

2.1 Karakteristik Pascapanen Buah Kopi

Pascapanen buah kopi merupakan serangkaian kegiatan yang dilakukan setelah pemanenan untuk mempertahankan mutu buah kopi hingga siap diolah atau dipasarkan. Menurut Setiawati dan Kasyfillah (2022), tahapan pascapanen meliputi sortasi, pengolahan, fermentasi, pencucian, pengeringan, penyimpanan, hingga penggilingan. Setiap tahapan tersebut berpengaruh terhadap mutu fisik, kimia, dan cita rasa kopi sehingga penanganan yang tepat menjadi faktor penting dalam menghasilkan kopi berkualitas. Buah kopi segar yang baru dipanen mengandung kadar air awal yang tinggi (mencapai 60%–65%), sehingga rentan mengalami kerusakan dan penurunan mutu akibat aktivitas mikroorganisme apabila tidak segera dikeringkan (Setiawati dan Kasyfillah, 2022).

Proses pengeringan merupakan salah satu tahapan krusial dalam penanganan pascapanen yang bertujuan menurunkan kadar air buah kopi guna menghambat pertumbuhan mikroorganisme serta menjaga mutu simpan kopi (Setiawati dan Kasyfillah, 2022). Pada metode pengolahan natural (*dry process*), buah kopi dikeringkan dalam keadaan utuh sebelum dilakukan proses pengupasan (*hulling*) untuk menghasilkan kopi beras (*green coffee bean*) (Setiawati dan Kasyfillah, 2022). Kopi beras yang dihasilkan umumnya ditargetkan memiliki kadar air sekitar 11%–12% agar aman disimpan. Sejalan dengan hal tersebut, Nafisah *et al.* (2024) melaporkan bahwa sistem pengering kopi berbasis *Fuzzy Logic* mampu mengendalikan proses pengeringan hingga mencapai kadar air akhir biji kopi sebesar 12,5%. Oleh karena itu, pengendalian suhu dan lama pengeringan menjadi faktor penentu agar kadar air dapat diturunkan secara optimal tanpa merusak mutu fisik maupun cita rasa kopi.

2.2 Pengering Inframerah

Pengering inframerah (*infrared dryer*) merupakan metode pengeringan yang memanfaatkan radiasi inframerah sebagai sumber energi panas untuk menurunkan kadar air bahan. Radiasi inframerah termasuk bagian dari spektrum gelombang

elektromagnetik yang memiliki panjang gelombang sekitar 0,75–1000 μm dan berada di antara cahaya tampak serta gelombang mikro (Wang *et al.*, 2024). Berbeda dengan pengering konvensional yang mengandalkan perpindahan panas secara konveksi melalui udara, energi radiasi inframerah dipancarkan langsung menuju permukaan bahan sehingga panas dapat diserap secara lebih efektif. Oleh karena itu, teknologi ini banyak diterapkan pada proses pengeringan pangan karena mampu meningkatkan laju perpindahan panas apabila kondisi pengeringan dikendalikan dengan baik (Skåra *et al.*, 2023).

Prinsip kerja pengering inframerah diawali dengan pemancaran radiasi dari elemen pemanas menuju permukaan bahan. Energi radiasi yang diserap akan dikonversi menjadi energi panas sehingga suhu permukaan meningkat, kemudian panas merambat ke bagian dalam bahan melalui mekanisme konduksi. Peningkatan suhu menyebabkan air di dalam bahan berdifusi menuju permukaan dan selanjutnya menguap ke lingkungan. Menurut Wang *et al.* (2024), mekanisme pemanasan melalui radiasi memungkinkan perpindahan panas berlangsung lebih cepat dibandingkan pemanasan yang hanya mengandalkan konveksi udara. Dalam penelitian ini, sumber panas yang digunakan berupa lampu pemanas inframerah (*infrared heat lamp*) 220 V berdaya 600 W yang berfungsi sebagai pemancar radiasi untuk proses pengeringan buah kopi.

2.3 Sistem Kontrol Pada Pengering

Sistem kontrol merupakan suatu mekanisme yang berfungsi mengatur dan mempertahankan variabel proses agar tetap berada pada kondisi operasi yang diinginkan (*setpoint*). Pada sistem pengering, pengendalian suhu dan kelembapan relatif di dalam ruang pengering diperlukan agar proses pengeringan berlangsung secara stabil. Fluktuasi suhu yang tidak terkontrol dapat memengaruhi laju pengeringan dan mutu hasil pengeringan, sedangkan kelembapan udara menentukan kemampuan udara dalam menyerap uap air dari bahan. Oleh karena itu, pengendalian kedua parameter tersebut menjadi faktor penting dalam menjaga kestabilan proses pengeringan (Nafisah *et al.*, 2024).

Secara umum, sistem kontrol pada alat pengering terdiri atas tiga komponen utama, yaitu sensor, pengendali (*controller*), dan aktuator yang saling terhubung dalam suatu sistem kendali (*control loop*). Sensor berfungsi mengukur kondisi proses, seperti suhu dan kelembapan, kemudian mengirimkan data hasil pengukuran kepada pengendali untuk diproses sesuai dengan metode kendali yang digunakan (Nafisah *et al.*, 2024). Selanjutnya, pengendali memberikan perintah kepada aktuator, seperti elemen pemanas (*heater*) dan blower, untuk menyesuaikan kondisi ruang pengering secara otomatis. Melalui mekanisme tersebut, sistem kontrol mampu merespons perubahan kondisi di dalam ruang pengering sehingga suhu dan kelembapan dapat dipertahankan mendekati nilai yang diinginkan.

2.4 *Fuzzy Logic*

Fuzzy Logic merupakan metode pengambilan keputusan yang digunakan untuk menangani permasalahan yang mengandung ketidakpastian melalui pendekatan derajat keanggotaan (*membership degree*), berbeda dengan logika biner yang hanya mengenal dua nilai mutlak, yaitu benar (1) atau salah (0). Menurut Pei *et al.* (2022), metode ini mampu menghasilkan keputusan pengendalian berdasarkan kombinasi beberapa variabel masukan yang diproses melalui aturan (*rule base*), sehingga aksi kendali dapat disesuaikan dengan kondisi proses tanpa bergantung pada satu nilai ambang (*threshold*). Karakteristik tersebut menjadikan *Fuzzy Logic* banyak diterapkan pada sistem kendali lingkaran tertutup (*closed-loop control*), terutama pada proses yang memiliki perubahan kondisi secara kontinu, seperti suhu dan kelembapan. Pada sistem *closed-loop*, data hasil pengukuran sensor digunakan sebagai sinyal umpan balik (*feedback*) untuk dibandingkan dengan nilai acuan (*setpoint*), kemudian diproses oleh pengendali *Fuzzy Logic* guna menentukan aksi aktuator secara berkelanjutan sehingga kondisi proses dapat dipertahankan mendekati nilai yang diinginkan (Mitra *et al.*, 2021).

Secara umum, proses *Fuzzy Logic* terdiri atas tiga tahapan utama, yaitu *fuzzification* untuk mengubah data masukan tegas (*crisp input*) menjadi derajat keanggotaan pada himpunan *fuzzy*, *inference* untuk menentukan keputusan berdasarkan kumpulan aturan (*rule base*), dan *defuzzification* untuk mengubah hasil

inferensi menjadi nilai keluaran tegas (*crisp output*) (Pei *et al.*, 2022). Karakteristik tersebut menjadikan *Fuzzy Logic* sesuai diterapkan pada sistem pengendalian suhu dan kelembapan pada proses pengeringan karena mampu menghasilkan keputusan pengendalian berdasarkan kombinasi beberapa variabel masukan tanpa memerlukan model matematis yang kompleks. Penerapan metode ini pada pengering kopi telah ditunjukkan oleh Nafisah *et al.*, (2024), yang menerapkan algoritma *Mamdani* untuk mempertahankan suhu pengering pada nilai acuan 50 °C. Konsep tersebut menjadi dasar pada penelitian ini, di mana *Fuzzy Logic* digunakan untuk mengendalikan *heater* berdasarkan suhu target 40-60°C serta blower berdasarkan kelembapan relatif (RH) dengan target RH di bawah 40% selama proses pengeringan.

2.5 Sistem Kontrol Berbasis *Internet of Things* (IoT)

Sistem kontrol berbasis *Internet of Things* (IoT) merupakan sistem yang mengintegrasikan perangkat keras, sensor, aktuator, mikrokontroler, dan jaringan internet sehingga proses pengendalian serta pemantauan dapat dilakukan secara otomatis dan *real-time*. Pada sistem ini, mikrokontroler berfungsi sebagai pusat kendali yang menerima data dari sensor, mengolah data berdasarkan algoritma pengendalian, kemudian mengirimkan perintah ke aktuator sekaligus meneruskan data hasil pengukuran ke platform berbasis *cloud*. Penerapan IoT pada sistem pengering memungkinkan kondisi suhu, kelembapan, serta status aktuator dipantau secara *real-time*, sehingga proses pengeringan dapat diawasi dengan lebih mudah (Syamsiana *et al.*, 2024).

2.5.1 ESP32

ESP32 merupakan mikrokontroler performa tinggi berbasis mikroprosesor *dual-core* yang dikembangkan oleh Espressif Systems dan telah dilengkapi dengan modul *Wi-Fi* serta *Bluetooth* terintegrasi. Dalam sistem pengeringan ini, ESP32 bertugas sebagai pengendali utama (*main controller*) yang mengeksekusi algoritma *Fuzzy Logic* secara *real-time*. Mikrokontroler ini menerima data masukan dari sensor suhu dan kelembapan, mengolah nilai tersebut melalui proses kalkulasi *fuzzy*, serta menghasilkan sinyal keluaran untuk mengendalikan aksi aktuator

(*heater* dan *blower*) guna mempertahankan kondisi pengeringan ideal. Selain berfungsi sebagai pemroses logika kendali lokal, konektivitas *Wi-Fi* pada ESP32 memungkinkan pengiriman data variabel proses secara berkelanjutan ke platform *Internet of Things* (IoT) untuk keperluan pemantauan dan pencatatan data jarak jauh (Syamsiana *et al.*, 2024).

2.5.2 DHT 22

DHT22 merupakan sensor digital yang berfungsi untuk mengukur suhu dan kelembaban udara secara bersamaan. Sensor ini memiliki rentang pengukuran suhu -40°C hingga 80°C dengan akurasi sekitar $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$, serta rentang pengukuran kelembaban 0–100% RH dengan akurasi $\pm 2\text{--}5\%$ RH, sehingga memiliki tingkat ketelitian yang lebih baik dibandingkan DHT11. Data hasil pengukuran dikirim dalam bentuk sinyal digital sehingga memudahkan proses integrasi dengan berbagai mikrokontroler. Karena memiliki akurasi yang baik dan mudah diimplementasikan, DHT22 banyak digunakan pada sistem monitoring lingkungan, otomasi, serta aplikasi *Internet of Things* (IoT) untuk pengukuran suhu dan kelembaban secara *real-time* (Syamsiana *et al.*, 2024).

2.5.3 RTC (Real Time Clock) DS3231

RTC (*Real Time Clock*) DS3231 merupakan modul pewaktu presisi tinggi yang berfungsi menyediakan data waktu dan tanggal secara akurat pada sistem pengering. Modul ini dilengkapi dengan *Temperature Compensated Crystal Oscillator* (TCXO) untuk meminimalkan penyimpangan waktu akibat fluktuasi suhu, serta baterai cadangan (*backup battery*) agar pencatatan waktu tetap berlangsung meskipun catu daya utama terputus. Dalam sistem kendali berbasis *Fuzzy Logic*, RTC DS3231 berperan penting untuk memberikan stempel waktu (*timestamp*) pada setiap keputusan pengontrolan yang dieksekusi oleh algoritma, seperti perubahan status *heater* dan *blower*. Adanya penanda waktu yang presisi ini memungkinkan analisis grafik respon kontrol *Fuzzy Logic* terhadap waktu pengeringan, serta memastikan pencatatan durasi total pengeringan kopi pada platform *Internet of Things* (IoT) berlangsung secara akurat dan kontinu (Syamsiana *et al.*, 2024).

2.5.4 ThingSpeak

ThingSpeak merupakan platform *Internet of Things* (IoT) berbasis *cloud* yang digunakan untuk menerima, menyimpan, mengelola, dan menampilkan data dari perangkat yang terhubung ke internet. Platform ini menyediakan *Application Programming Interface* (API) sehingga memungkinkan mikrokontroler, seperti ESP32, mengirimkan data sensor secara *real-time* untuk disimpan dan divisualisasikan dalam bentuk grafik. Selain mendukung proses monitoring jarak jauh, ThingSpeak juga banyak dimanfaatkan sebagai media pencatatan (*data logging*) dan analisis data pada berbagai aplikasi IoT karena mudah diintegrasikan dengan berbagai sensor dan perangkat kendali (Fauzan dan Nurdin, 2024).

2.6 Kajian Literatur

Kajian literatur dilakukan untuk mengkaji perkembangan penelitian pengering inframerah, pengendalian berbasis *Fuzzy Logic*, serta pemantauan berbasis *Internet of Things* (IoT) pada pengeringan produk pertanian. Studi terdahulu membuktikan bahwa integrasi teknologi ini dapat menjaga kestabilan suhu, serta memfasilitasi pemantauan secara *real-time*. Namun, penelitian yang mengombinasikan ketiga teknologi tersebut secara simultan pada pengeringan buah kopi masih terbatas. Oleh karena itu, penelitian-penelitian terdahulu digunakan sebagai acuan dasar dalam merancang sistem pada penelitian ini, sebagaimana dirangkum pada Tabel 2.1.

Tabel 2.1 Hasil literatur

Penelitian	Hasil berdasarkan literatur		
	Judul	Metode	Hasil
Nurhandayani dan Rivai (2019)	<i>Sistem Kontrol Pengering Makanan Berbasis LED Inframerah</i>	Sistem pengering berbasis LED inframerah dengan pengendalian otomatis menggunakan mikrokontroler.	Pengering inframerah mampu meningkatkan efisiensi proses pengeringan serta menjaga kestabilan suhu selama proses berlangsung.
Pei et al. (2022)	<i>An Improvement of Far-Infrared Drying for Ginger Slices with Computer Vision and Fuzzy Logic Control</i>	Pengering inframerah dipadukan dengan <i>computer vision</i> dan <i>Fuzzy Logic</i> .	Metode <i>Fuzzy Logic</i> mampu meningkatkan kestabilan suhu, memperbaiki kualitas hasil pengeringan, dan meningkatkan efisiensi energi.

Tabel 2.2 Hasil literatur (lanjutan)

Kurniawan <i>et al.</i> (2023)	<i>Sistem Kendali Suhu Prototipe Mesin Pengereng Biji Kopi dengan Metode PID dan IoT Monitoring</i>	Pengendalian suhu menggunakan PID dengan monitoring berbasis IoT.	Sistem mampu mempertahankan suhu sesuai <i>setpoint</i> dan menyediakan monitoring secara <i>real-time</i> .
Syamsiana <i>et al.</i> (2024)	<i>Implementasi Sistem Monitoring Alat Pengereng Biji Kopi Berbasis IoT</i>	Monitoring suhu dan kelembaban menggunakan sensor digital yang terhubung ke platform IoT.	Sistem mampu menampilkan data suhu dan kelembaban secara <i>real-time</i> , sehingga memudahkan proses pemantauan pengeringan.
Martinez <i>et al.</i> (2025)	<i>Instrumentation and Evaluation of a Sensing System with Signal Conditioning Using Fuzzy Logic for a Rotary Dryer</i>	Pengendalian sistem pengering menggunakan metode <i>Fuzzy Logic</i> .	<i>Fuzzy Logic</i> menghasilkan pengendalian yang lebih adaptif dan meningkatkan kestabilan proses pengeringan.

2.7 Pengembangan Hipotesis

Berdasarkan kajian teori dan hasil penelitian terdahulu, metode *Fuzzy Logic* diperkirakan mampu menghasilkan keputusan pengendalian berdasarkan kondisi suhu dan kelembapan yang terukur melalui tahapan *fuzzification*, *inference*, dan *defuzzification*. Integrasi sistem pemantauan berbasis *Internet of Things* (IoT) memungkinkan data suhu, kelembapan, dan status aktuator dikirim serta ditampilkan secara *real-time*, sehingga kondisi ruang pengering dapat dipantau selama proses pengeringan berlangsung.

Berdasarkan uraian tersebut, hipotesis dalam penelitian ini adalah bahwa penerapan sistem kontrol berbasis *Fuzzy Logic* pada pengering inframerah mampu mengendalikan suhu ruang pengering secara otomatis pada rentang 40–60 °C dan mempertahankan kelembapan relatif ruang pengering di bawah 40%, serta mampu menyajikan pemantauan kondisi pengeringan secara *real-time* berbasis *Internet of Things* (IoT).