BAB V
PENGUJIAN ALAT DAN ANALISA

5.1 Gambaran Umum Pengujian

Pengujian dilakukan untuk mengevaluasi kinerja *dehydrator* listrik yang telah dirancang, baik dari aspek sistem monitoring suhu, sistem kontrol suhu, maupun performa proses dengan objek pengeringan yaitu jahe. Melalui pengujian ini diharapkan dapat diketahui kemampuan alat dalam menjaga temperatur pengeringan sesuai dengan nilai yang ditentukan serta efektivitasnya dalam menurunkan massa jahe selama proses pengeringan berlangsung.

Secara umum, pengujian pada penelitian ini terdiri atas dua bagian utama, yaitu pengujian temperatur dan pengujian pengeringan jahe. Pengujian temperatur bertujuan untuk mengevaluasi kinerja sistem monitoring berbasis sensor thermocouple tipe-k yang dihubungkan dengan modul MAX6675, serta menganalisis respon sistem kendali PD (*Proportional-Derivative*) yang diterapkan pada *temperature controller* TC4S. Sebelum dilakukan pengujian temperatur selama proses pengeringan, terlebih dahulu dilakukan validasi pembacaan sensor MAX6675 dengan membandingkan hasil pembacaan terhadap temperatur yang ditampilkan oleh TC4S sebagai data pembanding. Hasil validasi tersebut dianalisis menggunakan parameter *error* berdasarkan persamaan 2- 1 dan *Mean Squared Error* (MSE) berdasarkan persamaan 2- 2.

Pengujian pengeringan jahe dilakukan menggunakan dua skenario pengujian. Skenario pertama bertujuan untuk mengetahui karakteristik proses pengeringan melalui pengamatan perubahan massa jahe selama proses berlangsung. Pengujian dilakukan sebanyak tiga kali pengulangan dengan durasi masing-masing selama tiga jam. Massa jahe diukur setiap 30 menit sehingga diperoleh data perubahan massa pada setiap interval pengamatan. Data hasil penimbangan kemudian digunakan untuk menghitung penyusutan massa menggunakan persamaan 2- 9 serta laju pengeringan menggunakan persamaan 2- 10.

Skenario kedua bertujuan untuk mengevaluasi kemampuan alat dalam beroperasi secara kontinu selama proses pengeringan. Pengujian dilakukan selama

tiga jam tanpa penghentian proses, dengan penimbangan massa dilakukan sebelum dan setelah pengeringan selesai. Selama pengujian berlangsung, temperatur ruang pengering dicatat secara kontinu oleh sistem monitoring sehingga dapat diamati kestabilan temperatur selama alat beroperasi. Data yang diperoleh dari kedua skenario pengujian selanjutnya dianalisis untuk mengevaluasi performa sistem monitoring temperatur, respon sistem kendali PD, karakteristik proses pengeringan, serta kinerja keseluruhan alat yang telah dikembangkan. Hasil pengujian dan analisis masing-masing parameter disajikan pada subbab-subbab berikutnya sesuai dengan jenis data yang diperoleh.

5.2 Pengujian Variasi Parameter PID

Pengujian variasi parameter PID dilakukan untuk mengetahui pengaruh nilai *Proportional Band* (P), *Integral Time* (I), dan *Derivative Time* (D) terhadap respons temperatur sistem. Pengujian dilakukan pada *setpoint* 40°C untuk masing-masing konfigurasi parameter, dengan data temperatur dicatat secara berkala setiap sekitar 30 detik. Data hasil pengukuran selanjutnya dianalisis berdasarkan nilai *Mean Square Error* (MSE) yang menunjukkan besarnya penyimpangan temperatur terhadap *setpoint* selama pengujian. Perbandingan hasil pengujian dari setiap kombinasi parameter PID disajikan pada Tabel 5- 1.

Tabel 5- 1 Hasil Pengujian Variasi Parameter PID

No	Proportional Band (P)	Integral Time (I)	Derivative Time (D)	MSE (°C²)
1	50	0	0	49,14
2	25	5	5	32,28
3	20	5	5	32,37
4	**10**	**0**	**5**	**24.45**
5	10	5	5	28,26

Berdasarkan Tabel 5- 1, perubahan parameter PID memberikan pengaruh terhadap respons temperatur sistem terhadap *setpoint* 40°C. Pengujian dengan parameter *Proportional Band* = 50, *Integral Time* = 0, dan *Derivative Time* = 0

menghasilkan nilai MSE sebesar 49,14 °C². Nilai tersebut menunjukkan bahwa selama periode pengujian masih terdapat penyimpangan temperatur yang cukup besar terhadap *setpoint*. Hal ini terlihat dari temperatur yang meningkat secara bertahap dari sekitar 29,6°C hingga mencapai 46,3°C pada akhir pengujian. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa penggunaan *Proportional Band* yang besar tanpa komponen integral dan derivatif belum mampu menghasilkan respons temperatur yang mendekati *setpoint* secara konsisten selama periode pengamatan.

Pada pengujian *Proportional Band* = 25, *Integral Time* = 5, dan *Derivative Time* = 5, diperoleh nilai MSE sebesar 32,28 °C², sedangkan pada *Proportional Band* = 20, *Integral Time* = 5, dan *Derivative Time* = 5 diperoleh MSE sebesar 32,37 °C². Kedua konfigurasi tersebut menunjukkan respons yang lebih cepat mendekati *setpoint* dibandingkan pengujian pertama, namun temperatur kemudian meningkat hingga berada pada kisaran 47°C.

Pengujian dengan parameter *Proportional Band* = 10, *Integral Time* = 0, dan *Derivative Time* = 5 menghasilkan nilai MSE sebesar 24,45 °C², yang merupakan nilai MSE paling kecil dari lima konfigurasi yang diuji. Pada pengujian ini, temperatur meningkat dari sekitar 32,7°C dan mencapai set point 40°C, kemudian terus meningkat hingga mencapai sekitar 45,7°C pada akhir pengujian. Nilai MSE yang lebih kecil menunjukkan bahwa secara keseluruhan penyimpangan kuadrat rata-rata temperatur terhadap *setpoint* selama periode pengujian lebih rendah dibandingkan konfigurasi lainnya.

Sementara itu, konfigurasi *Proportional Band* = 10, *Integral Time* = 5, dan *Derivative Time* = 5 menghasilkan MSE sebesar 28,26 °C², sehingga memiliki penyimpangan yang lebih besar dibandingkan konfigurasi dengan *Integral Time* 0 dan *Derivative Time* 5. Berdasarkan nilai MSE tersebut, konfigurasi *Proportional Band* = 10, *Integral Time* = 0, dan *Derivative Time* = 5 menghasilkan respons dengan penyimpangan temperatur terkecil selama periode pengujian.

5.3 Hasil Pengujian Temperatur

Pengujian temperatur dilakukan untuk mengevaluasi kinerja sistem monitoring dan sistem kontrol suhu yang diterapkan pada sistem *dehydrator*. Pengujian ini

bertujuan untuk mengetahui tingkat konsistensi pembacaan sensor thermocouple tipe-k berbasis modul MAX6675 terhadap *temperature controller* (TC4S) sebagai data pembanding, serta mengevaluasi kemampuan sistem dalam mencapai dan mempertahankan temperatur pengeringan sesuai dengan nilai *setpoint* yang telah ditentukan.

Tahap awal pengujian dilakukan dengan memvalidasi hasil pembacaan sensor MAX6675 melalui perbandingan terhadap temperatur yang ditampilkan oleh TC4S pada beberapa titik *setpoint*. Data hasil pengukuran tersebut selanjutnya dianalisis menggunakan parameter *error* berdasarkan persamaan 2- 1 dan *Mean Squared Error* (MSE) berdasarkan persamaan 2- 2 untuk mengetahui tingkat penyimpangan pembacaan antara kedua perangkat.

Setelah proses validasi selesai, dilakukan pengujian temperatur selama proses pengeringan berlangsung. Data temperatur dicatat secara otomatis oleh ESP32 dan disimpan pada Google Spreadsheet sebagai media data logging. Sebelum dilakukan analisis, data hasil pembacaan sensor diproses menggunakan filter *Infinite Impulse Response* (IIR) untuk mengurangi fluktuasi pembacaan akibat gangguan (*noise*) sehingga diperoleh data temperatur yang lebih stabil.

Data temperatur hasil data logging kemudian digunakan untuk menganalisis karakteristik respon sistem kendali PID yang diterapkan pada *temperature controller* TC4S. Parameter yang dianalisis meliputi *rise time*, *settling time*, *maximum overshoot*, dan *steady-state error* berdasarkan persamaan 2- 4 hingga persamaan 2- 7. Analisis tersebut bertujuan untuk mengetahui kemampuan sistem dalam mencapai temperatur *setpoint* dengan cepat, mempertahankan kestabilan temperatur selama proses pengeringan, serta meminimalkan penyimpangan temperatur pada kondisi tunak.

5.3.1 Pengujian Akurasi Sistem Monitoring Temperatur

Pengujian akurasi sistem monitoring temperatur dilakukan untuk mengevaluasi tingkat kesesuaian pembacaan sensor thermocouple tipe-K yang terhubung dengan modul MAX6675 terhadap temperatur yang ditampilkan oleh *temperature controller* (TC4S) sebagai data pembanding. Pengujian ini bertujuan

untuk mengetahui kemampuan sistem monitoring dalam membaca temperatur ruang pengering sebelum digunakan pada proses pengeringan jahe.

Pengujian dilakukan pada beberapa titik temperatur yang mewakili rentang suhu operasi alat pengering. *Temperature controller* TC4S diatur pada nilai *setpoint* tertentu, kemudian sistem dibiarkan hingga temperatur mencapai kondisi stabil (*steady state*). Setelah kondisi stabil tercapai, temperatur yang ditampilkan oleh TC4S dan temperatur hasil pembacaan sensor MAX6675 dicatat secara bersamaan. Prosedur tersebut diulangi pada setiap variasi temperatur yang telah ditentukan sehingga diperoleh beberapa pasangan data pembanding.

Data hasil pengukuran kemudian digunakan untuk menghitung nilai *error* menggunakan persamaan 2- 1 dan nilai *Mean Squared Error* (MSE) menggunakan persamaan 2- 2. Kedua parameter tersebut digunakan untuk mengevaluasi tingkat penyimpangan pembacaan temperatur antara sistem monitoring berbasis MAX6675 dengan temperatur yang ditampilkan oleh TC4S. Hasil pengukuran temperatur pada setiap titik pengujian disajikan pada Tabel 5- 2 dan Lampiran 1.

Tabel 5- 2 Hasil Pengujian Perbandingan Pembacaan Temperatur

No.	Temperatur TC4S (°C)	Temperatur MAX6675 (°C)	Error (%)
1	30	30,4	1,3
2	40	40,9	2,25
3	50	51,7	3,4
4	60	60,3	0,5

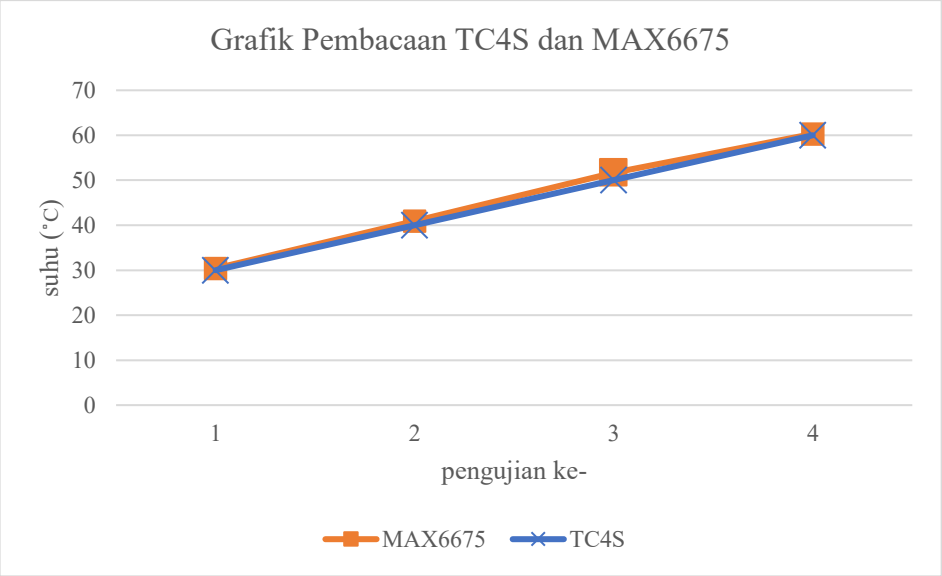
Berdasarkan data pada Tabel 5- 2, selanjutnya dilakukan perhitungan nilai *Mean Squared Error (MSE)* untuk mengetahui tingkat penyimpangan pembacaan temperatur secara keseluruhan. Hasil perhitungan MSE disajikan pada Tabel 5- 3.

Tabel 5- 3 Hasil Perhitungan *Mean Squared Error* (MSE)

Parameter	Nilai ($°C^2$)
Mean Squared Error (MSE)	0,99

Berdasarkan Tabel 5- 2 dan Tabel 5- 3, pembacaan temperatur MAX6675 menunjukkan pola yang relatif mendekati temperatur yang ditampilkan oleh TC4S pada seluruh titik pengujian. Perbedaan pembacaan terbesar terjadi pada setpoint 50°C, yaitu MAX6675 membaca 51,7°C dengan error sebesar 3,4%, sedangkan perbedaan terkecil terjadi pada setpoint 60°C dengan error sebesar 0,5%. Hasil pengujian secara keseluruhan menghasilkan nilai MSE sebesar 0,99°C², yang menunjukkan bahwa penyimpangan pembacaan MAX6675 terhadap temperatur referensi TC4S relatif kecil.

Untuk memberikan gambaran visual mengenai hubungan antara temperatur yang ditampilkan oleh TC4S dan hasil pembacaan sensor MAX6675, data hasil pengukuran juga disajikan dalam bentuk grafik seperti ditunjukkan pada Gambar 5- 1.



Gambar 5- 1 Grafik Perbandingan Pembacaan TC4S dan MAX6675.

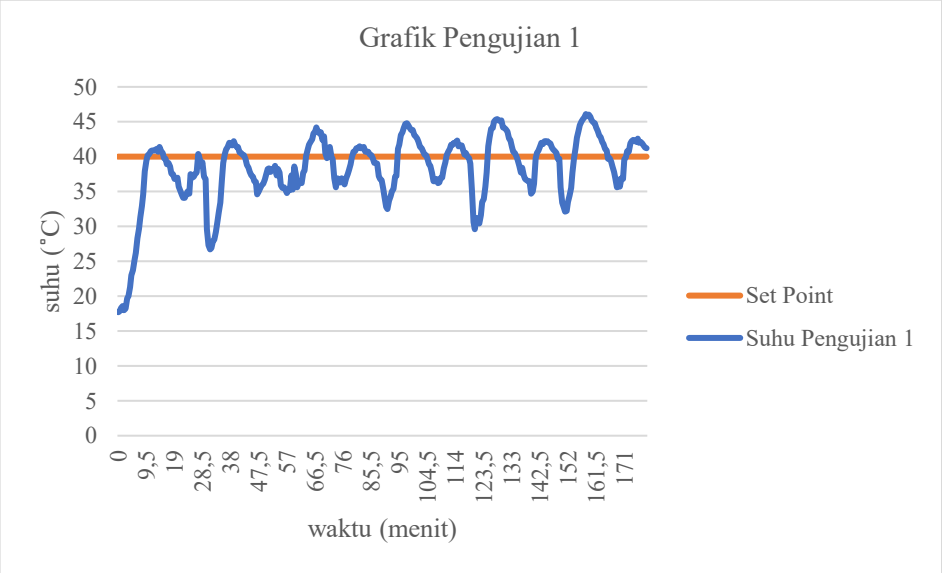
5.3.2 Hasil Monitoring Temperatur Selama Pengeringan

Setelah dilakukan pengujian akurasi sistem monitoring temperatur, tahap selanjutnya adalah pengujian monitoring temperatur selama proses pengeringan jahe. Pengujian ini bertujuan untuk memperoleh karakteristik perubahan temperatur di dalam ruang pengering sejak proses pemanasan dimulai hingga proses pengeringan selesai. Data temperatur direkam secara otomatis oleh ESP32 dan

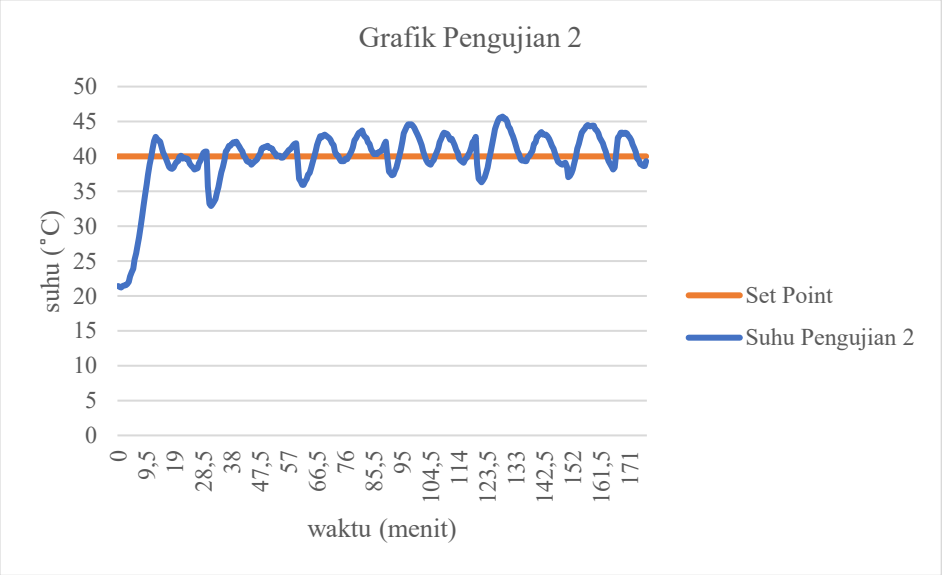
disimpan pada Google Spreadsheet dengan interval pencatatan yang telah ditentukan.

Sebelum dilakukan analisis, data temperatur hasil pembacaan sensor thermocouple diproses menggunakan filter *Infinite Impulse Response* (IIR) berdasarkan persamaan 2- 8. Penerapan filter ini bertujuan untuk mengurangi fluktuasi pembacaan yang disebabkan oleh gangguan (*noise*) sehingga diperoleh data temperatur yang lebih stabil tanpa mengubah karakteristik respon sistem secara signifikan.

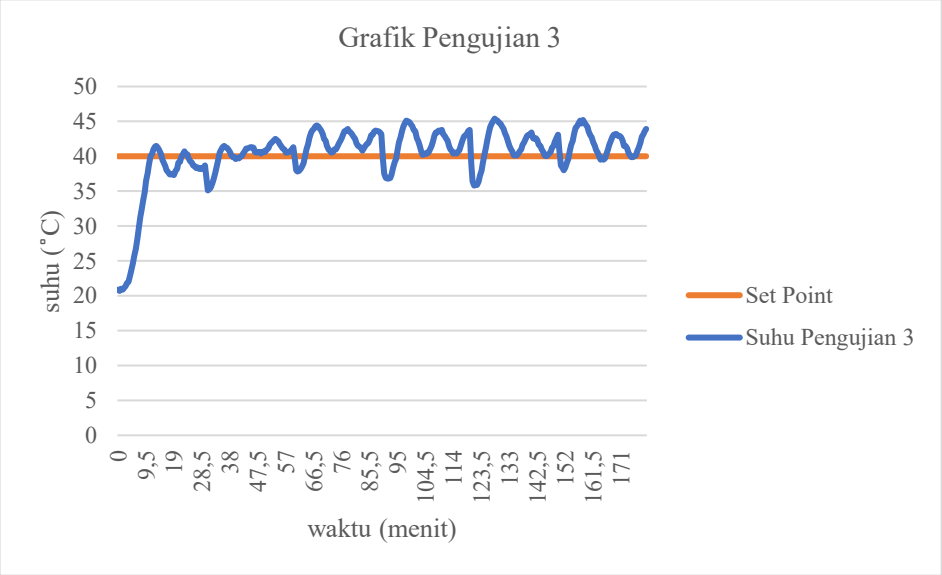
Pengujian dilakukan menggunakan dua skenario. Skenario pertama merupakan pengujian karakteristik pengeringan yang dilaksanakan sebanyak tiga kali pengulangan dengan durasi masing-masing selama tiga jam. Pada setiap pengulangan, temperatur dicatat secara kontinu selama proses pengeringan berlangsung. Hasil monitoring temperatur pada masing-masing pengulangan disajikan pada Gambar 5- 2 hingga Gambar 5- 4. Hasil pembacaan suhu pengujian dapat dilihat di Lampiran 7 sampai dengan Lampiran 10.



Gambar 5- 2 Grafik Monitoring Temperatur Pengulangan I

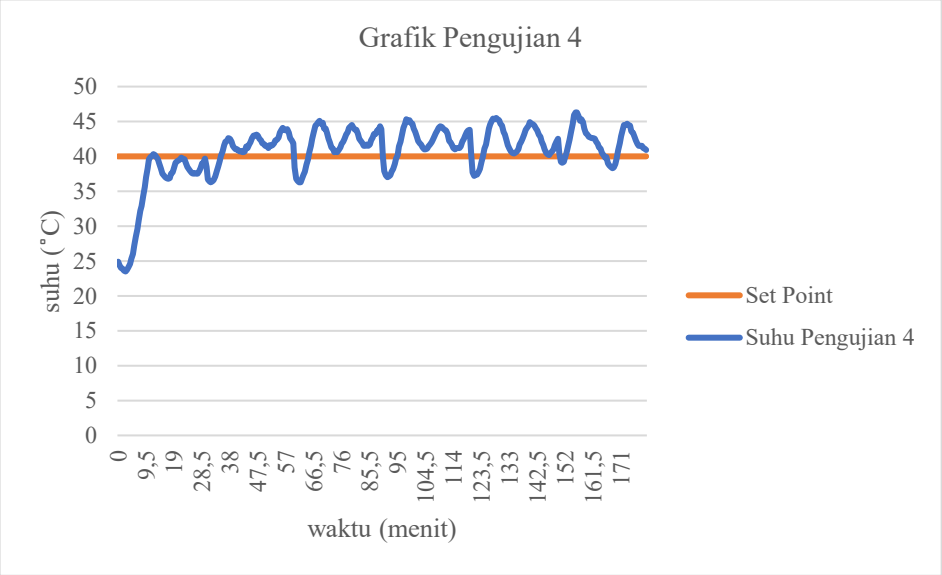


Gambar 5- 3 Grafik Monitoring Temperatur Pengulangan II



Gambar 5- 4 Grafik Monitoring Temperatur Pengulangan III

Selain pengujian karakteristik pengeringan, dilakukan pula pengujian operasional sistem selama tiga jam secara kontinu tanpa penghentian proses. Pengujian ini bertujuan untuk mengevaluasi kestabilan temperatur selama alat beroperasi dalam kondisi normal. Hasil monitoring temperatur pada pengujian operasional sistem disajikan pada Gambar 5- 5.



Gambar 5- 5 Grafik Monitoring Temperatur Pengujian Operasional Sistem

Berdasarkan hasil monitoring temperatur pada Pengujian I, Pengujian II, Pengujian III, dan pengujian operasional sistem, dapat diketahui bahwa sistem kendali suhu mampu merespons perubahan temperatur dan mengarahkan suhu menuju nilai set point 40 °C. Pada tahap awal setiap pengujian, temperatur meningkat dari kondisi suhu awal sekitar 18–24 °C hingga mencapai set point. Setelah mencapai set point, temperatur tidak langsung berada pada kondisi stabil, tetapi mengalami kenaikan dan penurunan secara berulang. Pada beberapa kondisi, temperatur mengalami overshoot hingga mencapai kisaran 45–46 °C, sedangkan pada kondisi tertentu temperatur juga mengalami penurunan hingga berada di bawah set point. Fluktuasi tersebut terjadi karena adanya karakteristik perpindahan panas pada ruang dehydrator serta respons sistem pengendalian dalam mengatur kerja elemen pemanas berdasarkan perubahan temperatur yang terbaca oleh sensor.

Secara keseluruhan, keempat pengujian menunjukkan pola respons yang relatif sama, yaitu suhu meningkat menuju set point, mengalami overshoot, kemudian menurun dan kembali mendekati nilai acuan. Meskipun masih terdapat fluktuasi, temperatur sebagian besar berada di sekitar nilai set point. Jika digunakan batas toleransi ±10% dari set point 40 °C, maka rentang temperatur yang dapat diterima adalah antara 36 °C hingga 44 °C. Berdasarkan grafik, sebagian besar respons temperatur berada dalam atau kembali menuju daerah toleransi tersebut

setelah mengalami penyimpangan. Hal ini menunjukkan bahwa sistem kendali yang dirancang telah mampu melakukan pengendalian temperatur secara otomatis dan mempertahankan suhu di sekitar nilai yang diinginkan. Namun, adanya beberapa overshoot dan undershoot menunjukkan bahwa respons sistem masih dapat dioptimalkan, terutama melalui penyesuaian parameter kendali, agar fluktuasi temperatur dapat dikurangi dan sistem dapat mencapai kondisi stabil dengan lebih cepat.

Hasil monitoring temperatur tersebut selanjutnya digunakan sebagai dasar dalam menganalisis performa sistem kendali PD yang dibahas pada Subbab 5.2.3.

5.3.3 Analisis Respon Sistem Kendali PD

Analisis respon sistem kendali PD (*Proportional-Derivative*) dilakukan untuk mengevaluasi kemampuan *temperature controller* TC4S dalam mengendalikan temperatur ruang pengering agar mencapai dan mempertahankan nilai *setpoint* selama proses pengeringan berlangsung. Analisis ini dilakukan berdasarkan data temperatur hasil monitoring yang telah disajikan pada Subbab 5.3.2.

Pada pengujian sistem kendali, *temperature controller* TC4S menggunakan parameter *Proportional Band* $= 10$ dan *Derivative Time* $= 5$, sedangkan parameter *Integral Time* $= 0$. Dengan demikian, sistem pengendalian yang diterapkan bekerja menggunakan aksi kendali PD (*Proportional-Derivative*), karena tidak terdapat aksi integral dalam proses pengendalian temperatur. Parameter *Proportional Band* berperan dalam menghasilkan respons kendali berdasarkan selisih antara temperatur aktual dan nilai *setpoint*, sedangkan parameter *Derivative Time* berperan dalam merespons perubahan temperatur untuk membantu mengurangi perubahan temperatur yang terlalu cepat dan meredam kecenderungan terjadinya *overshoot*.

Evaluasi respon sistem dilakukan menggunakan parameter *rise time*, *settling time*, *maximum overshoot*, dan *steady-state error*. Parameter *rise time* digunakan untuk mengetahui waktu yang dibutuhkan sistem sejak proses pemanasan dimulai hingga temperatur mencapai sekitar 90% dari nilai *setpoint*. Nilai *rise time* dihitung menggunakan persamaan 2- 4. Semakin kecil nilai *rise time*, semakin cepat sistem mencapai temperatur operasi yang diinginkan.

Setelah temperatur mendekati nilai *setpoint*, dilakukan analisis terhadap *settling time* menggunakan persamaan 2- 5. Parameter ini menunjukkan waktu yang diperlukan sistem hingga temperatur berada pada daerah toleransi dan tetap stabil tanpa mengalami penyimpangan yang berarti. Nilai *settling time* menggambarkan kemampuan sistem dalam mencapai kondisi operasi yang stabil. Batas toleransi yang digunakan adalah ±10% dari nilai akhir.

Selain itu, dilakukan analisis terhadap *maximum overshoot* menggunakan persamaan 2- 6 untuk mengetahui besarnya kenaikan temperatur maksimum yang melampaui nilai *setpoint* selama proses transien. Nilai *maximum overshoot* digunakan untuk mengevaluasi kemampuan aksi kendali PD dalam meredam kenaikan temperatur yang berlebihan sehingga risiko pemanasan berlebih dapat dikurangi.

Parameter terakhir yang dianalisis adalah *steady-state error* menggunakan Persamaan 2- 7. Parameter ini digunakan untuk mengetahui selisih antara temperatur pada kondisi tunak dengan nilai *setpoint*. Nilai *steady-state error* menjadi parameter yang penting dalam sistem kendali PD karena tidak adanya aksi integral (Time Integral $= 0$) dapat menyebabkan masih terdapat penyimpangan antara temperatur aktual dengan nilai *setpoint* pada kondisi tunak.

Hasil perhitungan parameter respon sistem kendali PD dari setiap pengujian disajikan pada Tabel 5.4.

Tabel 5- 4 Hasil Analisis Respon Sistem Kendali PD

Parameter	**Pengulangan I**	**Pengulangan II**	**Pengulangan III**	**Rata-rata**
Rise Time (menit)	11	12	14	12,33
Settling Time (menit)	18	19	19	18,67
Maximum Overshoot (%)	13,23	12,47	12,28	12,66
Steady-State Error (°C)	1,20	1,10	3,10	1,80

Secara keseluruhan, analisis respon sistem kendali PD memberikan gambaran mengenai performa sistem dalam mengarahkan temperatur ruang pengering menuju nilai *setpoint* selama proses pengeringan jahe. Berdasarkan hasil perhitungan pada Tabel 5- 4, hasil analisis pada tiga kali pengujian menunjukkan bahwa sistem memiliki rata-rata *rise time* sebesar 12,33 menit. Sementara itu, waktu rata-rata yang diperlukan sistem untuk mencapai daerah toleransi ±10% dari *setpoint* 40°C, yaitu pada rentang 36°C hingga 44°C, adalah sebesar 18,67 menit. Hasil tersebut menunjukkan bahwa sistem mampu merespons proses pemanasan dan membawa temperatur menuju daerah operasi yang mendekati *setpoint* dengan waktu yang relatif konsisten pada setiap pengujian.

Nilai rata-rata *maximum overshoot* yang diperoleh sebesar 12,66% menunjukkan bahwa temperatur masih mengalami kenaikan melebihi nilai *setpoint* sebelum kembali menurun dan mendekati temperatur yang diinginkan. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa meskipun aksi derivatif telah digunakan untuk membantu meredam perubahan temperatur, respons sistem masih mengalami kenaikan temperatur yang melampaui *setpoint*.

Selain itu, rata-rata *steady-state error* sebesar 1,80°C menunjukkan bahwa pada kondisi tunak masih terdapat selisih antara temperatur aktual dengan nilai *setpoint*. Kondisi ini perlu diperhatikan karena sistem yang digunakan tidak memiliki aksi integral, yaitu *Integral Time* = 0. Tidak adanya aksi integral menyebabkan sistem kendali PD tidak secara khusus melakukan koreksi terhadap kesalahan yang menetap secara terus-menerus, sehingga masih memungkinkan terjadinya *steady-state error*.

Secara keseluruhan, sistem kendali PD yang diterapkan pada *temperature controller* TC4S telah mampu membawa temperatur ruang pengering menuju nilai *setpoint* 40°C dan mempertahankan temperatur di sekitar nilai tersebut. Namun, berdasarkan nilai *maximum overshoot* dan *steady-state error* yang diperoleh, respons temperatur masih mengalami penyimpangan dan fluktuasi selama proses pengendalian. Oleh karena itu, konfigurasi parameter kendali yang digunakan masih dapat dikembangkan lebih lanjut untuk meningkatkan kestabilan respons sistem dan mengurangi penyimpangan temperatur terhadap nilai *setpoint*. Hasil

evaluasi ini selanjutnya dikaitkan dengan karakteristik proses pengeringan dan perubahan massa jahe yang dibahas pada Subbab 5.4.

5.4 Hasil Pengujian Pengeringan Jahe

Pengujian pengeringan jahe dilakukan untuk mengevaluasi kemampuan sistem *dehydrator* listrik dalam mengurangi massa bahan akibat proses penguapan kadar air selama pengeringan. Selain digunakan untuk mengetahui karakteristik perubahan massa jahe, pengujian ini juga bertujuan untuk mengevaluasi efektivitas proses pengeringan yang berlangsung pada temperatur yang dikendalikan oleh sistem.

Pengujian dilakukan menggunakan dua skenario. Skenario pertama merupakan pengujian karakteristik pengeringan yang dilaksanakan sebanyak tiga kali pengulangan dengan durasi masing-masing selama tiga jam. Pada setiap pengulangan, massa jahe diukur setiap 30 menit sehingga diperoleh data perubahan massa selama proses pengeringan. Data hasil penimbangan tersebut digunakan untuk mengamati karakteristik penurunan massa, menghitung persentase penyusutan massa berdasarkan persamaan 2- 9, serta menentukan laju pengeringan menggunakan persamaan 2- 10.

Skenario kedua merupakan pengujian operasional sistem yang dilakukan selama tiga jam secara kontinu tanpa penghentian proses pengeringan. Pada pengujian ini, massa jahe diukur sebelum dan setelah proses pengeringan selesai untuk mengetahui penyusutan massa total yang terjadi selama alat beroperasi. Data hasil pengujian pengeringan selanjutnya disajikan dalam bentuk tabel dan grafik untuk memperlihatkan perubahan massa selama proses pengeringan berlangsung. Berdasarkan data tersebut dilakukan analisis terhadap karakteristik penyusutan massa dan laju pengeringan sehingga dapat diketahui efektivitas alat dalam mengeringkan jahe pada kondisi operasi yang telah ditentukan.

Hasil pengujian pengeringan jahe disajikan secara bertahap pada subbab berikutnya. Subbab 5.4.1 membahas hasil penimbangan massa selama proses pengeringan, Subbab 5.4.2 membahas analisis penyusutan massa berdasarkan

posisi tray, sedangkan Subbab 5.4.3 membahas analisis laju pengeringan berdasarkan data hasil penimbangan yang telah diperoleh.

5.4.1 Massa Hasil Pengujian Pengeringan Jahe

Penimbangan massa dilakukan untuk mengetahui perubahan massa jahe selama proses pengeringan berlangsung. Pengujian ini bertujuan untuk memperoleh data karakteristik penurunan massa sebagai dasar dalam menganalisis penyusutan massa dan laju pengeringan pada subbab berikutnya. Pengujian dilaksanakan sebanyak tiga kali pengulangan dengan durasi masing-masing selama tiga jam.

Pada setiap pengulangan, massa jahe diukur sebelum proses pengeringan dimulai sebagai massa awal, kemudian dilakukan penimbangan setiap 30 menit hingga proses pengeringan selesai. Dengan demikian, pada setiap pengulangan diperoleh tujuh titik data pengukuran yang terdiri atas massa awal dan enam data hasil penimbangan selama proses pengeringan.

Hasil penimbangan massa pada masing-masing pengulangan disajikan pada Tabel 5- 5 sampai dengan Tabel 5- 8 dan Lampiran 2 sampai dengan Lampiran 5.

Tabel 5- 5 Hasil Penimbangan Massa Pengulangan I

Waktu (menit)	**Massa Jahe (gram)**				
	Tray 1 (Atas)	**Tray 2 (Tengah)**	**Tray 3 (Bawah)**	**Total (gram)**	**Persentase (%)**
0	100	100	100	300	0
30	88	85	71	244	18.6
60	73	67	52	192	36
90	58	53	41	152	49.3
120	45	39	33	117	61
150	36	30	27	93	69
180	28	24	22	74	75.3

Tabel 5- 6 Hasil Penimbangan Massa Pengulangan II

Waktu (menit)	**Massa Jahe (gram)**				
	Tray 1 (Atas)	**Tray 2 (Tengah)**	**Tray 3 (Bawah)**	**Total (gram)**	**Persentase (%)**
0	100	100	100	300	0
30	82	76	61	219	27
60	59	53	41	153	49
90	38	34	30	102	66
120	25	23	22	70	76.6
150	18	17	17	52	82.6
180	15	15	14	44	85.3

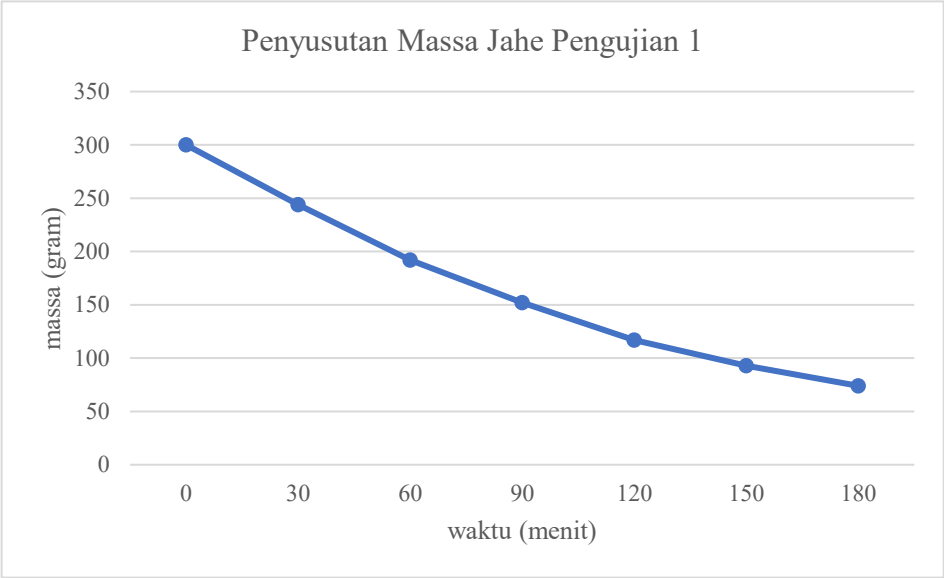
Tabel 5- 7 Hasil Penimbangan Massa Pengulangan III

Waktu (menit)	**Massa Jahe (gram)**				
	Tray 1 (Atas)	**Tray 2 (Tengah)**	**Tray 3 (Bawah)**	**Total (gram)**	**Persentase (%)**
0	100	100	100	300	0
30	78	74	68	220	26.6
60	50	49	40	139	53.6
90	33	33	29	95	68.3
120	24	25	24	73	75.6
150	21	22	21	64	78.6
180	21	21	20	62	79.3

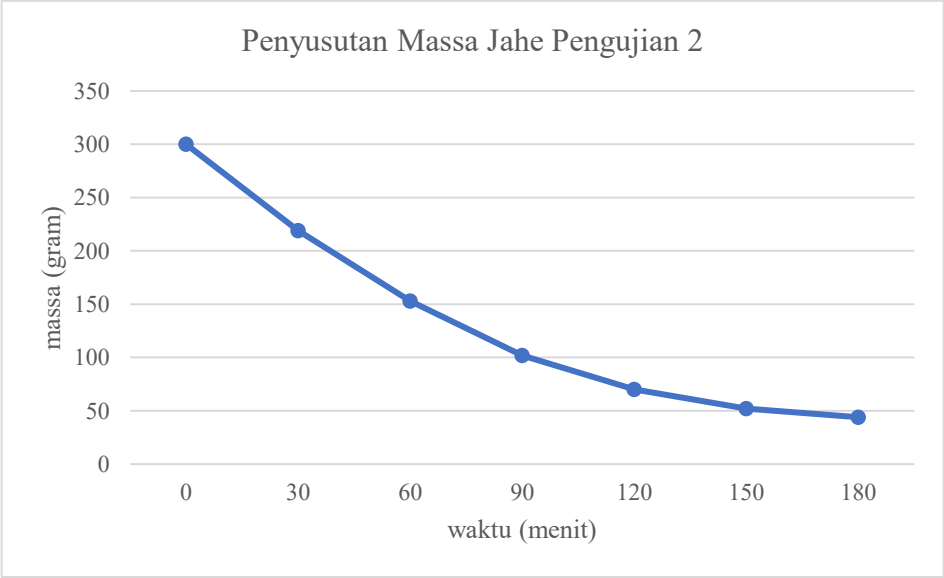
Tabel 5- 8 Hasil Penimbangan Massa Pengujian Operasional Sistem

Waktu (menit)	**Massa Jahe (gram)**		
	Tray 1 (Atas)	**Tray 2 (Tengah)**	**Tray 3 (Bawah)**
0	100	100	100
180	20	20	17

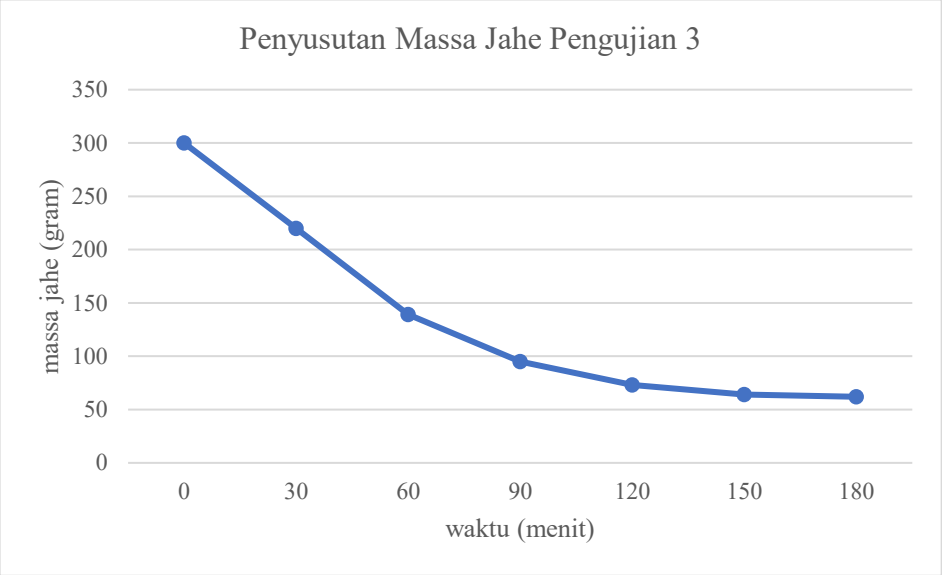
Untuk mempermudah pengamatan terhadap perubahan massa selama proses pengeringan, data hasil penimbangan dari masing-masing pengulangan disajikan dalam bentuk grafik sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 5- 6 sampai dengan Gambar 5- 8.



Gambar 5- 6 Grafik Perubahan Massa Jahe Pengulangan I



Gambar 5- 7 Grafik Perubahan Massa Jahe Pengulangan II



Gambar 5- 8 Grafik Perubahan Massa Jahe Pengulangan III

Berdasarkan hasil penimbangan yang diperoleh, terlihat bahwa massa jahe mengalami perubahan selama proses pengeringan berlangsung. Penurunan massa terjadi sebagai akibat berkurangnya kandungan air pada bahan selama proses pemanasan. Besarnya perubahan massa pada setiap interval waktu akan dianalisis lebih lanjut pada subbab berikutnya untuk mengetahui karakteristik penyusutan massa dan laju pengeringan yang terjadi.

Berdasarkan hasil penimbangan massa jahe pada Pengulangan I, II, dan III, terlihat bahwa massa jahe mengalami penurunan secara bertahap seiring bertambahnya waktu pengeringan. Penurunan massa terjadi akibat penguapan kandungan air dari jahe selama proses pemanasan di dalam *dehydrator.*

Pada Pengulangan I, massa total jahe berkurang dari 300 gram menjadi 74 gram dengan persentase penurunan sebesar 75,3%. Pada Pengulangan II, massa akhir sebesar 44 gram dengan persentase penurunan sebesar 85,3%, sedangkan pada Pengulangan III massa akhir sebesar 62 gram dengan persentase penurunan sebesar 79,3%. Hasil tersebut menunjukkan bahwa proses pengeringan mampu mengurangi massa jahe secara signifikan pada setiap pengulangan.

Perbedaan hasil penurunan massa antar pengulangan dapat dipengaruhi oleh kondisi awal bahan, ukuran dan ketebalan potongan jahe, serta distribusi suhu dan

sirkulasi udara panas di dalam ruang dehydrator. Meskipun terdapat perbedaan hasil, seluruh pengujian menunjukkan pola penurunan massa yang konsisten.

Pada pengujian operasional sistem, massa total jahe berkurang dari 300 gram menjadi 57 gram setelah pengeringan selama 180 menit. Hal tersebut menunjukkan penurunan massa sebesar 243 gram atau sekitar 81%. Dengan demikian, sistem dehydrator yang dirancang mampu menjalankan proses pengeringan jahe dengan baik, yang ditunjukkan oleh berkurangnya massa bahan akibat proses penguapan air selama pengeringan.

5.4.2 Analisis Pengurangan Massa Berdasarkan Posisi Tray

Analisis pengurangan massa berdasarkan posisi tray dilakukan untuk mengetahui kecenderungan performa pengeringan jahe pada bagian atas, tengah, dan bawah ruang pengering. Analisis dilakukan berdasarkan data hasil penimbangan pada Tabel 5-4, Tabel 5-5, Tabel 5-6, dan Tabel 5-7. Masing-masing tray memiliki massa awal sebesar 100 gram, sehingga persentase pengurangan massa dapat digunakan sebagai indikator untuk membandingkan hasil pengeringan pada setiap posisi tray.

Berdasarkan data pada Tabel 5-4 sampai Tabel 5-7, Tray 1 bagian atas menghasilkan pengurangan massa rata-rata sebesar 79,00%**,** Tray 2 bagian tengah sebesar 80,25%, dan Tray 3 bagian bawah sebesar 81,50%**.** Berdasarkan nilai tersebut, Tray 3 menunjukkan pengurangan massa rata-rata paling tinggi, diikuti oleh Tray 2 dan Tray 1. Hasil ini menunjukkan adanya kecenderungan bahwa proses pengeringan pada bagian bawah ruang pengering berlangsung sedikit lebih efektif dibandingkan bagian tengah dan atas.

Perbedaan hasil pengurangan massa tersebut dapat dikaitkan dengan distribusi panas di dalam ruang pengering. Selama proses pengeringan, panas yang dihasilkan oleh heater didistribusikan ke ruang pengering sehingga setiap posisi tray menerima kondisi termal yang berbeda. Perbedaan kondisi tersebut dapat memengaruhi proses penguapan air dari jahe. Posisi yang menerima panas lebih efektif akan cenderung menghasilkan pelepasan air yang lebih besar sehingga massa bahan setelah pengeringan menjadi lebih rendah.

Kecenderungan tersebut terlihat dari hasil pengujian, di mana Tray 3 memiliki rata-rata pengurangan massa sebesar 81,50%, sedangkan Tray 2 dan Tray 1 masing-masing sebesar 80,25% dan 79,00%. Meskipun demikian, selisih rata-rata antartray hanya sebesar 2,50% antara Tray 3 dan Tray 1. Nilai tersebut menunjukkan bahwa distribusi panas di dalam ruang pengering secara umum sudah mampu mendukung proses pengeringan pada ketiga posisi tray dengan hasil yang relatif berdekatan.

Jika dilihat dari keseluruhan pengujian, Tray 1 menghasilkan pengurangan massa sebesar 72–85%**,** Tray 2 sebesar 76–86%, dan Tray 3 sebesar 78–85%. Variasi tersebut menunjukkan bahwa hasil pengeringan tidak hanya dipengaruhi oleh posisi tray, tetapi juga dapat dipengaruhi oleh kondisi bahan seperti ukuran dan ketebalan potongan jahe. Dengan demikian, perbedaan pengurangan massa antartray dapat digunakan untuk melihat kecenderungan keseragaman distribusi panas dan hasil pengeringan di dalam ruang pengering.

Secara keseluruhan, ketiga posisi tray menunjukkan performa pengeringan yang relatif baik dengan tingkat pengurangan massa yang tinggi. Tray 3 bagian bawah memiliki kecenderungan performa pengeringan paling tinggi, kemudian Tray 2 bagian tengah dan Tray 1 bagian atas. Perbedaan yang relatif kecil antarposisi menunjukkan bahwa distribusi panas di dalam ruang pengering sudah cukup merata untuk mendukung proses pengeringan, meskipun masih terdapat variasi hasil pada masing-masing tray.

5.4.3 Analisis Laju Pengeringan

Analisis laju pengeringan dilakukan untuk mengetahui kecepatan pengurangan massa jahe selama proses pengeringan berlangsung. Laju pengeringan merupakan salah satu parameter penting dalam mengevaluasi performa alat pengering karena menunjukkan kemampuan sistem dalam menguapkan kandungan air dari bahan pada setiap interval waktu pengeringan.

Perhitungan laju pengeringan dilakukan berdasarkan data hasil penimbangan massa yang telah diperoleh pada Subbab 5.3.1 menggunakan persamaan 2.10. Perhitungan dilakukan pada setiap interval pengukuran selama proses pengeringan sehingga diperoleh perubahan laju pengeringan terhadap waktu pada masing-

masing pengulangan. Hasil perhitungan laju pengeringan masing-masing pengulangan disajikan dalam Tabel 5- 9 sampai dengan 5- 11.

Tabel 5- 9 Hasil Perhitungan Laju Pengeringan Pengulangan I

Interval Waktu (menit)	Laju Pengeringan (gram/menit)
0–30	1.8
30–60	1.7
60–90	1.3
90–120	1.1
120–150	0.8
150–180	0.6

Tabel 5- 10 Hasil Perhitungan Laju Pengeringan Pengulangan II

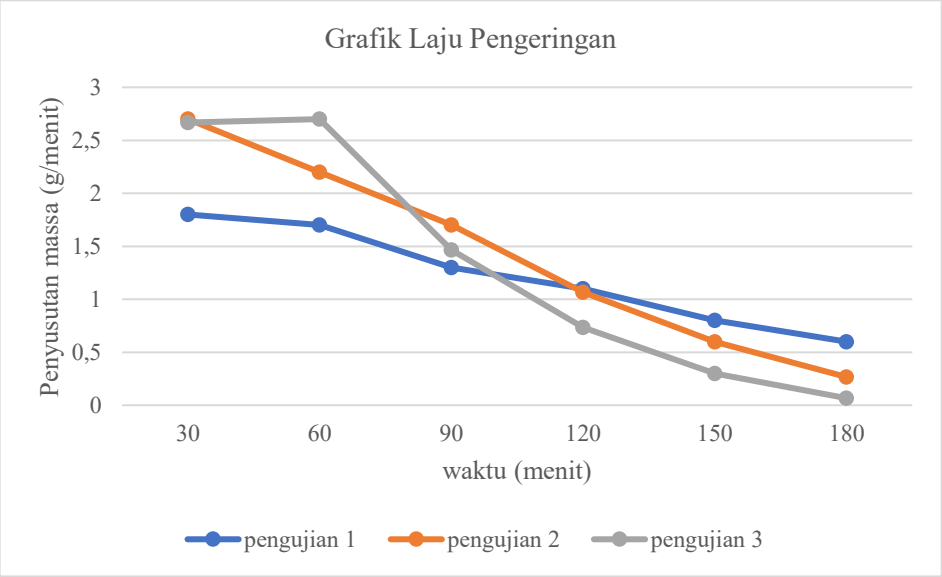
Interval Waktu (menit)	Laju Pengeringan (gram/menit)
0–30	2.7
30–60	2.2
60–90	1.7
90–120	1.06
120–150	0.6
150–180	0.26

Tabel 5- 11 Hasil Perhitungan Laju Pengeringan Pengulangan III

Interval Waktu (menit)	Laju Pengeringan (gram/menit)
0–30	2.6
30–60	2.7
60–90	1.4
90–120	0.7

120–150	0.3
150–180	0.06

Untuk memperlihatkan perubahan laju pengeringan selama proses berlangsung disajikan dalam bentuk grafik sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 5- 9.



Gambar 5- 9 Grafik Laju Pengeringan Jahe Selama Proses Pengeringan

Berdasarkan hasil yang ditunjukkan pada Gambar 5-9, laju pengeringan umumnya menunjukkan nilai yang lebih tinggi pada tahap awal proses pengeringan. Kondisi ini disebabkan oleh kandungan air bebas (*free water*) yang masih cukup tinggi sehingga proses penguapan berlangsung lebih cepat. Seiring bertambahnya waktu pengeringan, kandungan air pada jahe semakin berkurang sehingga laju perpindahan uap air dari dalam bahan menuju permukaan menjadi lebih lambat. Akibatnya, nilai laju pengeringan cenderung mengalami penurunan hingga akhir proses pengeringan.

Grafik laju pengeringan jahe pada Pengujian I, Pengujian II, dan Pengujian III menunjukkan kecenderungan penurunan laju pengeringan seiring dengan bertambahnya waktu proses. Laju pengeringan dihitung berdasarkan perubahan massa jahe pada setiap interval waktu pengamatan. Pada tahap awal proses pengeringan, laju penurunan massa cenderung lebih tinggi karena kandungan air

pada bahan masih relatif banyak. Kondisi tersebut menyebabkan proses penguapan air dari permukaan dan bagian dalam jahe berlangsung lebih cepat.

Pada Pengujian I, laju pengeringan mengalami penurunan secara bertahap dari sekitar 1,8 gram/menit pada interval awal menjadi sekitar 0,6 gram/menit pada interval akhir. Hal ini menunjukkan bahwa jumlah air yang dapat diuapkan dari bahan semakin berkurang seiring berlangsungnya proses pengeringan. Pada Pengujian II, laju pengeringan pada tahap awal relatif lebih tinggi, yaitu sekitar 2,7 gram/menit, kemudian menurun hingga mencapai sekitar 0,26 gram/menit pada akhir proses. Sementara itu, Pengujian III juga menunjukkan pola yang serupa, dengan laju pengeringan yang relatif tinggi pada awal proses, kemudian mengalami penurunan hingga sekitar 0,06 gram/menit pada interval akhir.

Perbedaan nilai laju pengeringan pada ketiga pengujian menunjukkan bahwa proses pelepasan air dari bahan tidak berlangsung dengan kecepatan yang sama. Kondisi awal jahe, seperti kandungan air awal, ukuran dan ketebalan irisan, serta posisi bahan pada tray dapat memengaruhi kecepatan pengeringan. Selain itu, perbedaan distribusi suhu dan aliran udara di dalam ruang dehydrator juga dapat menyebabkan perbedaan laju pengeringan pada setiap pengujian.

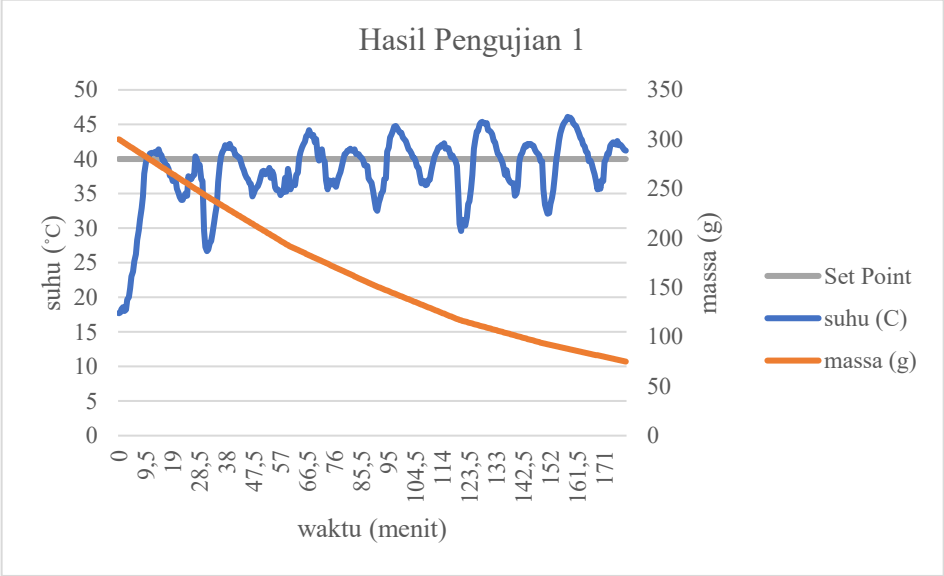
Meskipun terdapat perbedaan nilai laju pengeringan antar pengujian, ketiga grafik menunjukkan pola umum yang sama, yaitu laju pengeringan cenderung menurun seiring bertambahnya waktu. Pada tahap akhir pengeringan, penurunan laju menjadi lebih kecil karena sebagian besar kandungan air telah berkurang dan sisa air dalam bahan lebih sulit untuk diuapkan. Dengan demikian, hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem dehydrator mampu melakukan proses pengeringan secara bertahap hingga massa jahe terus mengalami penurunan selama proses berlangsung.

5.5 Pembahasan Keseluruhan Sistem

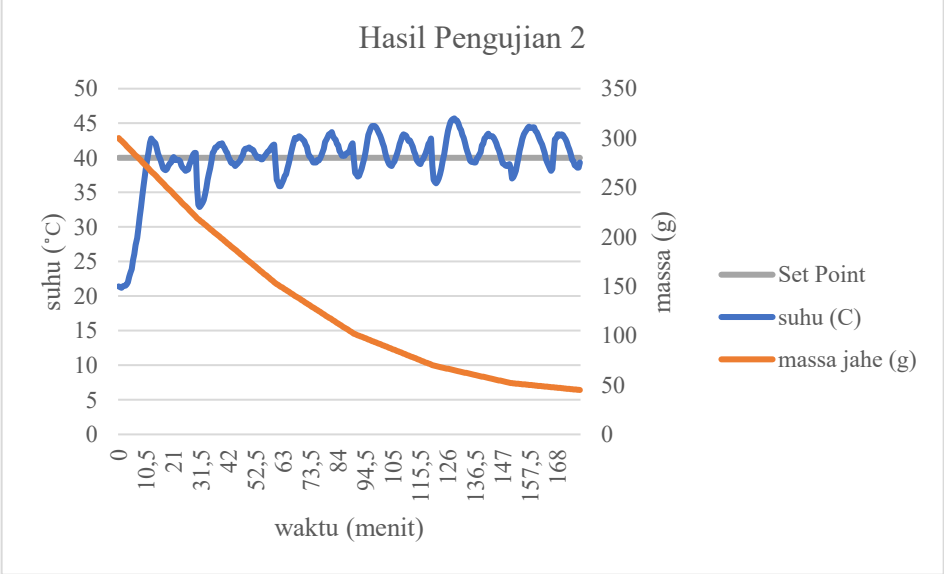
Berdasarkan seluruh hasil pengujian, kinerja *dehydrator* listrik dapat dievaluasi melalui tiga aspek utama, yaitu sistem monitoring temperatur, sistem kendali temperatur, dan hasil proses pengeringan jahe. Ketiga aspek tersebut menunjukkan bahwa alat telah mampu menjalankan proses pemanasan dan

pengeringan selama pengujian, dengan temperatur ruang pengering yang dipantau secara kontinu serta terjadi penurunan massa jahe selama proses pengeringan.

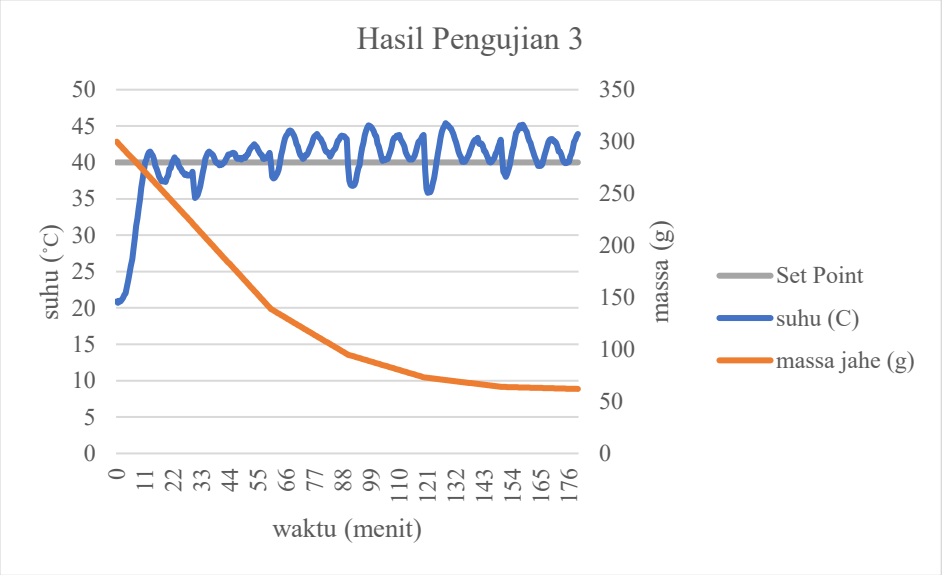
Keseluruhan pengujian dapat dilihat pada gambar 5- 10, gambar 5- 11, dan gambar 5- 12.



Gambar 5- 10 Hasil Pengujian 1



Gambar 5- 11 Hasil Pengujian 2



Gambar 5- 12 Hasil Pengujian 3

Pada sistem monitoring temperatur, hasil pengujian menunjukkan adanya perbedaan antara pembacaan sensor thermocouple tipe-K melalui modul MAX6675 dengan temperatur yang ditampilkan oleh TC4S. Pada setpoint 30°C, 40°C, 50°C, dan 60°C, pembacaan MAX6675 masing-masing sebesar 30,4°C, 40,9°C, 51,7°C, dan 60,3°C. Nilai error yang diperoleh masing-masing sebesar 1,3%, 2,25%, 3,4%, dan 0,5%. Error terbesar terjadi pada setpoint 50°C, sedangkan error terkecil terjadi pada setpoint 60°C. Dari seluruh data tersebut diperoleh nilai *Mean Squared Error* (MSE) sebesar 0,99°C^2. Data tersebut menunjukkan bahwa pembacaan MAX6675 memiliki penyimpangan terhadap pembacaan TC4S, tetapi nilai penyimpangan yang diperoleh pada pengujian masih relatif kecil.

Hasil monitoring temperatur selama proses pengeringan kemudian digunakan untuk melihat respons sistem kendali temperatur. Pada tiga kali pengulangan, diperoleh nilai *rise time* masing-masing 11, 12, dan 14 menit dengan rata-rata 12,33 menit. *Settling time* yang diperoleh masing-masing sebesar 18, 19, dan 19 menit dengan rata-rata 18,67 menit. *Maximum overshoot* masing-masing sebesar 13,23%, 12,47%, dan 12,28%, sedangkan *steady-state error* masing-masing sebesar 1,20°C, 1,10°C, dan 3,10°C dengan rata-rata 1,80°C. Berdasarkan data tersebut, sistem mampu membawa temperatur menuju daerah *setpoint*, tetapi selama proses masih terdapat *overshoot* dan penyimpangan temperatur pada kondisi tunak.

Nilai *rise time* yang relatif berdekatan pada ketiga pengulangan menunjukkan bahwa waktu yang diperlukan sistem untuk mencapai sekitar 90% dari nilai *setpoint* berada pada rentang 11–14 menit. *Settling time* berada pada rentang 18–19 menit. Sementara itu, *maximum overshoot* pada ketiga pengujian berada pada rentang 12,28–13,23%. Nilai *steady-state error* menunjukkan variasi yang lebih besar, yaitu 1,10–3,10°C. Dengan demikian, berdasarkan parameter yang diukur, sistem kendali mampu mencapai kondisi operasi yang ditentukan, tetapi respons temperatur belum sepenuhnya bebas dari penyimpangan.

Dari sisi proses pengeringan, seluruh pengujian menunjukkan adanya penurunan massa jahe dari massa awal 300 gram. Pada pengulangan I, massa akhir setelah 180 menit sebesar 74 gram dengan penyusutan massa sebesar 75,3%. Pada pengulangan II, massa akhir sebesar 44 gram dengan penyusutan sebesar 85,3%, sedangkan pada pengulangan III massa akhir sebesar 62 gram dengan penyusutan sebesar 79,3%. Dengan demikian, penyusutan massa akhir pada ketiga pengulangan berada pada rentang 75,3–85,3%. Perbedaan hasil tersebut menunjukkan bahwa jumlah pengurangan massa tidak sama pada setiap pengulangan.

Perbedaan hasil pengeringan juga terlihat berdasarkan posisi tray. Pada tiga kali pengulangan, Tray 1 bagian atas menghasilkan penyusutan massa sebesar 72%, 85%, dan 79%; Tray 2 bagian tengah sebesar 76%, 86%, dan 79%; sedangkan Tray 3 bagian bawah sebesar 78%, 85%, dan 80%. Pada pengujian operasional selama tiga jam secara kontinu, penyusutan massa pada Tray 1, Tray 2, dan Tray 3 masing-masing sebesar 80%, 83%, dan 80%. Data tersebut menunjukkan bahwa ketiga posisi tray sama-sama mengalami pengurangan massa yang cukup besar, tetapi hasilnya belum sepenuhnya sama antarposisi.

Perbedaan penyusutan massa antar-tray tidak dapat secara langsung digunakan untuk menyatakan bahwa salah satu tray menerima temperatur yang lebih tinggi, karena pada pengujian ini temperatur tidak diukur secara terpisah pada setiap posisi tray. Selain itu, data penelitian juga menunjukkan bahwa kondisi bahan dapat berbeda antar-pengujian, sehingga perbedaan hasil pengeringan tidak dapat seluruhnya dikaitkan dengan posisi tray. Oleh karena itu, data penyusutan massa antar-tray lebih tepat digunakan untuk melihat perbedaan hasil pengeringan pada

masing-masing posisi, bukan untuk menentukan distribusi temperatur secara langsung.

Jika ditinjau berdasarkan laju pengeringan, seluruh pengulangan menunjukkan kecenderungan penurunan nilai laju pengeringan seiring bertambahnya waktu. Pada pengulangan I, laju pengeringan menurun dari 1,8 gram/menit pada interval 0–30 menit menjadi 0,6 gram/menit pada interval 150–180 menit. Pada pengulangan II, laju pengeringan menurun dari 2,7 gram/menit menjadi 0,26 gram/menit, sedangkan pada pengulangan III menurun dari 2,6 gram/menit menjadi 0,06 gram/menit. Jika dirata-ratakan, laju pengeringan pada interval 0–30 menit sebesar 2,37 gram/menit, sedangkan pada interval 150–180 menit sebesar 0,31 gram/menit. Data tersebut menunjukkan bahwa pengurangan massa berlangsung lebih cepat pada awal proses dan semakin kecil pada akhir proses.

Apabila ketiga aspek tersebut dikaitkan, hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem monitoring dapat merekam temperatur selama proses, sistem kendali dapat membawa temperatur menuju *setpoint* dengan parameter respons yang terukur, dan proses pengeringan menghasilkan penurunan massa jahe. Namun, hasil pengujian juga menunjukkan adanya beberapa variasi, yaitu penyimpangan pembacaan MAX6675 terhadap TC4S, *maximum overshoot* dan *steady-state error* pada respons temperatur, serta perbedaan penyusutan massa antar-pengulangan dan antarposisi tray. Oleh karena itu, kinerja alat dapat dikatakan telah mampu menjalankan fungsi pemanasan, pengendalian temperatur, monitoring, dan pengeringan sesuai hasil pengujian, tetapi belum dapat dikatakan menghasilkan kondisi pengeringan yang sepenuhnya seragam.

Secara keseluruhan, hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem *dehydrator* listrik telah dapat digunakan untuk melakukan proses pengeringan jahe dengan pemantauan temperatur dan pengendalian temperatur menggunakan TC4S. Selama tiga jam pengujian, massa jahe pada seluruh tray mengalami penurunan, sedangkan laju pengeringan menunjukkan kecenderungan menurun terhadap waktu.