

BAB V

PENGUJIAN DAN ANALISA ALAT

5.1 Prosedur Pengujian

Pengujian dilakukan untuk mengetahui kinerja prototipe alat pengering biji kopi Robusta berbasis ESP32 dengan kontrol suhu otomatis dan pemantauan secara *real-time* yang telah dirancang dan dibangun. Aspek yang dievaluasi meliputi kesesuaian pembacaan suhu antara tampilan lokal pada layar OLED dan data yang diterima oleh platform Blynk, kinerja sistem kendali PID dalam mempertahankan suhu pada nilai *setpoint* yang ditentukan, keberhasilan pencatatan data pada Blynk dan Google Sheets, perubahan kadar air biji kopi selama proses pengeringan, serta perbandingan hasil pengeringan menggunakan oven dengan pengeringan secara konvensional.

Prosedur pengujian dilakukan secara bertahap agar setiap bagian sistem dapat diperiksa secara terpisah sebelum dilakukan pengujian sistem secara terintegrasi. Pengujian pengeringan menggunakan oven dilaksanakan dengan koneksi internet yang aktif untuk keperluan pengiriman data ke Blynk dan Google Sheets. Pengujian pengeringan konvensional dilaksanakan di area terbuka dengan kondisi cuaca yang dicatat selama proses berlangsung.

Alat dan bahan yang digunakan selama proses pengujian adalah sebagai berikut:

1. Prototipe alat pengering (ESP32 DOIT DevKit V1 + sensor SHT30 + SSR FOTEK SSR-25DAH + OLED SH1106 + joystick KY-023 + HLK-PM01).
2. Oven listrik Samono SW-EOG12 yang telah dimodifikasi sebagai ruang pengering.
3. Biji kopi Robusta yang telah melalui proses *pulping* dan perendaman dalam air tanpa oksigen.
4. Timbangan digital dengan ketelitian 0.1 gram untuk pengukuran berat sampel.
5. Wadah untuk skenario pengeringan konvensional.
6. *Smartphone* untuk mengakses *dashboard* Blynk dan dokumentasi.
7. Laptop untuk mengakses Google Sheets.

8. Laptop dengan Visual Studio Code dan PlatformIO untuk proses pengunggahan program ke ESP32 (dilakukan sebelum pengujian dimulai)
9. Jaringan WiFi aktif untuk koneksi internet pada ESP32.

Oven yang digunakan pada pengujian ini telah mengalami modifikasi dari kondisi aslinya. Pengaturan suhu dan *timer* bawaan oven tidak digunakan, dan sebagai gantinya pengendalian suhu dilakukan sepenuhnya oleh sistem kendali PID melalui ESP32 dan SSR. Elemen pemanas oven dihubungkan ke jaringan listrik 220V AC melalui SSR yang dikendalikan oleh ESP32 berdasarkan keluaran algoritma PID.

Sebelum pengujian dimulai, dilakukan persiapan yang berbeda sesuai dengan skenario yang akan dijalankan. Pada skenario pengeringan menggunakan oven, persiapan dilakukan dengan langkah-langkah sebagai berikut:

1. Menimbang berat awal sampel biji kopi dalam kondisi *full washed* dan telah melalui proses *pulping* menggunakan timbangan digital dan mencatat hasilnya.
2. Memasukkan sampel biji kopi ke dalam oven yang telah dimodifikasi.
3. Memastikan jaringan WiFi dalam keadaan aktif dan dapat dijangkau oleh ESP32.
4. Menghubungkan sistem ke sumber tegangan AC 220 V sehingga ESP32 melakukan inisialisasi secara otomatis terhadap sensor SHT30, layar OLED, koneksi WiFi, dan platform Blynk.
5. Memastikan koneksi WiFi berhasil terhubung, yang ditandai dengan munculnya indikator "W" pada layar OLED.
6. Membuka Google Sheets melalui laptop atau *smartphone* dan memastikan data suhu serta kelembapan mulai tercatat pada spreadsheet.
7. Menekan tombol pada joystick untuk mengaktifkan sistem kendali, sehingga proses pengeringan dimulai pada *setpoint* 65°C dengan parameter kendali Kp 1,5, Ki sebesar 0, dan Kd sebesar 0,7.
8. Selama proses pengeringan berlangsung, sistem kendali PID mengatur kerja elemen pemanas secara otomatis melalui SSR berdasarkan pembacaan suhu dari sensor SHT30. Proses pengeringan terus berjalan selama nilai kelembapan di dalam ruang pengering belum mencapai target sebesar 20%. Apabila

kelembapan telah menyentuh 20%, sistem secara otomatis menghentikan proses pemanasan.

9. Pada interval waktu tertentu selama proses pengeringan, sampel biji kopi dikeluarkan dari oven untuk ditimbang. Apabila berat sampel belum mencapai target yang ditentukan, sampel dimasukkan kembali ke dalam oven dan proses pengeringan dilanjutkan.
10. Proses pengujian dinyatakan selesai apabila kelembapan telah mencapai target 20% atau berat sampel telah mencapai berat akhir yang diharapkan.

Pada skenario pengeringan konvensional, pengujian dilakukan dengan langkah-langkah sebagai berikut:

1. Mengambil sampel biji kopi sebanyak 400 gram yang telah melalui proses *full washed*.
2. Menimbang berat awal sampel menggunakan timbangan digital dan mencatat hasilnya.
3. Menempatkan sampel biji kopi ke dalam wadah *thinwall* sebagai alas penjemuran.
4. Menjemur sampel di area terbuka yang mendapat paparan sinar matahari secara langsung.
5. Melakukan penimbangan berat sampel setiap hari untuk mengetahui penyusutan berat yang terjadi selama proses penjemuran berlangsung.
6. Proses penjemuran dinyatakan selesai apabila berat sampel telah mencapai berat akhir yang ditargetkan

Parameter yang diamati pada keseluruhan pengujian ditunjukkan pada Tabel 5-1.

Tabel 5-1 Parameter Pengujian

Parameter	Satuan	Metode Pengukuran	Keterangan
Suhu	°C	Pembacaan sensor SHT30	Parameter utama kendali PID
Kelembapan relatif	% RH	Pembacaan sensor SHT30	Parameter pemantauan kondisi ruang pengering

Duty cycle	%	Perhitungan keluaran PID	Indikator kerja sistem kendali
Kesesuaian suhu OLED dan Blynk	-	Perbandingan tampilan OLED dengan data Blynk	Validasi konsistensi data
Berat sampel	gram	Penimbangan menggunakan timbangan digital	Penentuan kadar air
Kadar air	%	Perhitungan berdasarkan susut berat	Indikator hasil pengeringan
Waktu pengeringan	menit/jam	Pencatatan durasi dari awal hingga akhir proses	Perbandingan antar skenario

Pengujian proses pengeringan dilakukan dengan dua skenario. Skenario pertama adalah pengeringan menggunakan oven pada *setpoint* 65°C dengan parameter kendali Kp sebesar 1,5, Ki sebesar 0, dan Kd sebesar 0,7. Skenario kedua adalah pengeringan secara konvensional dengan menjemur biji kopi di area terbuka tanpa bantuan alat pengering. Ringkasan skenario pengujian disajikan pada Tabel 5-2.

Tabel 5-2 Skenario Pengujian

No	Skenario	Metode	<i>Setpoint</i>	Parameter PID	Pencatatan Data
1	Pengeringan oven	Sistem kendali PID otomatis	65°C	Kp=1,5; Ki=0; Kd=0,7	Otomatis (Blynk dan Google Sheets)
2	Pengeringan konvensional	Penjemuran di area terbuka	Tidak ada	Tidak ada	Manual

Rumus yang digunakan untuk menghitung kadar air biji kopi berdasarkan metode gravimetri adalah sebagai berikut:

$$\text{Kadar Air (\%)} = \frac{(\text{Berat Awal} - \text{Berat Akhir})}{(\text{Berat Awal})} \times 100\%$$

Data hasil pengujian kemudian digunakan untuk mengevaluasi kinerja sistem kendali PID, konsistensi pencatatan data, perubahan kadar air, serta perbandingan hasil pengeringan dengan metode konvensional.

5.2 Pengujian Kesesuaian Pembacaan Suhu pada Blynk dan OLED

Pengujian ini dilakukan untuk memastikan bahwa data suhu dan kelembapan yang ditampilkan pada layar OLED sesuai dengan data yang diterima oleh platform Blynk. Kesesuaian antara kedua tampilan ini penting untuk menjamin bahwa data yang dipantau secara jarak jauh melalui Blynk merepresentasikan kondisi aktual di dalam ruang pengering.

Besarnya selisih pembacaan dihitung menggunakan persamaan:

$$\Delta T = |T_{\text{OLED}} - T_{\text{Blynk}}|$$

Dengan:

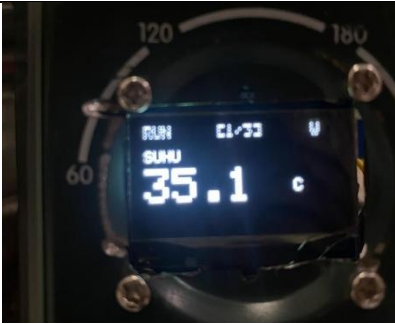
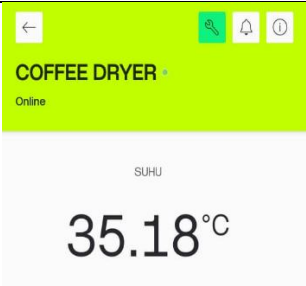
ΔT = selisih pembacaan suhu

T_{OLED} = suhu yang ditampilkan pada OLED

T_{Blynk} = suhu yang ditampilkan pada Blynk

Pengujian dilakukan dengan membandingkan nilai suhu yang ditampilkan pada layar OLED dan nilai suhu yang ditampilkan pada *dashboard* Blynk secara bersamaan pada beberapa titik pengamatan. Pada setiap titik pengamatan, tampilan layar OLED difoto dan tampilan *dashboard* Blynk di-*screenshot* pada waktu yang bersamaan. Hasil perbandingan pembacaan suhu antara OLED dan Blynk disajikan pada Tabel 5-3.

Tabel 5-3 Hasil Pengujian Kesesuaian Pembacaan Suhu

No	Suhu di OLED (°C)	Suhu di Blynk (°C)	Selisih (°C)	Status
1			0,01	Sesuai
2			0,00	Sesuai
3			0,00	Sesuai
4			0,08	Sesuai
5			0,00	Sesuai

Berdasarkan hasil pengujian pada Tabel 5-3, nilai suhu yang ditampilkan pada OLED dan Blynk memiliki selisih yang sangat kecil pada seluruh titik

pengamatan. Selisih terbesar terdapat pada pengujian keempat, yaitu sebesar **0,08** °C, sedangkan pada pengujian kedua, ketiga, dan kelima tidak terdapat selisih pada angka yang ditampilkan.

Pada pengujian pertama, OLED menampilkan suhu sebesar 28,20 °C, sedangkan Blynk menampilkan 28,21 °C. Berdasarkan perhitungan:

$$\begin{aligned}\Delta T &= |28,20 - 28,21| \\ &= 0,01\text{ }^{\circ}\text{C}\end{aligned}$$

Perbedaan tersebut sangat kecil dan masih menunjukkan kesesuaian antara kedua tampilan. Perbedaan nilai desimal seperti ini dapat terjadi karena format atau pembulatan nilai yang ditampilkan pada masing-masing antarmuka.

Pada pengujian keempat, OLED menunjukkan suhu 35,10 °C dan Blynk menunjukkan 35,18 °C. Selisih kedua nilai tersebut adalah:

$$\begin{aligned}\Delta T &= |35,10 - 35,18| \\ &= 0,08\text{ }^{\circ}\text{C}\end{aligned}$$

Nilai tersebut merupakan selisih terbesar dari lima titik pengamatan. Meskipun demikian, perbedaannya tetap relatif kecil sehingga nilai suhu yang ditampilkan pada Blynk masih merepresentasikan pembacaan suhu yang ditampilkan pada OLED.

Secara keseluruhan, nilai suhu pada Blynk mengikuti perubahan nilai suhu pada OLED pada seluruh titik pengujian. Nilai yang ditampilkan juga tidak menunjukkan perbedaan yang besar antara kedua media. Dengan demikian, hasil pengujian menunjukkan bahwa data suhu yang dikirimkan oleh ESP32 ke Blynk dapat ditampilkan secara konsisten dengan data suhu yang ditampilkan pada OLED.

5.3 Pengujian Pembacaan Data pada Google Spreadsheets

Pengujian pencatatan data pada Google Sheets dilakukan untuk mengetahui kemampuan sistem dalam merekam data hasil pembacaan sensor secara otomatis selama proses pengeringan. Data dikirimkan oleh ESP32 melalui koneksi Wi-Fi menuju Google Apps Script dan selanjutnya dicatat pada Google Sheets. Parameter yang direkam meliputi tanggal, waktu, suhu, dan kelembapan relatif (RH), dengan interval pencatatan setiap 60 detik.

	A	B	C	D	E
1	tanggal	waktu	suhu	kelembapan	
2	2026-07-30	23:36:07	28.20	93.0	
3	2026-07-30	23:37:07	28.28	93.7	
4	2026-07-30	23:38:07	29.64	97.9	
5	2026-07-30	23:39:07	33.67	99.0	
6	2026-07-30	23:40:07	40.11	99.3	
7	2026-07-30	23:41:07	47.83	99.3	
8	2026-07-30	23:42:07	54.02	99.0	
9	2026-07-30	23:43:07	57.25	98.6	
10	2026-07-30	23:44:07	60.53	98.5	
11	2026-07-30	23:45:07	62.60	99.2	
12	2026-07-30	23:46:07	64.98	78.9	
13	2026-07-30	23:47:07	66.42	69.4	
14	2026-07-30	23:48:07	67.00	64.2	
15	2026-07-30	23:49:07	67.00	60.8	
16	2026-07-30	23:50:07	66.60	58.8	

Gambar 5.1 Data Hasil Pencatatan pada Google Sheets

Berdasarkan Gambar 5.1, hasil pembacaan sensor berhasil dicatat pada Google Sheets secara berurutan berdasarkan waktu pengukuran. Pada data yang ditampilkan, pencatatan dimulai pada pukul 23:36:07 dan dilanjutkan setiap satu menit, yaitu 23:37:07, 23:38:07, 23:39:07, dan seterusnya. Setiap pencatatan memuat nilai suhu dan RH yang diperoleh dari sensor SHT30 serta tanggal dan waktu pengukuran.

Pada awal proses, suhu tercatat sebesar 28,20°C dengan RH sebesar 93,0%. Seiring berlangsungnya pemanasan, suhu mengalami peningkatan hingga mendekati *setpoint* 65°C. Suhu tercatat sebesar 60,53°C pada pukul 23:44:07, kemudian meningkat menjadi 62,60°C pada pukul 23:45:07 dan 64,98°C pada pukul 23:46:07. Suhu selanjutnya mencapai 67,00°C pada pukul 23:48:07. Data tersebut menunjukkan bahwa pencatatan Google Sheets mampu merekam perubahan suhu selama proses pemanasan secara berurutan.

Perubahan RH juga tercatat selama proses berlangsung. Nilai RH pada awal pengujian sebesar 93,0% kemudian meningkat hingga 99,3% pada tahap awal pemanasan. Setelah suhu mendekati *setpoint*, nilai RH mulai menurun dan tercatat sebesar 78,9% pada saat suhu mencapai 64,98°C, kemudian menjadi 69,4% pada

suhu 66,42°C dan 60,8% pada suhu 67,00°C. Perubahan tersebut menunjukkan bahwa data yang tersimpan dapat digunakan untuk mengamati perubahan kondisi suhu dan kelembapan ruang pengering terhadap waktu.

Data yang tersimpan pada Google Sheets selanjutnya digunakan sebagai data pengujian dan analisis, khususnya dalam pengujian kendali PID. Data dengan interval 60 detik digunakan untuk menentukan karakteristik respons suhu terhadap *setpoint*, seperti *rise time*, *overshoot*, dan *settling time*.

Berdasarkan hasil pengujian, pencatatan data pada Google Sheets dapat berjalan secara otomatis dan tersusun secara kronologis selama sistem melakukan pengiriman data. Keberadaan tanggal dan waktu pada setiap pencatatan memungkinkan perubahan suhu dan RH ditelusuri berdasarkan waktu pengukuran. Dengan demikian, Google Sheets dapat digunakan sebagai media *data logging* yang mendukung dokumentasi sekaligus analisis hasil pengujian sistem pengering

5.4 Pengujian Awal Oven Sebelum Modifikasi

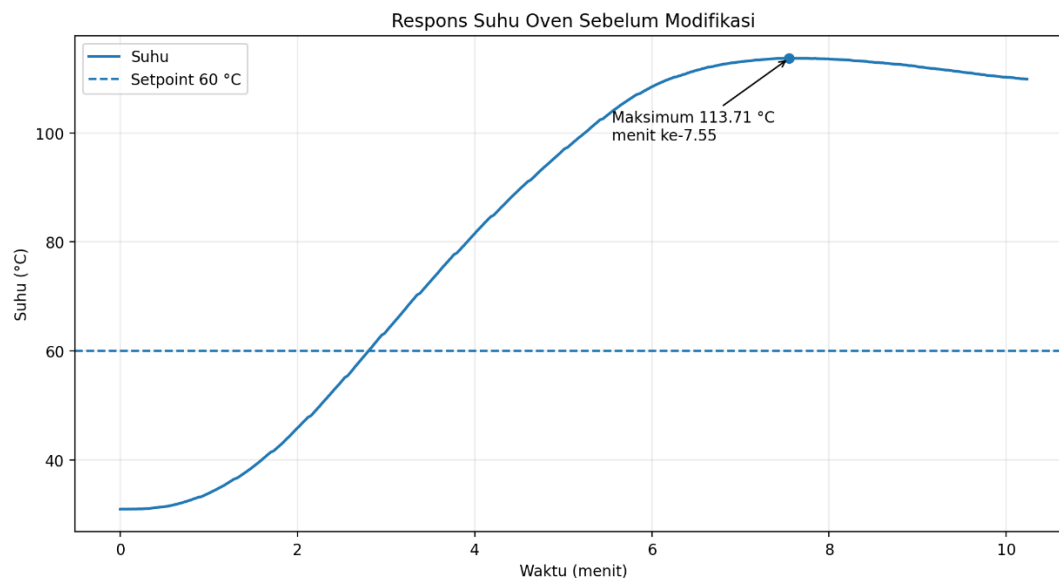
Pengujian awal dilakukan pada oven listrik Samono SW-EOG12 sebelum dilakukan modifikasi pada sistem kendali. Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui karakteristik perubahan suhu oven ketika dioperasikan menggunakan sistem kendali bawaan. Pada pengujian ini, suhu oven diatur pada 60 °C dengan durasi pengoperasian selama 10 menit. Perubahan suhu selama proses pemanasan dicatat secara berkala sehingga dapat diamati kemampuan oven dalam mencapai dan mempertahankan suhu yang telah ditentukan.

Pada awal pengujian, suhu yang terukur sebesar 30,94 °C pada pukul 17:35:11. Setelah oven dioperasikan, suhu mengalami peningkatan secara bertahap. Pada menit pertama suhu tercatat sebesar 33,88 °C, kemudian meningkat menjadi 45,86 °C pada menit kedua. Peningkatan suhu semakin terlihat pada menit-menit berikutnya, yaitu sebesar 63,53 °C pada menit ketiga, 81,49 °C pada menit keempat, dan 96,87 °C pada menit kelima. Data tersebut menunjukkan bahwa proses pemanasan berlangsung secara terus-menerus setelah oven dioperasikan. Data pencatatan awal juga menunjukkan kenaikan suhu dari sekitar 31 °C menuju 32 °C sebelum proses pemanasan berlanjut secara lebih signifikan.

Tabel 5-4 Data Suhu Oven Sebelum Modifikasi

Waktu relatif (menit)	Waktu pencatatan	Suhu (°C)	Keterangan
0	17:35:11	30,94	Kondisi awal pengujian
1	17:36:11	33,88	Suhu mulai meningkat
2	17:37:11	45,86	Proses pemanasan berlangsung
3	17:38:11	63,53	Suhu telah melewati 60 °C
4	17:39:11	81,49	Suhu terus meningkat
5	17:40:11	96,87	Suhu semakin jauh di atas 60 °C
6	17:41:11	108,47	Suhu terus mengalami peningkatan
7	17:42:11	113,04	Suhu mendekati nilai maksimum
8	17:43:11	113,57	Suhu masih berada di atas 60 °C
9	17:44:11	112,17	Suhu mulai mengalami penurunan
10	17:45:11	110,24	Suhu akhir pengamatan

Berdasarkan Tabel 5-4, suhu mengalami peningkatan sejak awal pengujian. Suhu awal sebesar 30,94 °C meningkat menjadi 33,88 °C pada menit pertama dan 45,86 °C pada menit kedua. Nilai suhu kemudian mencapai 60,29 °C pada pukul 17:38:00, atau sekitar 2 menit 49 detik setelah pencatatan dimulai. Pencapaian suhu tersebut menunjukkan bahwa oven mampu mencapai nilai pengaturan 60 °C dalam waktu kurang dari tiga menit. Namun, setelah suhu mencapai nilai tersebut, temperatur masih terus mengalami peningkatan dan tidak bertahan di sekitar 60 °C



Gambar 5.2 Grafik Perubahan Suhu Oven Sebelum Modifikasi

Berdasarkan Gambar 5.2, kenaikan suhu terus berlangsung setelah suhu mencapai nilai pengaturan 60 °C. Suhu meningkat menjadi 81,49 °C pada menit keempat, 96,87 °C pada menit kelima, dan 108,47 °C pada menit keenam. Suhu kemudian mencapai 113,71 °C pada pukul 17:42:44, atau sekitar menit ke-7,55, yang merupakan suhu tertinggi selama pengujian. Nilai tersebut menunjukkan bahwa suhu aktual mencapai 53,71 °C di atas suhu pengaturan 60 °C. Setelah mencapai nilai maksimum, suhu mulai mengalami penurunan, tetapi penurunannya berlangsung secara perlahan. Pada menit ke-8 suhu masih sebesar 113,57 °C, kemudian menjadi 112,17 °C pada menit ke-9 dan 110,24 °C pada menit ke-10

Untuk memberikan gambaran yang lebih ringkas mengenai hasil pengujian, parameter utama pengujian disajikan pada Tabel 5-5.

Tabel 5-5 Ringkasan Hasil Pengujian Awal Oven

No	Parameter	Hasil
1	Suhu pengaturan	60 °C
2	Suhu awal	30,94 °C
3	Waktu mencapai 60 °C	2 menit 49 detik
4	Suhu maksimum	113,71 °C
5	Waktu suhu maksimum	7 menit 33 detik
6	Suhu pada menit ke-10	110,24 °C
7	Selisih suhu maksimum terhadap pengaturan	53,71 °C
8	Selisih suhu akhir terhadap pengaturan	50,24 °C

Hasil pengujian pada Tabel 5-5 menunjukkan bahwa kendali bawaan oven mampu meningkatkan temperatur hingga mencapai suhu pengaturan, tetapi belum mampu mempertahankan temperatur pada nilai tersebut. Setelah suhu mencapai 60 °C, temperatur terus meningkat hingga mencapai 113,71 °C. Bahkan setelah durasi pengujian mencapai 10 menit, suhu masih berada pada 110,24 °C atau 50,24 °C lebih tinggi dibandingkan suhu pengaturan. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa perubahan temperatur selama pengujian tidak berada di sekitar nilai 60 °C secara stabil.

Karakteristik tersebut menjadi permasalahan apabila oven digunakan untuk proses pengeringan biji kopi yang membutuhkan kondisi temperatur yang terkendali selama durasi pengeringan. Pengaturan suhu pada kendali bawaan belum menghasilkan kemampuan untuk mempertahankan suhu pada nilai yang diinginkan selama proses berlangsung. Selain itu, dari data pengujian terlihat bahwa setelah suhu mencapai nilai pengaturan, temperatur masih mengalami kenaikan yang cukup besar sebelum akhirnya mulai menurun. Oleh karena itu, kendali bawaan oven belum sesuai dengan kebutuhan pengeringan yang memerlukan pengaturan suhu secara kontinu dan stabil.

Hasil pengujian awal tersebut selanjutnya menjadi dasar dilakukannya modifikasi sistem kendali oven. Sistem kendali bawaan kemudian digantikan dengan sistem kendali berbasis ESP32, sensor suhu, dan SSR menggunakan metode

PID. Modifikasi tersebut ditujukan agar proses pemanasan dapat dikendalikan berdasarkan suhu aktual yang terbaca oleh sensor, sehingga suhu dapat diarahkan untuk mencapai dan dipertahankan di sekitar setpoint yang ditentukan selama proses pengeringan.

5.5 Pengujian Sistem Kendali PD pada *Setpoint* 65°C

Pengujian sistem kendali dilakukan untuk mengetahui kemampuan sistem dalam mengatur suhu ruang pengering pada *setpoint* 65 °C sekaligus mengamati perubahan kelembapan relatif selama proses pengeringan. Pengujian dilakukan menggunakan prototipe pengering biji kopi Robusta yang telah dimodifikasi dengan ESP32 sebagai pengendali, sensor SHT30 sebagai pembaca suhu dan kelembapan, serta SSR sebagai pengendali elemen pemanas. Data hasil pembacaan sensor dicatat setiap satu menit dan digunakan sebagai dasar untuk menganalisis respons sistem kendali.

Pemilihan suhu 65 °C dilakukan sebagai kondisi operasi pengujian sistem pengering. Suhu ruang pengering dijaga di sekitar nilai tersebut agar proses pengurangan kadar air pada biji kopi dapat berlangsung dengan pengendalian temperatur yang lebih teratur dibandingkan pengeringan yang hanya bergantung pada kondisi lingkungan. Dalam proses pengeringan biji kopi, pengurangan air berlangsung secara bertahap sehingga selain suhu, perubahan kelembapan relatif ruang pengering juga diamati selama pengujian.

Pada pengujian ini digunakan parameter kendali $K_p = 1,5$, $K_i = 0$, dan $K_d = 0,7$. Komponen integral tidak digunakan karena pada pengaturan awal sistem, penggunaan komponen integral dapat menyebabkan akumulasi nilai integral ketika selisih suhu pada fase awal pemanasan masih besar. Kondisi tersebut berpotensi menghasilkan *integral windup* dan menyebabkan keluaran kendali tetap tinggi ketika suhu telah mendekati *setpoint*. Oleh karena itu, nilai K_i ditetapkan sebesar nol sehingga pengendalian yang aktif terdiri atas komponen proporsional dan derivatif. Pemilihan tersebut juga sesuai dengan konfigurasi parameter pengendali yang digunakan pada sistem.

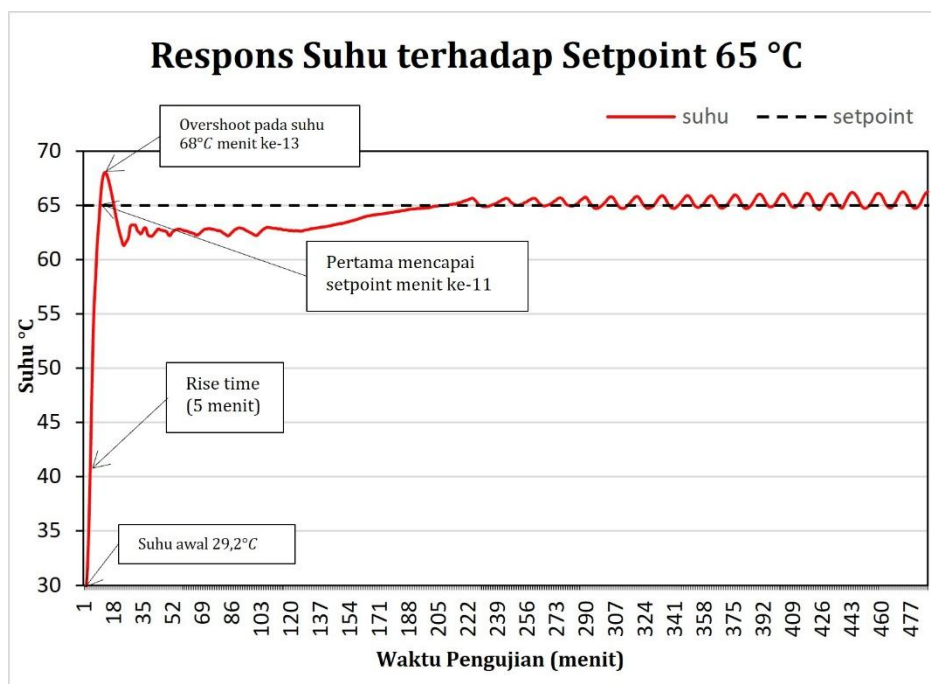
Pada pengujian ini, nilai $K_p = 1,5$ dan $K_d = 0,7$, sehingga respons sistem terhadap perubahan suhu ditentukan oleh besar *error* dan perubahan *error* terhadap waktu. Komponen proporsional memberikan respons berdasarkan selisih antara suhu aktual dan *setpoint*, sedangkan komponen derivatif memberikan respons terhadap perubahan *error* sehingga dapat membantu mengurangi kecenderungan suhu untuk terus meningkat ketika mendekati *setpoint*.

Tabel 5-6 Hasil Pengujian Setpoint 65°C

Waktu Pengujian	Waktu	Suhu (°C)	Kelembapan (%)	Setpoint (°C)	Error (°C)
0 menit	23:36:07	29,20	93,0	65	35,80
5 menit	23:41:07	48,83	99,3	65	16,17
10 menit	23:46:07	65,98	78,9	65	0
15 menit	23:51:07	66,99	56,0	65	0
20 menit	23:56:07	63,04	60,0	65	1,96
25 menit	00:01:07	61,33	66,4	65	3,67
30 menit	00:06:07	63,08	65,9	65	1,92
60 menit	00:36:07	62,62	63,5	65	2,38
90 menit	01:06:07	62,39	58,6	65	2,61
120 menit	01:36:08	62,86	56,2	65	2,14
150 menit	02:06:08	62,69	54,7	65	2,31
180 menit	02:36:08	63,48	51,1	65	1,52
210 menit	03:06:08	64,48	48,4	65	0,52
240 menit	03:36:09	65,10	44,3	65	0
270 menit	04:06:09	65,58	39,8	65	0
300 menit	04:36:09	65,48	36,7	65	0
330 menit	05:06:10	65,64	33,1	65	0
360 menit	05:36:10	65,82	30,2	65	0
390 menit	06:06:10	65,85	26,6	65	0
420 menit	06:36:10	65,54	24,2	65	0
450 menit	07:06:11	64,81	23,1	65	0

480 menit	07:36:11	64,73	22,0	65	0
510 menit	08:06:11	64,83	20,9	65	0
516 menit	08:12:11	66,25	20,0	65	0

Berdasarkan Tabel 5-6, Pada pengujian ini, nilai $K_p = 1,5$ dan $K_d = 0,7$, sehingga respons sistem terhadap perubahan suhu ditentukan oleh besar *error* dan perubahan *error* terhadap waktu. Komponen proporsional memberikan respons berdasarkan selisih antara suhu aktual dan *setpoint*, sedangkan komponen derivatif memberikan respons terhadap perubahan *error* sehingga dapat membantu mengurangi kecenderungan suhu untuk terus meningkat ketika mendekati *setpoint*.



Gambar 5.3 Grafik Respons Suhu terhadap Waktu pada Setpoint 65°C

Berdasarkan Gambar 5.3, suhu awal sebesar 29,20 °C meningkat menuju *setpoint* 65 °C. Suhu pertama kali melewati *setpoint* pada menit ke-11 dengan nilai 65,98 °C. Setelah itu suhu terus meningkat dan mencapai nilai maksimum 68,00 °C pada menit ke-13 dan kembali tercatat 68,00 °C pada menit ke-14. Setelah fase tersebut, suhu mulai menurun dan kemudian berfluktuasi di sekitar *setpoint*.

1. Analisis Error Suhu

Besarnya *error* digunakan untuk mengetahui selisih antara suhu yang diinginkan dengan suhu aktual yang dibaca oleh SHT30. Perhitungan *error* menggunakan persamaan:

$$e(t) = SP - T(t)$$

Dengan:

$$e(t) = \text{errorsuhu} (^{\circ}\text{C})$$

$$SP = \text{setpoint} (^{\circ}\text{C})$$

$$T(t) = \text{suhuaktual} (^{\circ}\text{C})$$

Pada pengujian ini, nilai *setpoint* adalah 65 °C sehingga:

$$e(t) = 65 - T(t)$$

Sebagai contoh, pada menit pertama suhu aktual sebesar 29,20 °C sehingga:

$$e(1) = 65 - 29,20$$

$$e(1) = 35,80^{\circ}\text{C}$$

Nilai *error* semakin kecil ketika suhu aktual mendekati *setpoint*. Ketika suhu aktual melebihi 65 °C, nilai *error* menjadi negatif. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa suhu telah melewati *setpoint* dan bukan menunjukkan kesalahan pencatatan.

2. Analisis Rise Time

Rise time digunakan untuk mengetahui kecepatan respons sistem dalam meningkatkan suhu dari kondisi awal menuju daerah *setpoint*. Pada analisis ini digunakan batas 10% dan 90% dari perubahan suhu antara suhu awal dan *setpoint*.

Suhu awal:

$$T_0 = 29,20^{\circ}\text{C}$$

Perubahan suhu yang diperlukan untuk mencapai *setpoint*:

$$\Delta T = 65 - 29,20^{\circ}\text{C}$$

$$\Delta T = 35,80^{\circ}\text{C}$$

Batas 10% dihitung dengan:

$$T_{10} = T_0 + 0,1(SP - T_0)$$

$$T_{10} = 29,20 + 0,1(65 - 29,20)$$

$$T_{10} = 32,78^{\circ}\text{C}$$

Batas 90%:

$$T_{90} = T_0 + 0,9(SP - T_0)$$

$$T_{90} = 29,20 + 0,9(65 - 29,20)$$

$$T_{90} = 61,42^{\circ}\text{C}$$

Berdasarkan data hasil pengujian, suhu pertama kali melewati batas 10% pada menit ke-4, sedangkan batas 90% tercapai pada menit ke-9. Dengan demikian:

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

$$t_r = 9 - 4$$

$$t_r = 5 \text{ menit}$$

Dengan demikian, sistem membutuhkan waktu sekitar 5 menit untuk bergerak dari 10% menuju 90% respons perubahan suhu..

3. Waktu Mencapai *Setpoint* dan *Peak Time*

Selain *rise time*, waktu pertama kali suhu mencapai *setpoint* digunakan untuk melihat kecepatan sistem dalam mencapai temperatur yang ditentukan. Berdasarkan data pengujian, suhu pada menit ke-10 masih sebesar 63,60 °C, kemudian meningkat menjadi 65,98 °C pada menit ke-11. Dengan demikian, suhu pertama kali mencapai atau melewati *setpoint* 65 °C pada menit ke-11.

Selanjutnya, suhu maksimum yang tercatat selama pengujian adalah:

$$T_{max} = 68,00^{\circ}\text{C}$$

Suhu tersebut pertama kali tercapai pada menit ke-13 dan kembali tercatat sebesar 68,00 °C pada menit ke-14. Setelah itu suhu mulai mengalami penurunan.

Dengan demikian, *peak time* sistem adalah:

$$t_p = 13 \text{ menit}$$

4. Analisis *Overshoot*

Overshoot menunjukkan besarnya kenaikan suhu maksimum terhadap *setpoint*.

Persamaan yang digunakan adalah:

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

Dengan

$$T_{max} = 68,00^{\circ}\text{C}$$

$$SP = 65^{\circ}\text{C}$$

Maka:

$$M_p = \frac{68 - 65}{65} \times 100\%$$

$$M_p = \frac{3}{65} \times 100\%$$

$$M_p = 4,62\%$$

Adapun:

$$\Delta T_{\text{overshoot}} = T_{\text{max}} - SP$$

$$\Delta T_{\text{overshoot}} = 68 - 65$$

$$\Delta T_{\text{overshoot}} = 3^\circ\text{C}$$

Hasil tersebut menunjukkan bahwa suhu maksimum berada 3 °C di atas *setpoint*, dengan *overshoot* sebesar 4,62%. Setelah mencapai suhu maksimum pada menit ke-13 dan ke-14, suhu kembali mengalami penurunan menuju daerah di sekitar *setpoint*. Hal ini menunjukkan bahwa respons sistem tidak berhenti pada kondisi *overshoot*, tetapi kembali menuju daerah pengendalian setelah kenaikan awal.

5. Analisis *Settling Time*

Settling time digunakan untuk mengetahui waktu yang dibutuhkan sistem hingga suhu masuk dan kemudian bertahan dalam batas toleransi tertentu terhadap *setpoint*.

Pada pengujian ini digunakan batas toleransi $\pm 2^\circ\text{C}$.

Maka daerah *settling* adalah:

$$SP - 2 \leq T(t) \leq SP + 2$$

$$65 - 2 \leq T(t) \leq 65 + 2$$

$$63^\circ\text{C} \leq T(t) \leq 67^\circ\text{C}$$

Berdasarkan data pengujian, suhu masih berada di luar rentang tersebut pada menit ke-137, yaitu sebesar 62,97 °C. Pada menit ke-138, suhu meningkat menjadi 63,01 °C dan setelah titik tersebut suhu tetap berada pada rentang 63–67 °C hingga pengujian berakhir. Karena data pertama ditetapkan sebagai menit ke-1, nomor titik pengukuran tersebut tidak langsung digunakan sebagai lama waktu yang telah berlalu. Waktu *settling* ditentukan berdasarkan *timestamp*.

Pengujian dimulai pada pukul 23:36:07, sedangkan sistem mulai masuk dan bertahan pada pita ± 2 °C pada sekitar pukul 02:21:08. Selisih kedua waktu tersebut adalah sekitar 165 menit

Dengan demikian, *settling time* berdasarkan batas toleransi ± 2 °C adalah sekitar 165 menit.

6. Analisis Suhu pada Kondisi Akhir

Setelah fase transien, suhu menunjukkan perubahan yang lebih kecil dibandingkan kondisi awal pemanasan. Untuk mengevaluasi kondisi tersebut, data mulai menit ke-300 sampai menit ke-487 dianalisis sebagai bagian akhir pengujian.

Rata-rata suhu dihitung menggunakan:

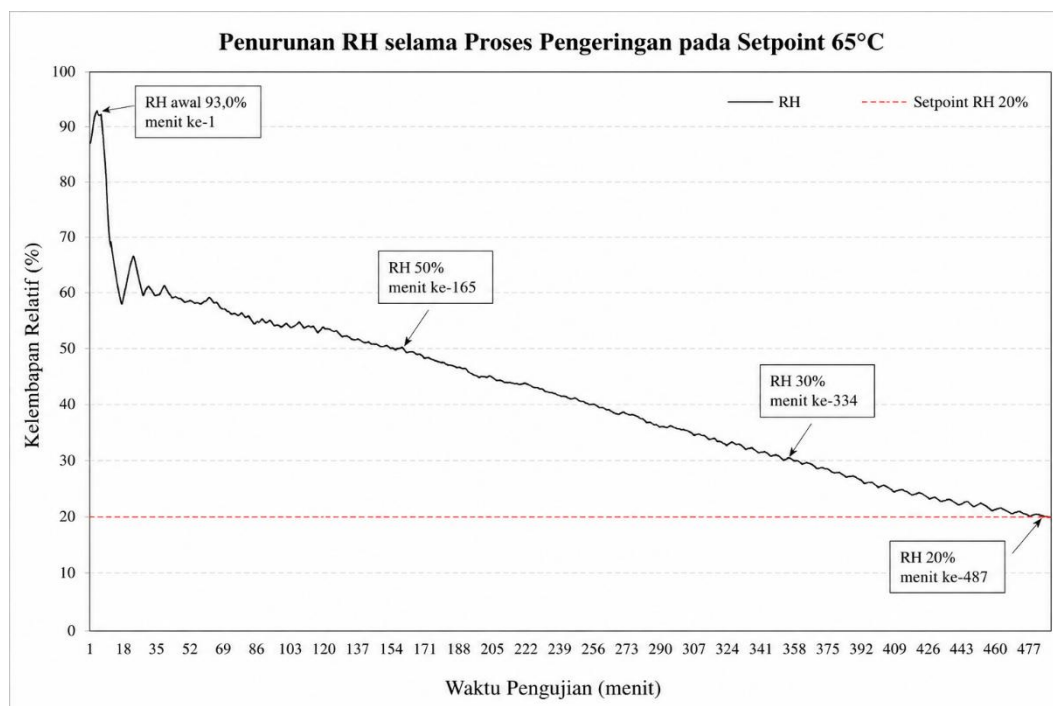
$$\bar{T} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n T_i$$

Hasil pengolahan data menunjukkan suhu rata-rata:

$$\bar{T} = 65,37^{\circ}\text{C}$$

dengan suhu minimum sebesar $64,65^{\circ}\text{C}$ dan maksimum sebesar $66,25^{\circ}\text{C}$.

Selain respons suhu, perubahan kelembapan relatif diamati untuk mengetahui perkembangan proses pengeringan. Kelembapan relatif merupakan salah satu parameter yang menunjukkan kondisi udara di dalam ruang pengering. Ketika proses pengeringan berlangsung, air dari bahan yang dikeringkan berpindah ke udara sehingga nilai RH di dalam ruang pengering dapat berubah seiring waktu. Pada awal pengujian, RH tercatat sebesar 93,0%. Nilai tersebut kemudian mengalami perubahan selama proses berlangsung dan secara umum menunjukkan kecenderungan menurun. Pengujian dilanjutkan sampai nilai RH mencapai batas penghentian yang telah ditentukan, yaitu 20,0%.



Gambar 5.4 Grafik Penurunan RH selama Proses Pengeringan pada *Setpoint* 65°C

Berdasarkan Gambar 5.4 tersebut, RH mengalami penurunan dari 93,0% pada awal pengujian hingga 20,0% pada titik terakhir. Nilai RH mencapai sekitar 50% pada menit ke-165 dan sekitar 30% pada menit ke-334. Setelah itu, RH terus menurun hingga mencapai 20,0% pada menit ke-487. Penurunan tersebut menunjukkan bahwa proses pengeringan berlangsung secara bertahap selama pengujian.

Karena sistem menggunakan RH 20% sebagai kondisi akhir proses, maka titik tersebut menjadi bagian penting dalam pengujian keseluruhan. Ketika RH mencapai nilai tersebut, proses pengeringan dihentikan dan sistem kembali ke kondisi STOP sesuai algoritma pengoperasian alat.

Berdasarkan keseluruhan hasil pengujian, sistem kendali mampu menaikkan suhu dari 29,20 °C menuju *setpoint* 65 °C. Sistem pertama kali melewati *setpoint* pada menit ke-11 dan mencapai suhu maksimum 68,00 °C pada menit ke-13. Dengan demikian, *overshoot* yang dihasilkan adalah sebesar 4,62%.

Setelah terjadi *overshoot*, suhu mengalami penurunan dan kemudian memasuki pita toleransi ± 2 °C. Berdasarkan *timestamp*, sistem mulai masuk dan

bertahan pada rentang 63–67 °C setelah sekitar 165 menit pengujian. Pada bagian akhir pengujian, suhu rata-rata tercatat sebesar 65,37 °C dengan simpangan baku 0,46 °C. Hasil tersebut menunjukkan bahwa suhu dapat dipertahankan di sekitar nilai *setpoint* meskipun masih terdapat fluktuasi.

Dari sisi proses pengeringan, RH mengalami penurunan dari 93,0% menjadi 20,0%. Kondisi akhir tersebut tercapai pada titik pengukuran ke-487 atau sekitar pukul 08:12:11. Dengan tercapainya batas RH 20%, proses pengujian berakhir sesuai kondisi penghentian yang ditentukan pada sistem

Tabel 5-7 Ringkasan Parameter Performa Kontrol PID pada *Setpoint* 65°C

Parameter	Hasil
<i>Setpoint</i>	65 °C
Parameter kendali	$K_p = 1,5$; $K_i = 0$; $K_d = 0,7$
Suhu awal	29,20 °C
<i>Rise time</i> 10–90%	5 menit
Pertama mencapai <i>setpoint</i>	Menit ke-11
Suhu maksimum	68,00 °C
<i>Peak time</i>	Menit ke-13
<i>Overshoot</i>	4,62%
<i>Settling band</i>	±2 °C
<i>Settling time</i>	±165 menit
Suhu rata-rata menit ke-300–487	65,37 °C
Suhu minimum menit ke-300–487	64,65 °C
Suhu maksimum menit ke-300–487	66,25 °C
<i>Steady-state error</i> rata-rata	−0,37 °C
RH awal	93,0%
RH akhir	20,0%
Jumlah data	487 titik

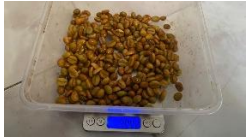
Secara keseluruhan, hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem kendali dengan parameter $K_p = 1,5$, $K_i = 0$, dan $K_d = 0,7$ mampu mengarahkan suhu menuju *setpoint* 65 °C dan mempertahankannya pada kisaran yang relatif dekat

dengan nilai tersebut. Respons awal masih menghasilkan *overshoot* sebesar 4,62%, sedangkan pada bagian akhir suhu berada pada rentang 64,65–66,25 °C dengan rata-rata 65,37 °C. Pada saat yang sama, RH ruang pengering terus mengalami penurunan hingga mencapai 20,0% sebagai kondisi akhir pengujian.

5.6 Hasil Pengujian Pengeringan Alami (*Natural drying*)

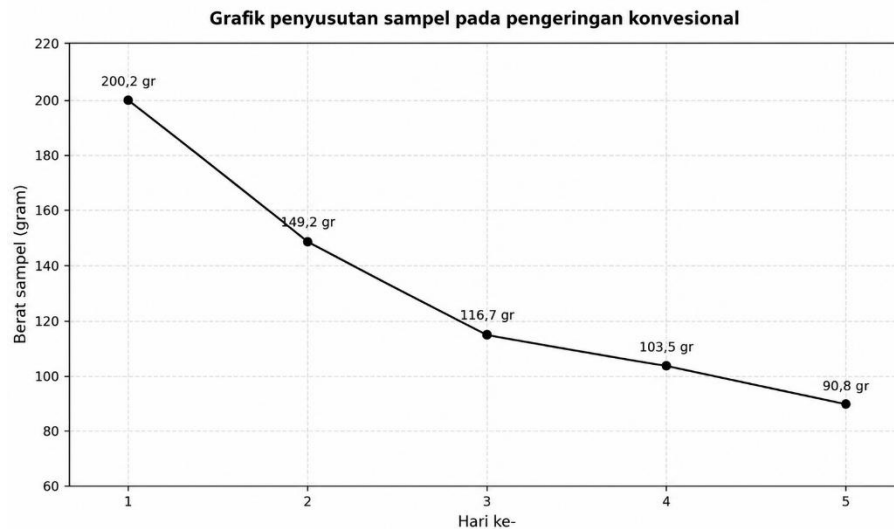
Pengujian pengeringan konvensional dilakukan dengan menjemur sampel biji kopi Robusta sebanyak 400 gram di area terbuka selama tujuh hari berturut-turut. Penimbangan berat sampel dilakukan setiap hari untuk mengetahui penyusutan berat yang terjadi akibat penguapan air dari dalam biji kopi. Hasil penimbangan harian disajikan pada Tabel 5-8.

Tabel 5-8 Pengujian dengan Proses *Natural Drying*

Hari ke-	Kondisi Cuaca	Berat Sampel (gram)	Susut Berat (gram)	Dokumentasi
1	12 September 2026 	200,2	-	
2	13 September 2026 	149,2	51	
3	14 September 2026 	116,7	32,5	

4	15 September 2026 	103,5	13,2	
5	16 September 2026 	90,8	12,7	

Berdasarkan data pada Tabel 5-8, berat sampel mengalami penurunan dari 200 gram pada awal penjemuran menjadi 90,8 gram pada hari ketujuh, dengan total penyusutan sebesar 109,4 gram. Penyusutan terbesar terjadi pada hari kedua yaitu sebesar 51 gram. Besarnya penyusutan pada hari kedua disebabkan oleh tingginya kandungan air pada permukaan biji kopi yang masih dalam kondisi basah setelah proses full washed, sehingga air permukaan tersebut mudah menguap saat terpapar sinar matahari. Pada hari ketiga, penyusutan masih cukup besar yaitu 32,5 gram, kemudian menurun secara bertahap pada hari-hari berikutnya. Penurunan laju penyusutan ini terjadi karena sisa air yang masih terkandung di dalam biji kopi semakin sulit menguap seiring dengan menurunnya kadar air, di mana air yang tersisa berada di bagian dalam biji dan memerlukan waktu lebih lama untuk berdifusi ke permukaan. Perubahan berat sampel selama tujuh hari penjemuran divisualisasikan pada Gambar 5.5 Grafik Penyusutan Berat pada Pengeringan Konvensional



Gambar 5.5 Grafik Penyusutan Berat pada Pengeringan Konvensional

5.7 Perhitungan Kadar Air dengan Metode Gravimetri

Pengukuran kadar air biji kopi dilakukan untuk mengetahui jumlah air yang masih terkandung di dalam biji kopi setelah proses pengeringan selesai. Metode yang digunakan adalah metode gravimetri, yaitu metode penentuan kadar air berdasarkan kehilangan berat sampel setelah dipanaskan pada suhu tinggi hingga mencapai berat konstan. Prinsip dasar metode ini adalah seluruh kandungan air di dalam sampel akan menguap selama proses pemanasan, sehingga selisih antara berat awal dan berat akhir sampel merepresentasikan jumlah air yang terkandung di dalamnya.

Pengujian ini dilakukan dengan mengacu pada prosedur pengeringan oven pada suhu 130°C [14]. Sampel dipanaskan selama 3 jam pada periode awal, kemudian dikeluarkan dan ditimbang. Apabila penyusutan berat pada periode tersebut masih melebihi 1%, maka pemanasan dilanjutkan selama 1 jam berikutnya dan sampel kembali ditimbang. Proses penambahan waktu 1 jam ini diulang hingga penyusutan berat antara dua periode penimbangan berturut-turut bernilai kurang dari 1%. Pada saat penyusutan sudah kurang dari 1%, sampel dianggap tidak lagi mengandung air yang dapat diuapkan, sehingga berat pada kondisi tersebut ditetapkan sebagai berat kering total.

Sampel yang digunakan untuk pengujian gravimetri diambil sebanyak 20 gram dari biji kopi hasil pengeringan menggunakan oven pada *setpoint* 65°C dan pengeringan konvesional. Pertama-tama metode gravimetri dilakukan untuk pengujian hasil pengeringan menggunakan oven pada *setpoint* 65°C. Total biji kopi yang tersedia setelah proses pengeringan oven adalah seberat 95,2 gram. Sampel 20 gram tersebut kemudian dimasukkan ke dalam oven terpisah pada suhu 130°C untuk memulai proses penentuan berat kering total. Oven yang digunakan untuk pengujian gravimetri ini berbeda dengan oven Samono SW-EOG12 yang digunakan untuk proses pengeringan, mengingat suhu yang dibutuhkan untuk gravimetri (130°C) jauh lebih tinggi dibandingkan suhu pengeringan (65°C). Hasil pengukuran gravimetri disajikan pada Tabel 5-9.

Tabel 5-9 Hasil Pengukuran Gravimetri

Periode	Durasi Kumulatif	Berat Sampel (gram)	Penyusutan (gram)	Persentase Penyusutan (%)	Status
Awal	-	20	-	-	-
Periode 1	3 jam	18,2	1,8	9,0	> 1%, dilanjutkan
Periode 2	4 jam	17,7	0,5	2,7	> 1%, dilanjutkan
Periode 3	5 jam	17,6	0,1	0,6	< 1%, kering total

Perhitungan persentase penyusutan pada setiap periode dilakukan dengan membandingkan selisih berat terhadap berat pada periode sebelumnya. Rumus yang digunakan adalah sebagai berikut:

$$\text{Penyusutan}(\%) = \frac{\text{Berat}_{\text{sebelumnya}} - \text{Berat}_{\text{saat ini}}}{\text{Berat}_{\text{sebelumnya}}} \times 100$$

Perhitungan untuk setiap periode dijabarkan sebagai berikut:

Periode 1 (3 jam pertama):

$$\text{Penyusutan (\%)} = \frac{(20 - 18,2)}{20} \times 100\% = 9\%$$

Nilai penyusutan sebesar 9,0% masih jauh melebihi batas 1%, yang menunjukkan bahwa sampel masih mengandung air dalam jumlah yang cukup banyak sehingga pemanasan perlu dilanjutkan.

Periode 2 (jam ke-4):

$$\text{Penyusutan (\%)} = \frac{(18,2 - 17,7)}{18,2} \times 100\% = 2,7\%$$

Nilai penyusutan sebesar 2,7% masih melebihi batas 1%, sehingga pemanasan kembali dilanjutkan selama 1 jam berikutnya.

Periode 3 (jam ke-5):

$$\text{Penyusutan (\%)} = \frac{(17,7 - 17,6)}{17,7} \times 100\% = 0,6\%$$

Nilai penyusutan sebesar 0,6% telah kurang dari batas 1%, sehingga berat 17,6 gram ditetapkan sebagai berat kering total sampel. Kondisi ini menunjukkan bahwa seluruh kandungan air yang dapat diuapkan telah hilang dari dalam sampel setelah proses pemanasan selama total 5 jam pada suhu 130°C.

Setelah berat kering total diperoleh, kadar air biji kopi dihitung menggunakan rumus sebagai berikut:

$$\text{Kadar Air (\%)} = \frac{((\text{Berat Awal Sampel} - \text{Berat Kering Total}))}{\text{Berat Awal Sampel}} \times 100\%$$

$$\text{Kadar Air (\%)} = \frac{(20 - 17,6)}{20} \times 100\% = 12\%$$

Hasil perhitungan tersebut menunjukkan bahwa dari 20 gram sampel biji kopi, sebanyak 2,4 gram merupakan kandungan air, sedangkan 17,6 gram sisanya merupakan berat kering biji kopi. Dengan kata lain, biji kopi yang telah dikeringkan menggunakan oven hingga kelembapan ruang pengering mencapai 20% memiliki kadar air sebesar 12%.

Selanjutnya metode gravimetri dilakukan untuk pengujian hasil pengeringan konvensional. Total biji kopi yang tersedia setelah proses pengeringan oven adalah sebesar 90,8 gram. Sampel 20 gram tersebut kemudian dimasukkan ke dalam oven terpisah pada suhu 130°C untuk memulai proses penentuan berat kering total. Hasil pengukuran gravimetri disajikan pada Tabel 5-10.

Tabel 5-10 Hasil Pengukuran Gravimetri Pengeringan Konvensional

Periode	Durasi Kumulatif	Berat Sampel (gram)	Penyusutan (gram)	Persentase Penyusutan (%)	Status
Awal	-	20	-	-	-
Periode 1	3 jam	18.6	1,4	7,0	> 1%, dilanjutkan
Periode 2	4 jam	18.0	0,6	3	> 1%, dilanjutkan
Periode 3	5 jam	17,9	0,1	0,5	< 1%, kering total

Perhitungan persentase penyusutan pada setiap periode dilakukan dengan membandingkan selisih berat terhadap berat pada periode sebelumnya. Rumus yang digunakan adalah sebagai berikut:

$$Penyusutan(\%) = \frac{Berat_{sebelumnya} - Berat_{saat ini}}{Berat_{sebelumnya}} \times 100\%$$

Perhitungan untuk setiap periode dijabarkan sebagai berikut:

Periode 1 (3 jam pertama):

$$Penyusutan (\%) = \frac{(20 - 18,6)}{20} \times 100\% = 7\%$$

Nilai penyusutan sebesar 7,0% masih jauh melebihi batas 1%, yang menunjukkan bahwa sampel masih mengandung air dalam jumlah yang cukup banyak sehingga pemanasan perlu dilanjutkan.

Periode 2 (jam ke-4):

$$\text{Penyusutan (\%)} = \frac{(18,6 - 18,0)}{18,6} \times 100\% = 3\%$$

Nilai penyusutan sebesar 3% masih melebihi batas 1%, sehingga pemanasan kembali dilanjutkan selama 1 jam berikutnya.

Periode 3 (jam ke-5):

$$\text{Penyusutan (\%)} = \frac{(18 - 17,9)}{18} \times 100\% = 0,5\%$$

Nilai penyusutan sebesar 0,5% telah kurang dari batas 1%, sehingga berat 17,9 gram ditetapkan sebagai berat kering total sampel. Kondisi ini menunjukkan bahwa seluruh kandungan air yang dapat diuapkan telah hilang dari dalam sampel setelah proses pemanasan selama total 5 jam pada suhu 130°C.

Setelah berat kering total diperoleh, kadar air biji kopi dihitung menggunakan rumus sebagai berikut:

$$\text{Kadar Air (\%)} = \frac{((\text{Berat Awal Sampel} - \text{Berat Kering Total}))}{\text{Berat Awal Sampel}} \times 100\%$$

$$\text{Kadar Air (\%)} = \frac{(20 - 17,9)}{20} \times 100\% = 10,5\%$$

Hasil perhitungan tersebut menunjukkan bahwa dari 20 gram sampel biji kopi, sebanyak 2,1 gram merupakan kandungan air, sedangkan 17,9 gram sisanya merupakan berat kering biji kopi. Berdasarkan perbandingan antara massa awal sampel sebesar 20 gram dan massa kering sebesar 17,9 gram, diperoleh kadar air sebesar 10,5%. Dengan demikian, sampel kopi hasil pengeringan konvensional dengan berat awal 90,8 gram memiliki kadar air sebesar 10,5% berdasarkan pengujian gravimetri.

Berdasarkan SNI 01-2907-2008 tentang biji kopi, persyaratan kadar air maksimum untuk biji kopi adalah sebesar 12,5%. Nilai kadar air sebesar 12% melalui pengeringan media oven yang dimodifikasi dan 10,5% melalui pengeringan konvensional yang diperoleh pada penelitian ini telah memenuhi persyaratan standar tersebut. Apabila ditinjau dari rekomendasi Specialty Coffee Association (SCA), rentang kadar air ideal untuk biji kopi hijau (*green bean*) adalah antara 10% hingga

12%, sehingga hasil yang diperoleh juga berada dalam rentang yang direkomendasikan secara internasional.

Hasil pengujian gravimetri ini sekaligus memberikan informasi bahwa pembacaan kelembapan ruang pengering sebesar 20% oleh sensor SHT30 dapat dijadikan sebagai acuan indikator bahwa proses pengeringan telah menghasilkan biji kopi dengan kadar air yang sesuai standar. Kondisi inilah yang dimanfaatkan pada program sistem kendali, di mana variabel KELEMBAPAN_TARGET ditetapkan sebesar 20% dan proses pemanasan dihentikan secara otomatis apabila kelembapan di dalam ruang pengering telah mencapai nilai tersebut.

5.8 Pengujian Keseluruhan Sistem

Pengujian keseluruhan sistem dilakukan untuk memastikan bahwa seluruh komponen perangkat keras dan perangkat lunak yang telah dirancang dapat bekerja secara terintegrasi sebagai satu kesatuan sistem pengering biji kopi otomatis. Pengujian ini bersifat menyeluruh, di mana seluruh fungsi sistem dijalankan secara bersamaan mulai dari proses pemanasan awal hingga proses pengeringan selesai. Parameter yang diamati meliputi pembacaan sensor, kinerja kendali PID, penampilan data pada OLED, pengiriman data ke Blynk dan Google Sheets, fungsi joystick, serta respons sistem terhadap kondisi kelembapan target. Hasil pengujian keseluruhan sistem disajikan pada Tabel 5-11.

Tabel 5-11 Hasil Pengujian Keseluruhan Sistem

No	Komponen/Fungsi	Indikator Keberhasilan	Status
1	Sensor SHT30	Data suhu dan kelembapan terbaca pada OLED	Berhasil
2	Sistem kendali PID	Suhu dapat dipertahankan mendekati <i>setpoint</i> 65°C	Berhasil
3	SSR dan elemen pemanas	<i>Heater</i> menyala dan mati sesuai keluaran PID	Berhasil

No	Komponen/Fungsi	Indikator Keberhasilan	Status
4	Tampilan OLED	Data suhu, kelembapan, dan <i>duty cycle</i> tampil pada halaman yang sesuai	Berhasil
5	Joystick (navigasi)	Perpindahan halaman OLED berfungsi saat joystick digerakkan ke kiri/kanan	Berhasil
6	Joystick (tombol)	Status sistem berubah dari STOP ke RUN atau sebaliknya saat tombol ditekan	Berhasil
7	Koneksi WiFi	ESP32 terhubung ke jaringan WiFi, indikator "W" tampil pada OLED	Berhasil
8	Pengiriman data ke Blynk	Data suhu, kelembapan, dan <i>duty cycle</i> tampil pada <i>dashboard</i> Blynk	Berhasil
9	Pencatatan data ke Google Sheets	Data suhu dan kelembapan tercatat dengan stempel waktu pada spreadsheet	Berhasil
10	Penghentian otomatis berdasarkan kelembapan	Sistem menghentikan pemanasan saat kelembapan mencapai 20%	Berhasil
11	Reconnect WiFi otomatis	Sistem menyambung ulang secara otomatis setelah koneksi WiFi terputus	Berhasil

Pengujian keseluruhan sistem dilakukan untuk memastikan seluruh komponen perangkat keras dan perangkat lunak dapat bekerja secara terintegrasi dalam proses pengeringan biji kopi. Pengujian dimulai dengan mengaktifkan sistem melalui joystick dari kondisi STOP ke kondisi RUN. Setelah sistem aktif, elemen pemanas dikendalikan oleh SSR berdasarkan keluaran pengendali, sedangkan

sensor SHT30 digunakan untuk membaca suhu dan kelembapan ruang pengering secara berkala.

Selama proses berlangsung, hasil pembacaan sensor ditampilkan pada OLED dan dikirimkan ke Blynk melalui jaringan Wi-Fi. Data pengujian juga dicatat pada Google Sheets secara berkala untuk mendukung pemantauan dan analisis. Pengendalian suhu dilakukan dengan parameter $K_p = 1,5$, $K_i = 0$, dan $K_d = 0,7$, sedangkan kondisi kelembapan digunakan sebagai salah satu acuan penghentian proses.

Pengujian juga mencakup penghentian otomatis berdasarkan kelembapan target. Ketika suhu mencapai batas keselamatan sebesar $75\text{ }^{\circ}\text{C}$, elemen pemanas dihentikan secara otomatis. Sementara itu, ketika kelembapan relatif ruang pengering mencapai atau kurang dari 20%, keluaran kendali diatur menjadi nol sehingga proses pemanasan berhenti dan sistem kembali ke kondisi STOP. Pada kondisi tersebut, proses pengeringan berikutnya dapat dijalankan kembali dengan menekan joystick.

Selain fungsi kendali, konektivitas Wi-Fi juga diuji dengan memutus dan menghubungkan kembali jaringan selama proses berlangsung. Sistem dapat melakukan penyambungan ulang secara otomatis tanpa perlu melakukan *restart*, sehingga pengiriman data ke Blynk dan Google Sheets dapat dilanjutkan setelah koneksi tersedia kembali.

Berdasarkan pengujian yang dilakukan, seluruh fungsi utama sistem dapat bekerja sesuai rancangan. Sensor SHT30 mampu memberikan data suhu dan kelembapan, pengendali mengatur kerja elemen pemanas, OLED dan Blynk menampilkan hasil pemantauan, Google Sheets mencatat data pengujian, joystick berfungsi sebagai antarmuka pengoperasian, serta sistem dapat menghentikan proses secara otomatis berdasarkan kondisi suhu berlebih dan kelembapan target.