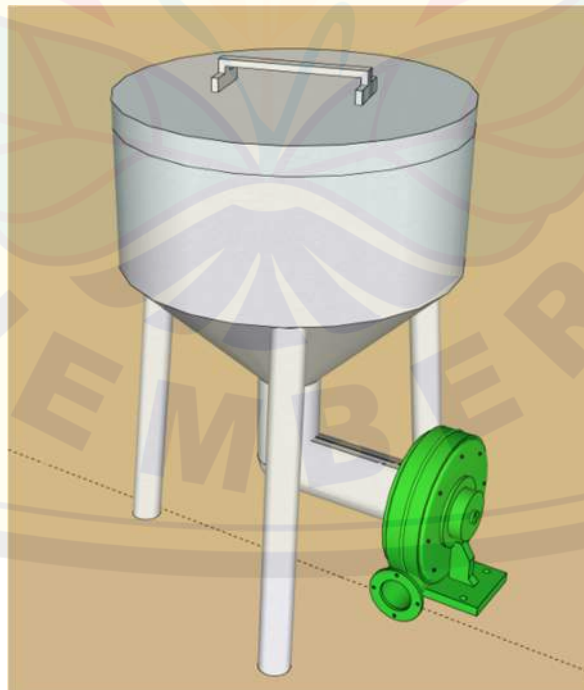


BAB 4. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Hasil Perancangan Sistem Pengering Inframerah Berbasis *Fuzzy Logic*

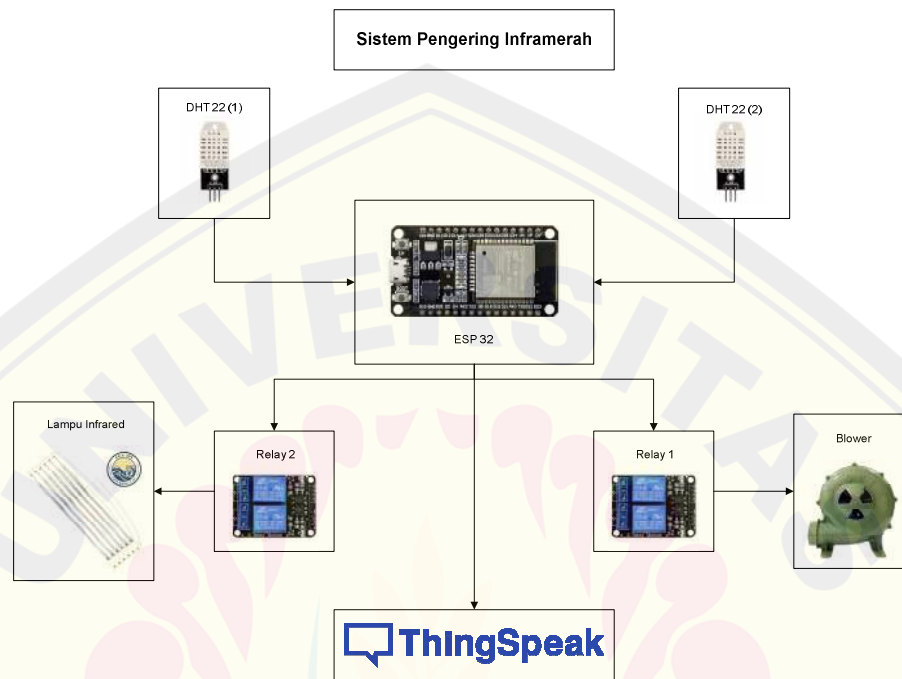
Pada penelitian ini telah berhasil dirancang dan diimplementasikan sistem pengering inframerah berbasis *Artificial Intelligence* menggunakan metode *Fuzzy Logic* untuk mengendalikan proses pengeringan buah kopi secara otomatis. Sistem dirancang dengan memanfaatkan suhu dan kelembaban sebagai variabel masukan untuk mempertahankan suhu ruang pengering pada rentang 40–60°C. Selain itu, sistem dilengkapi dengan monitoring berbasis *Internet of Things* (IoT) menggunakan platform ThingSpeak sehingga kondisi pengering dapat dipantau secara *real-time*. Penggunaan sumber panas inframerah dipilih karena mampu menghasilkan pemanasan yang lebih cepat dan merata dibandingkan metode pengeringan konvensional sehingga berpotensi meningkatkan efisiensi proses pengeringan. Hasil tersebut sejalan dengan penelitian Nurhandayani dan Rivai, (2018) menunjukkan bahwa sistem pengering berbasis LED inframerah mampu meningkatkan efisiensi pengeringan dan menghasilkan distribusi panas yang lebih baik. Rancangan sistem pengering inframerah yang digunakan pada penelitian ini disajikan pada Gambar 4.1.



Gambar 4.1 Mesin pengering

4.1.1 Diagram Blok Sistem Pengering Inframerah Berbasis Fuzzy Logic

Gambar 4.2 adalah diagram blok sistem pengering inframerah berbasis *Fuzzy Logic*.



Gambar 4.2 Diagram blok sistem pengering inframerah

Berdasarkan Gambar 4.1, sistem pengering yang telah dirancang terdiri atas dua sensor DHT22, mikrokontroler ESP32, algoritma *Fuzzy Logic*, modul relay dua kanal, lampu inframerah, blower, serta platform ThingSpeak sebagai media monitoring berbasis IoT. Seluruh komponen berhasil diintegrasikan sehingga membentuk sistem kontrol tertutup (*closed-loop control*) yang mampu melakukan pembacaan kondisi ruang pengering, pengambilan keputusan, pengendalian aktuator, dan monitoring secara otomatis.

Pada sistem yang dirancang, dua sensor DHT22 digunakan untuk mengukur suhu dan kelembaban di dalam ruang pengering. Penggunaan dua sensor bertujuan memperoleh nilai rata-rata yang lebih representatif sekaligus mengurangi kemungkinan perbedaan pembacaan akibat distribusi suhu dan kelembaban yang tidak merata di dalam ruang pengering. Nilai rata-rata tersebut selanjutnya digunakan sebagai masukan metode *Fuzzy Logic* untuk menentukan kondisi operasi

sistem. Pendekatan ini sejalan dengan penelitian Syamsiana *et al.* (2024) yang memanfaatkan sensor suhu dan kelembaban sebagai parameter utama pada sistem monitoring pengering berbasis IoT. Hasil perancangan menunjukkan bahwa ESP32 mampu menjalankan seluruh fungsi sistem, mulai dari pembacaan data sensor, proses inferensi *Fuzzy Logic*, pengendalian relay, hingga pengiriman data ke platform ThingSpeak melalui jaringan Wi-Fi. Integrasi tersebut memungkinkan seluruh proses pengendalian dan monitoring berlangsung secara otomatis tanpa memerlukan intervensi pengguna selama proses pengeringan.

Keputusan hasil *Fuzzy Logic* diteruskan menuju modul relay dua kanal untuk mengendalikan lampu inframerah dan blower. Meskipun metode *Fuzzy Logic* menghasilkan keluaran berupa nilai *crisp*, aktuator yang digunakan pada penelitian ini berupa relay digital sehingga hanya memiliki dua kondisi operasi, yaitu ON dan OFF. Oleh karena itu, nilai hasil defuzzifikasi dikonversi menggunakan nilai ambang (*threshold*) sebelum diterapkan pada relay sehingga pengendalian tetap mengikuti hasil inferensi *Fuzzy Logic*.

Selain berfungsi sebagai pengendali, ESP32 juga berhasil mengirimkan data suhu, kelembaban, serta status relay menuju platform ThingSpeak melalui jaringan Wi-Fi. Data tersebut ditampilkan dalam bentuk grafik secara *real-time*, sehingga proses pengeringan dapat dipantau dari jarak jauh. Sistem monitoring ini memudahkan proses pengambilan data sekaligus mendukung evaluasi kinerja sistem selama proses pengeringan. Hasil tersebut sejalan dengan penelitian Syamsiana *et al.* (2024) menunjukkan bahwa sistem monitoring berbasis IoT mampu mempermudah pengawasan kondisi pengering secara *real-time*.

Berdasarkan hasil perancangan, seluruh komponen perangkat keras dan perangkat lunak berhasil diintegrasikan menjadi satu sistem pengering inframerah berbasis *Fuzzy Logic*. Sistem mampu membaca suhu dan kelembaban ruang pengering, menjalankan proses pengambilan keputusan menggunakan *Fuzzy Logic*, mengendalikan lampu inframerah dan blower secara otomatis melalui relay, serta menampilkan hasil monitoring secara *real-time*. Dengan demikian, sistem yang dirancang telah memenuhi tujuan penelitian dan siap digunakan pada tahap pengujian proses pengeringan buah kopi.

4.1.2 Metode Fuzzy Logic pada Sistem Pengering Inframerah

Sistem pengering inframerah pada penelitian ini menerapkan metode Fuzzy Logic sebagai algoritma pengambilan keputusan untuk mengendalikan proses pengeringan buah kopi secara otomatis. Sistem menerima dua variabel masukan berupa suhu dan kelembaban yang dibaca oleh dua sensor DHT22, sedangkan keluarannya berupa kondisi relay pemanas dan relay blower dalam bentuk logika ON atau OFF. Proses pengendalian terdiri atas tiga tahapan utama, yaitu fuzzifikasi, inferensi (*rule base*), dan defuzzifikasi. Menurut Pei *et al.* (2022), Fuzzy Logic menghasilkan keputusan pengendalian berdasarkan kombinasi beberapa kondisi masukan yang diproses melalui aturan (*rule base*), sehingga mampu mengendalikan suhu dan kelembaban sesuai perubahan kondisi proses

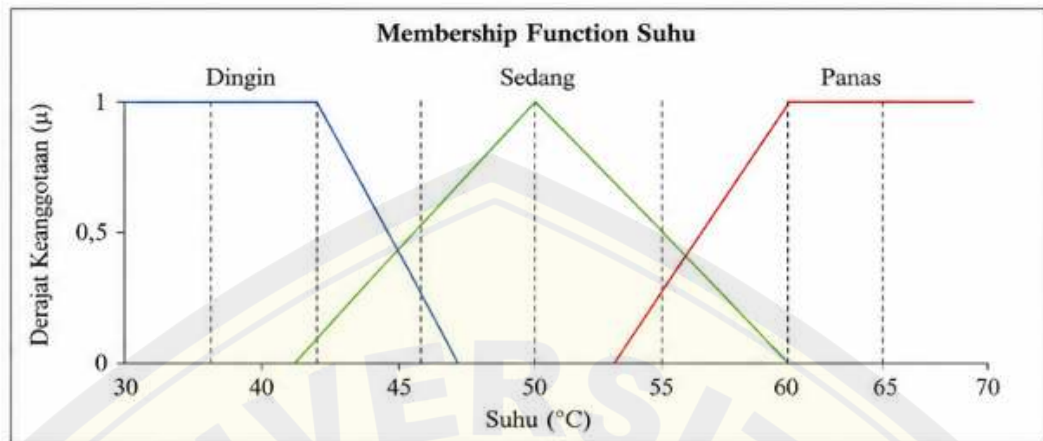
1. Fuzzifikasi

Fuzzifikasi merupakan tahap awal dalam metode *Fuzzy Logic* yang mengubah data masukan berupa suhu dan kelembaban menjadi derajat keanggotaan (*membership value*) pada setiap himpunan *fuzzy*. Nilai derajat keanggotaan tersebut kemudian digunakan sebagai masukan pada proses inferensi untuk menentukan keputusan pengendalian berdasarkan aturan (*rule base*) yang telah ditetapkan. Dengan demikian, perubahan nilai suhu dan kelembaban tidak langsung menghasilkan keputusan ON atau OFF, tetapi terlebih dahulu dipetakan ke dalam beberapa kondisi keanggotaan sehingga keputusan pengendalian dapat disesuaikan dengan kondisi proses pengeringan (Martinez *et al.*, 2025).

a. *Membership Function* Suhu

Variabel suhu dibagi menjadi tiga himpunan *fuzzy*, yaitu dingin, sedang, dan panas. Setiap himpunan dirancang menggunakan fungsi keanggotaan yang saling beririsan (*overlapping*) sehingga perubahan nilai suhu dapat menghasilkan transisi antar kondisi secara bertahap. Pendekatan tersebut membantu sistem menghasilkan keputusan pengendalian yang lebih stabil dan tidak berubah secara tiba-tiba selama proses pengeringan. Bentuk fungsi keanggotaan suhu ditunjukkan pada Gambar 4.3. Hal ini sejalan dengan penelitian Pei *et al.* (2022) yang menyatakan bahwa penggunaan fungsi keanggotaan yang saling beririsan mampu meningkatkan

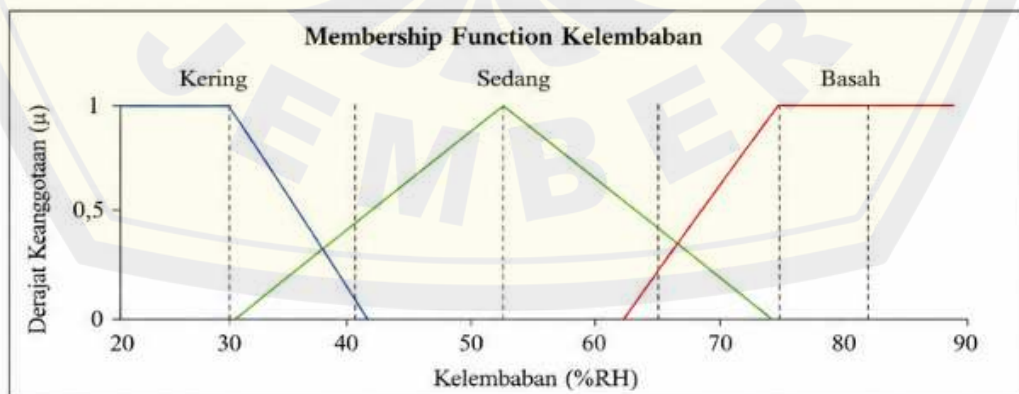
kestabilan sistem kontrol melalui transisi antar kondisi yang lebih halus. Gambar 4.3 menunjukkan *Membership function* suhu yang digunakan pada sistem.



Gambar 4.3 *Membership function* suhu

b. *Membership Function* Kelembaban

Variabel kelembaban dibagi menjadi tiga himpunan fuzzy, yaitu kering, sedang, dan basah. Pembagian tersebut bertujuan untuk merepresentasikan kondisi kelembaban ruang pengering sehingga sistem dapat menentukan keputusan pengendalian blower sesuai dengan perubahan kelembaban yang terjadi. Bentuk fungsi keanggotaan kelembaban ditunjukkan pada Gambar 4.4. Menurut Martinez *et al.* (2025) fungsi keanggotaan pada variabel kelembapan berperan dalam meningkatkan sensitivitas sistem terhadap perubahan kondisi pengeringan, sehingga keputusan pengendalian dihasilkan berdasarkan derajat keanggotaan, bukan hanya satu nilai ambang (*threshold*). Gambar 4.4 adalah membership function kelembaban yang digunakan pada sistem.



Gambar 4.4 *Membership function* kelembaban

2. Inferensi (Aplikasi *Rule Base*)

Inferensi merupakan tahap penerapan aturan (*rule base*) untuk menghasilkan nilai keluaran berdasarkan derajat keanggotaan variabel suhu dan kelembaban. Pada penelitian ini, aturan fuzzy digunakan untuk menghitung skor pemanas (*heater score*) dari variabel suhu serta skor blower (*fan score*) dari variabel kelembaban sebagai dasar pengambilan keputusan sistem. Menurut Pei *et al.* (2022), kualitas sistem *Fuzzy Logic* sangat dipengaruhi oleh penyusunan *rule base* karena aturan tersebut menjadi dasar dalam proses pengambilan keputusan. Rule base yang digunakan pada penelitian ini disajikan pada Tabel 4.1.

Tabel 4.1 *Rule base fuzzy*

Suhu	Kelembaban					
	kering		sedang		basah	
	Pemanas	Blower	Pemanas	Blower	Pemanas	Blower
Dingin	ON	OFF	ON	ON	ON	ON
Sedang	OFF	OFF	OFF	ON	ON	ON
Panas	OFF	OFF	OFF	ON	OFF	ON

3. Defuzzifikasi

Defuzzifikasi merupakan tahap akhir dalam metode *Fuzzy Logic* yang mengubah hasil inferensi menjadi nilai tegas (*crisp output*) sebagai dasar pengambilan keputusan sistem. Pada penelitian ini, nilai keluaran diperoleh melalui proses normalisasi terhadap *heater score* dan *fan score* yang dihitung berdasarkan derajat keanggotaan masing-masing variabel. Nilai tersebut kemudian dibandingkan dengan batas keputusan (*threshold*) untuk menentukan kondisi relay pemanas dan blower dalam keadaan ON atau OFF. Mekanisme ini bertujuan mengurangi perubahan status relay yang terlalu sering sehingga sistem bekerja lebih stabil selama proses pengeringan. Menurut Martinez *et al.* (2025), hasil defuzzifikasi digunakan sebagai dasar pengambilan keputusan aktuator pada sistem pengering berbasis *Fuzzy Logic*.

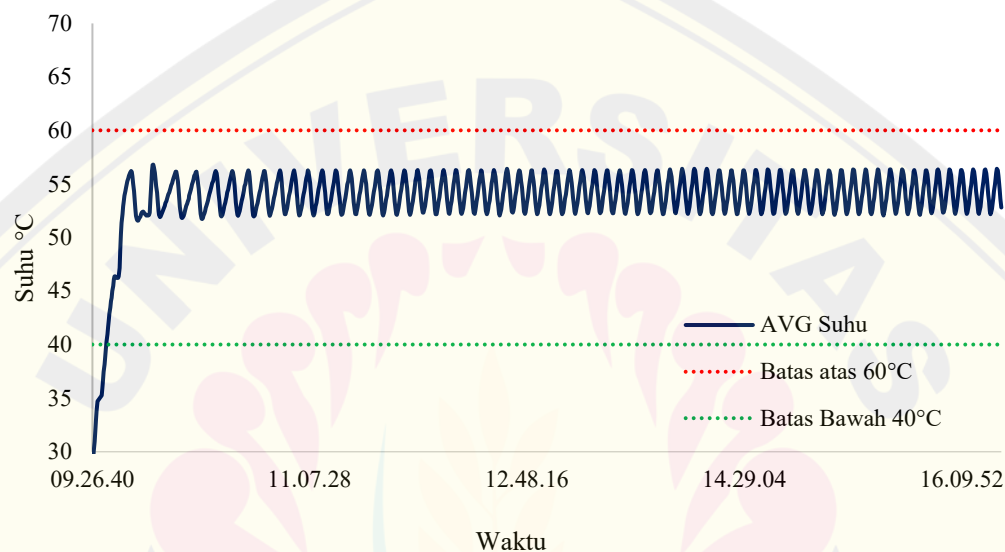
4.2 Hasil Monitoring Pengeringan Buah Kopi

Pengujian sistem dilakukan selama 6 jam menggunakan sampel buah kopi sebanyak 100 gram dan 1.000 gram untuk mengevaluasi kinerja sistem kontrol berbasis *Fuzzy Logic*. Parameter yang diamati meliputi suhu ruang pengering,

kelembapan relatif, status relay pemanas, dan status relay blower. Seluruh data diperoleh secara otomatis dari dua sensor DHT22 yang diproses oleh mikrokontroler ESP32 selama proses pengeringan.

4.2.1 Monitoring Suhu Mesin Pengering

Gambar 4.5 adalah grafik perubahan suhu ruang pengering selama proses pengeringan.



Gambar 4.5 Grafik suhu mesin pengering

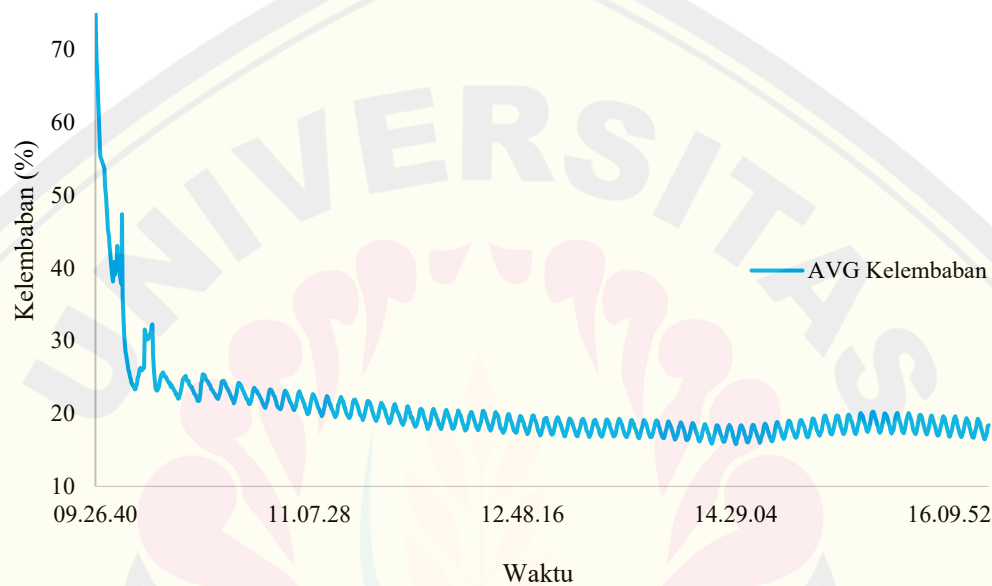
Berdasarkan Gambar 4.4, suhu ruang pengering mengalami kenaikan pada awal proses pengeringan, kemudian berfluktuasi secara periodik hingga mencapai kondisi yang relatif stabil. Berdasarkan Tabel 4.2, suhu minimum yang tercatat sebesar 28,50°C, suhu rata-rata 53,75°C, dan suhu maksimum 56,80°C. Hasil tersebut menunjukkan bahwa sistem kontrol berbasis *Fuzzy Logic* mampu mempertahankan suhu pengering pada rentang operasi yang direncanakan, yaitu 40–60°C. Kondisi ini menunjukkan bahwa sistem *Fuzzy Logic* mampu menghasilkan keputusan pengendalian berdasarkan perubahan suhu yang terukur, sehingga kestabilan kondisi pengering selama proses dapat dipertahankan. Hasil tersebut sejalan dengan penelitian Pei *et al.* (2022) yang menyatakan bahwa penerapan *Fuzzy Logic* pada sistem pengering inframerah dapat meningkatkan kestabilan pengendalian suhu dan efisiensi proses pengeringan. Tabel 4.2 adalah hasil pengukuran suhu ruang pengering selama proses pengujian.

Tabel 4.2 Suhu pengering

No	Suhu Minimal (°C)	Suhu Rata - Rata (°C)	Suhu Maksimal (°C)
1	28,50	53,75	56,80

4.2.2 Hasil Monitoring Kelembaban Pengeringan

Gambar 4.6 adalah grafik perubahan kelembaban di dalam ruang pengering selama proses pengeringan berlangsung.



Gambar 4.6 Grafik kelembaban mesin pengering

Gambar 4.5 menunjukkan perubahan kelembaban relatif selama proses pengeringan. Berdasarkan Tabel 4.3, kelembaban minimum yang tercatat sebesar 15,80%RH, kelembaban rata-rata sebesar 20,39%RH, dan kelembaban maksimum sebesar 76,40%RH. Selama proses pengeringan, kelembaban ruang pengering cenderung mengalami penurunan dibandingkan kondisi awal, yang menunjukkan bahwa proses penguapan air dari buah kopi berlangsung secara bertahap. Penurunan kelembaban tersebut mengindikasikan bahwa perpindahan massa dari bahan ke lingkungan berlangsung dengan baik sehingga proses pengeringan dapat berlangsung. Hasil penelitian ini sejalan dengan Silva *et al.* (2022) yang menjelaskan bahwa selama proses pengeringan terjadi pengurangan kadar air akibat perpindahan panas dan massa, sehingga kelembaban menurun secara bertahap hingga mencapai kondisi yang sesuai untuk penyimpanan dan pengolahan lebih

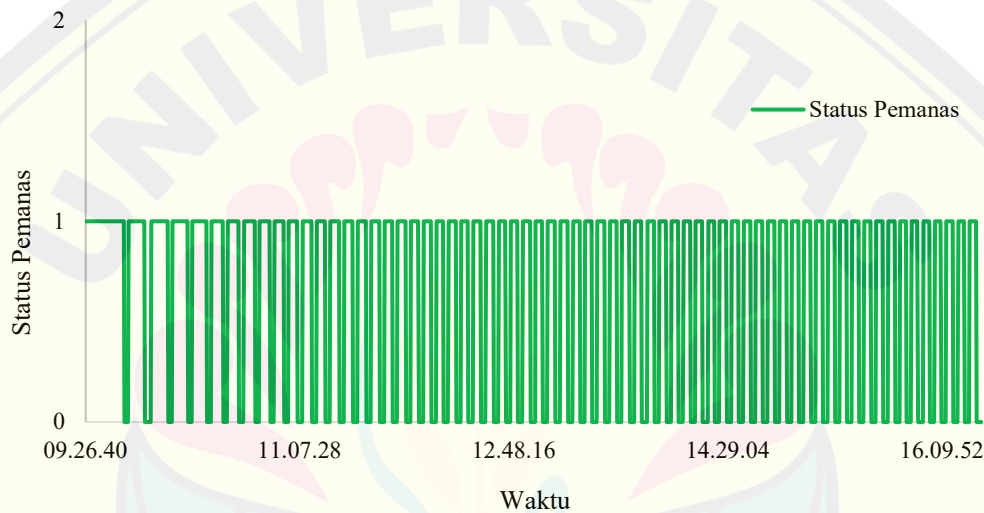
lanjut. Tabel 4.3 adalah hasil pengukuran kelembaban ruang pengering selama proses pengujian.

Tabel 4.3 Kelembaban pengering

No	Kelembaban Minimal (%)	Kelembaban Rata - Rata (%)	Kelembaban Maksimal (%)
1	15,80	20,39	76,40

4.2.3 Hasil Monitoring Status Pemanas

Gambar 4.7 adalah grafik perubahan status pemanas inframerah selama proses pengeringan.

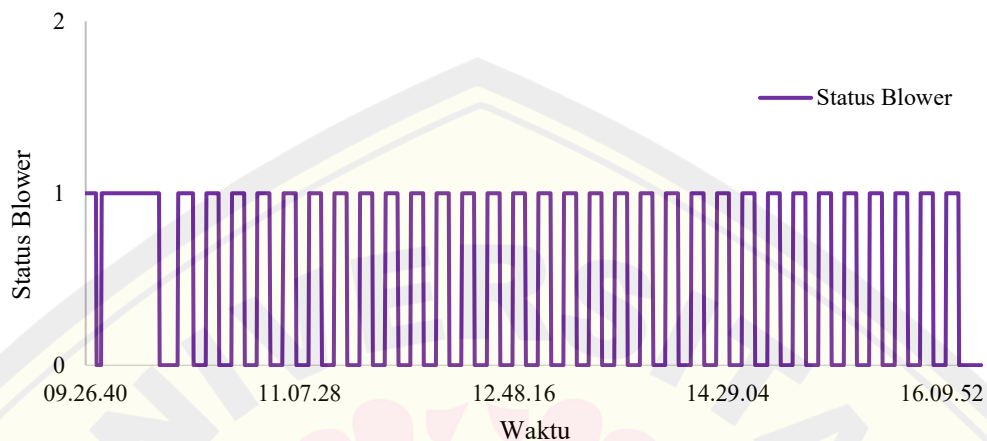


Gambar 4.7 Status pemanas

Berdasarkan Gambar 4.6, relay pemanas bekerja secara ON/OFF mengikuti hasil keputusan sistem *Fuzzy Logic*. Pemanas aktif ketika suhu mulai turun mendekati batas bawah dan akan mati ketika suhu mendekati batas atas. Pola kerja ini menunjukkan bahwa sistem tidak bekerja secara terus-menerus, tetapi mengaktifkan dan menonaktifkan pemanas sesuai perubahan suhu ruang pengering sehingga suhu tetap berada pada rentang yang telah ditentukan. Menurut Pei *et al.* (2022), keputusan pengendalian pada metode *Fuzzy Logic* diperoleh melalui proses fuzzifikasi, inferensi, dan defuzzifikasi sehingga aktuator bekerja sesuai perubahan kondisi suhu yang terdeteksi selama proses pengeringan.

4.2.4 Hasil Monitoring Status Blower

Gambar 4.8 adalah grafik perubahan status blower selama proses pengeringan.



Gambar 4.8 Status blower

Gambar 4.7 menunjukkan bahwa relay blower juga bekerja secara otomatis dengan pola ON/OFF. Blower diaktifkan untuk membantu sirkulasi udara dan membuang uap air yang terbentuk selama proses pengeringan. Ketika kelembaban ruang pengering menurun, blower akan dimatikan sesuai hasil inferensi *Fuzzy Logic*. Pola kerja tersebut menunjukkan bahwa sistem mampu beradaptasi terhadap perubahan kelembaban selama proses pengeringan berlangsung (Pei *et al.*, 2022).

4.3 Hasil Pengeringan Buah Kopi

Pengujian dilakukan untuk mengetahui hasil pengeringan buah kopi menggunakan sistem pengering inframerah berbasis *Fuzzy Logic*. Pengujian menggunakan dua variasi massa sampel, yaitu 100 gram dan 1.000 gram. Selama proses pengeringan, suhu ruang pengering dipertahankan pada rentang 40–60°C dengan target kelembapan relatif (RH) di bawah 40%. Parameter yang diamati meliputi berat awal, berat akhir, susut bobot, dan kadar air akhir setelah pengeringan selama 6 jam. Hasil pengujian disajikan pada Tabel 4.4.

Tabel 4.4 Hasil pengeringan buah kopi

Sampel	Berat Awal (Gram)	Berat Akhir (Gram)	Susut Bobot (%)	Kadar Air Akhir (%)
Uji 1	100	53	47,0	19,4
Uji 2	1000	529	47,1	19,9

Selama proses pengeringan, sistem kontrol berbasis *Fuzzy Logic* yang dijalankan oleh mikrokontroler ESP32 mengendalikan pemanas inframerah dan blower berdasarkan pembacaan dua sensor DHT22. Sistem mampu mempertahankan suhu ruang pengering pada rentang pengendalian 40–60°C dengan suhu rata-rata sebesar 53,75°C dan kelembapan relatif (RH) rata-rata sebesar 20,39%. Kondisi tersebut mendukung terjadinya evaporasi air yang ditunjukkan oleh penurunan massa buah kopi selama proses pengeringan. Pada sampel 100 gram diperoleh berat akhir sebesar 53 gram dengan susut bobot 47,0%, sedangkan pada sampel 1.000 gram diperoleh berat akhir sebesar 529 gram dengan susut bobot 47,1%. Menurut Wang *et al.* (2024), radiasi inframerah menghantarkan energi panas secara langsung ke permukaan bahan sehingga mempercepat proses evaporasi air dan meningkatkan efisiensi pengeringan. Sejalan dengan hal tersebut, hasil penelitian ini menunjukkan bahwa pengendalian suhu yang stabil selama proses pengeringan mampu menghasilkan penurunan massa yang relatif seragam pada kedua variasi massa.

Ditinjau dari kadar air akhir, hasil pengukuran menggunakan *moisture meter* Kett PM-600 menunjukkan nilai sebesar 19,4% pada sampel 100 gram dan 19,9% pada sampel 1.000 gram. Hasil ini menunjukkan bahwa kedua variasi massa menghasilkan kadar air akhir yang tidak berbeda jauh setelah proses pengeringan selama 6 jam. Kadar air akhir yang masih berada di atas standar menunjukkan bahwa durasi pengeringan selama 6 jam belum cukup untuk menghasilkan kopi beras (*green coffee bean*) dengan kadar air yang memenuhi persyaratan penyimpanan (maksimum 12,5% sesuai SNI 2907:2020). Kadar air yang rendah berperan penting dalam menghambat pertumbuhan mikroorganisme dan mempertahankan mutu kopi selama penyimpanan (Silva *et al.*, 2022), sehingga kadar air yang diperoleh pada penelitian ini masih memerlukan penurunan lebih lanjut. Hasil penelitian Nafisah *et al.* (2024), menunjukkan bahwa sistem pengering berbasis *Fuzzy Logic* mampu mencapai kadar air akhir sekitar 12%, sehingga kadar air 19,4–19,9% yang diperoleh mengindikasikan perlunya penambahan waktu pengeringan atau penyesuaian parameter operasi.

Secara keseluruhan, hasil pengujian ini menunjukkan bahwa prototipe sistem pengering inframerah berbasis *Fuzzy Logic* yang terintegrasi dengan pemantauan *IoT* ThingSpeak dapat beroperasi secara otomatis sesuai rancangan. Meskipun kelembapan relatif (RH) ruang pengering telah dipertahankan pada rata-rata 20,39%, proses perpindahan air dari bagian dalam buah kopi menuju permukaan masih berlangsung secara bertahap. Oleh karena itu, durasi pengeringan selama 6 jam belum cukup untuk mencapai kadar air penyimpanan kopi beras menurut SNI 2907:2020. Pada penelitian selanjutnya, diperlukan penambahan waktu pengeringan atau optimasi parameter kendali agar kadar air dapat mencapai standar yang dipersyaratkan.

