

Implementasi Algoritma PID untuk Pengontrolan Suhu Pada Mesin Pengering Cabai

Handri Toar^{1*}, Wasdoni Alfi², Illa Aryeni², Nanta Fakih Prebianto², Hana Mutialif Maulidiah³, Muammar Khadapi Arif Nasution², Micko Tomas⁴

¹Jurusan Teknik Elektro, Prodi Teknologi Rekayasa Pembangkit Energi, Politeknik Negeri Batam, Batam, Indonesia

²Jurusan Teknik Elektro, Prodi Teknologi Rekayasa Elektronika, Politeknik Negeri Batam, Batam, Indonesia

³Jurusan Teknik Elektro, Prodi Teknik Elektronika Manufaktur, Politeknik Negeri Batam, Batam, Indonesia

⁴Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Andalas, Padang, Indonesia

*Email: toar@polibatam.ac.id

Received on 20-03-2025 | Revised on 11-04-2025 | Accepted on 25-06-2025

Abstrak— Penelitian ini mengimplementasikan kontrol PID pada mesin pengering cabai untuk mempertahankan stabilitas suhu selama proses pengeringan. Pengaturan suhu optimal dicapai melalui mekanisme *tuning* PID dengan metode Ziegler-Nichols untuk mengatur parameter K_p, K_i, dan K_d yang dapat menghasilkan respon sistem yang stabil pada suhu *setpoint*. Mesin pengering terdiri dari sensor DHT22, pemanas, dan mikrokontroler ESP32, serta terintegrasi dengan aplikasi *Home Assistant* untuk pemantauan dan pengontrolan jarak jauh. Hasil pengujian menunjukkan bahwa pada suhu 60°C menghasilkan keseimbangan optimal antara kecepatan pengeringan dan kestabilan kelembaban. Implementasi kontrol PID berhasil menjaga suhu mendekati setpoint dengan *steady-state error* sebesar 0,98%, *overshoot* yang minimal dan *settling time* yang optimal. Proses pengeringan menghasilkan penurunan kadar air yang signifikan, dengan berat awal 1 kg menjadi 261 gr setelah pengeringan. *Tuning* PID menunjukkan efektivitas dalam meningkatkan kestabilan suhu dan kualitas akhir produk cabai kering, serta menjadi solusi dalam mengatasi kendala pengeringan cabai secara konvensional.

Kata kunci: Kestabilan suhu, Kontrol PID, Pengeringan cabai, Ziegler-Nichols

Abstract— This research implements PID control on a chilli dryer to maintain temperature stability during the drying process. Optimal temperature regulation is achieved through a PID tuning mechanism with the Ziegler-Nichols method to set the K_p, K_i, and K_d parameters that can produce a stable system response at the setpoint temperature. The dryer consists of DHT22 sensor, heater, and ESP32 microcontroller, and integrated for remote monitoring and control. Test results show that a temperature of 60°C produces an optimal balance between drying speed and moisture stability. The implementation of PID control managed to keep the temperature close to the setpoint with a steady-state error of 0.98%. The drying process resulted in a significant reduction in moisture content, with an initial weight of 1kg to 261gr after drying. The PID tuning showed effectiveness in improving the temperature stability and final quality of the dried chilli product.

Keywords: Chili drying, PID control, Temperature stability, Ziegler-Nichols

I. PENDAHULUAN

PENGERINGAN adalah salah satu metode pengawetan yang telah lama dikenal untuk memperpanjang umur simpan bahan makanan. Proses ini bertujuan untuk menghilangkan kadar air dari bahan pangan, sehingga menghambat pertumbuhan mikroorganisme penyebab pembusukan [1]. Dalam konteks pertanian dan teknologi pangan, pengeringan memiliki peran penting untuk mengatasi kerusakan pascapanen pada berbagai komoditas, salah satunya adalah cabai.

Cabai segar pada umumnya memiliki kandungan air yang tinggi sekitar 70-80%, yang membuatnya mudah rusak dan membusuk setelah dipanen [2]. Tingginya tingkat kerusakan ini menjadi salah satu tantangan utama dalam pengendalian kualitas cabai pascapanen. Cabai yang tidak ditangani dengan baik dapat mengalami penurunan mutu yang signifikan, seperti perubahan warna, tekstur, dan rasa [3]. Untuk mengatasi masalah ini, pengeringan cabai sering dilakukan guna menurunkan kadar air yang terkandung dalam cabai, sehingga mencegah pertumbuhan mikroorganisme, menjaga kualitasnya, dan memperpanjang umur simpannya.

Metode pengeringan cabai dapat dilakukan secara alami menggunakan sinar matahari atau dengan cara buatan menggunakan oven atau pengering listrik. Meskipun pengeringan alami lebih ekonomis, namun sangat dipengaruhi oleh kondisi cuaca dan waktu yang dibutuhkan lebih lama. Sebaliknya, pengeringan buatan lebih cepat dan proses yang lebih terkontrol, tetapi pengendalian suhu yang kurang tepat selama pengeringan dapat merusak kualitas cabai [4]. Penelitian menunjukkan bahwa suhu moderat selama pengeringan dapat mempertahankan kandungan *capsaicin* yang memberikan rasa pedas pada cabai [5], sedangkan suhu yang terlalu tinggi dapat mempercepat waktu pengeringan, tetapi dapat merusak warna dan aroma serta menyebabkan tekstur terlalu keras [6]. Sebaliknya, suhu yang terlalu rendah dapat memperpanjang waktu pengeringan dan meningkatkan risiko kontaminasi mikroba [7]. Untuk mengatasi tantangan ini diperlukan teknologi untuk pengendalian suhu. Salah satu sistem kontrol yang efektif digunakan adalah PID.

Penerapan algoritma *Proportional-Integral-Derivative* (PID) menjadi solusi dalam sistem pengontrolan suhu pada alat pengering cabai yang mampu menjaga stabilitas suhu sehingga berpotensi untuk meningkatkan dan mempertahankan kualitas produk akhir. Penerapan PID kontrol pada sistem pengeringan dapat mengurangi fluktuasi suhu hingga 15%, dan menghasilkan produk dengan kualitas yang lebih konsisten [8], memberikan respon yang cepat [9], dan meningkatkan stabilitas sistem [10].

Di Indonesia penerapan teknologi pengeringan otomatis pada cabai masih tergolong baru dan belum banyak diterapkan secara luas oleh petani. Namun, dengan meningkatnya permintaan pasar akan produk cabai kering, kebutuhan akan sistem pengeringan semakin mendesak [11]. Penerapan kontrol PID dalam sistem pengeringan cabai diharapkan dapat menjadi solusi untuk meningkatkan produktivitas dan kualitas produk cabai kering, serta memberikan nilai tambah bagi petani.

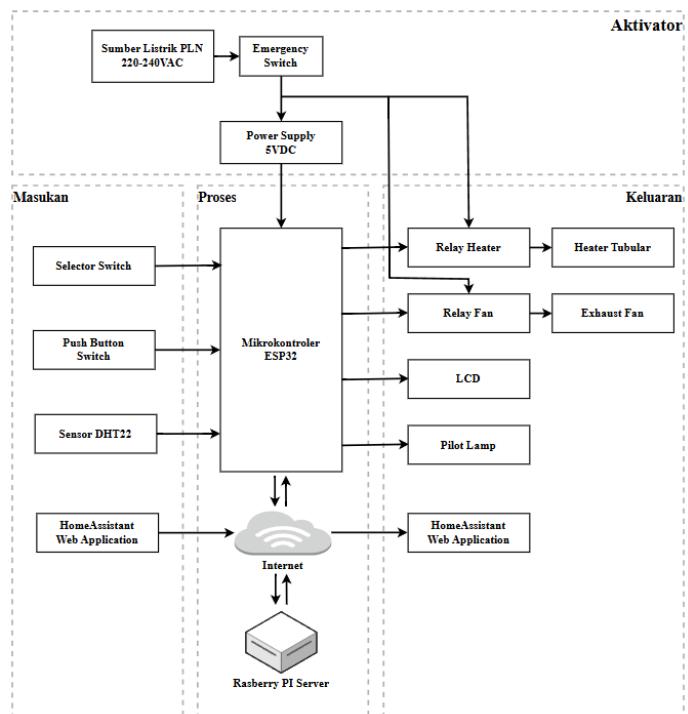
Penelitian ini bertujuan untuk merancang dan menguji sistem pengendalian suhu pada alat pengering cabai menggunakan algoritma PID kontrol. Dengan menggunakan metode penelitian eksperimen, penelitian ini akan menganalisis efektivitas kontrol PID dalam menjaga suhu optimal selama proses pengeringan dan dampaknya terhadap kualitas akhir produk cabai kering.

II. METODE

Penelitian ini menggunakan metode eksperimen untuk menguji efektivitas algoritma kontrol PID dalam mengendalikan suhu pada alat pengering cabai. Percobaan dilakukan dengan menggunakan alat pengering buatan yang dilengkapi dengan sensor suhu dan kelembaban. Parameter yang diukur meliputi suhu, kelembaban, dan hasil akhir cabai kering.

A. Perancangan Sistem

Sistem ini dirancang untuk mengatur suhu pengering cabai secara efisien dengan kontrol PID. Pendekatan ini memungkinkan sistem mempertahankan suhu pengeringan yang konsisten, terlepas dari fluktuasi kondisi lingkungan atau beban kerja. Sistem ini memerlukan beberapa komponen perangkat keras, termasuk sensor suhu, pemanas, dan mikrokontroler untuk pemrosesan data. Blok diagram sistem dari mesin pengering ini dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Desain sistem.

Pada blok diagram sistem menunjukkan bahwa sistem memiliki 4 komponen utama yaitu aktivator, masukan, proses dan keluaran. Aktivator menggunakan sumber listrik PLN 220-240VAC yang terhubung ke *Emergency Switch*, yang selanjutnya mendistribusikan daya ke *Power Supply 5VDC* dan *Relay Heater*. Bagian *input* terdiri dari *Selector Switch*, *Push Button Switch*, sensor DHT22 untuk mengukur suhu dan kelembaban, dan antarmuka Aplikasi Web *Home Assistant*. Mikrokontroler ESP32 berfungsi sebagai pusat pemrosesan sistem dan menerima masukan dari berbagai sumber serta mengontrol perangkat luaran. Melalui peladen *Raspberry Pi*, mikrokontroler ini terhubung ke internet dan memungkinkan aplikasi *Home Assistant* berkomunikasi dua arah. *Relay Heater* untuk mengontrol *Heater*, *Relay Fan* untuk mengontrol *Exhaust Fan*, *LCD* untuk menampilkan informasi tentang suhu dan kelembaban selama proses pengeringan, dan *Pilot Lamp* sebagai indikator visual. Selain itu, sistem dapat diintegrasikan dengan aplikasi web *Home Assistant* untuk memungkinkan pemantauan dan kontrol jarak jauh. Dengan opsi untuk dioperasikan secara otomatis atau manual, konfigurasi ini memungkinkan pengendalian suhu yang fleksibel. Selain itu, konfigurasi ini memiliki fitur keamanan yang mencakup *Emergency Switch* untuk pemutusan daya dalam situasi darurat.

Dengan sistem ini, cabai tidak lagi perlu dikeringkan dengan cara konvensional menggunakan sinar matahari. Sistem ini dilengkapi dengan kontrol PID (*Proportional, Integral, Derivative*), sehingga suhu dapat dipertahankan pada level yang diinginkan meskipun kondisi lingkungan atau beban kerja berubah.

B. Perancangan Mekanik

Alat ini dirancang untuk mendukung suhu tetap stabil selama proses pengeringan cabai. Desain mekanik mesin pengering cabai dapat dilihat pada Gambar 2.

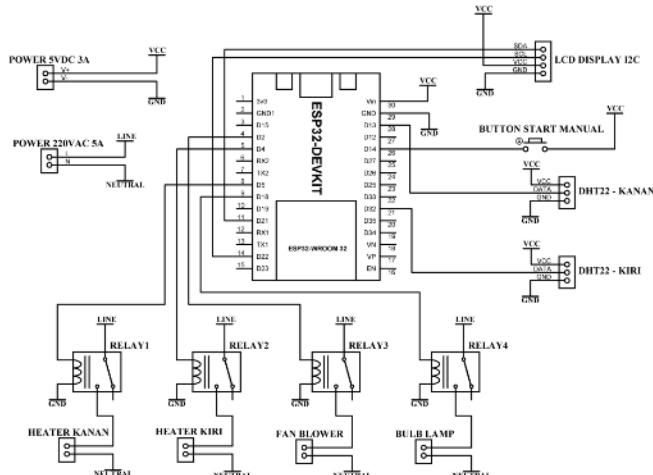


Gambar 2. Desain mekanik.

Desain mekanik pada alat pengering cabai ini berukuran 1000 x 720 x 520 mm dan dirancang untuk menggunakan kontrol suhu PID. Perangkat berbentuk kotak ini memiliki 4 kaki dan dipasangkan roda untuk memudahkan perpindahan ke berbagai tempat dimana cabai diproses. Strukturnya terdiri dari ruang pengering utama yang dapat diakses melalui pintu depan dan terdapat 2 buah rak yang dapat ditarik keluar, sehingga mudah untuk meletakkan dan mengambil cabai.

C. Perancangan Elektrikal

Perancangan elektrikal sistem ini terdiri dari beberapa komponen utama yang saling terintegrasi untuk menghasilkan sistem kontrol yang ideal, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.



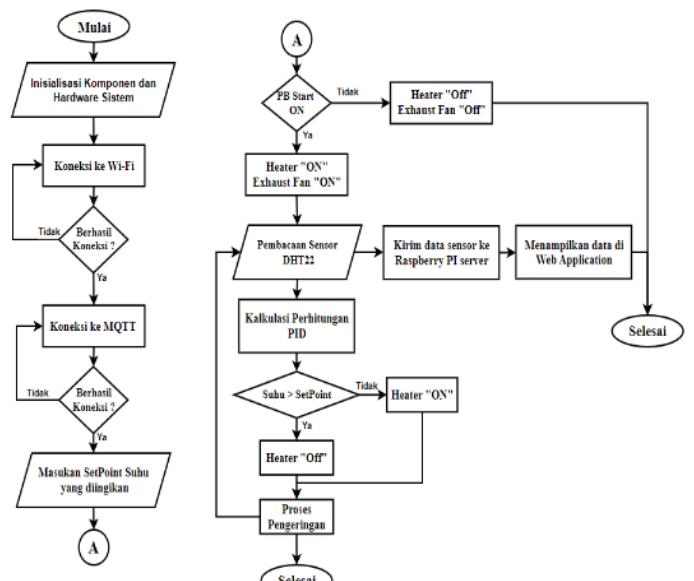
Gambar 3. Desain elektrikal.

Sistem ini terdiri dari dua sensor suhu DHT22 yang ditempatkan di sisi kiri dan kanan ruang pengering untuk memantau suhu udara secara langsung. Data suhu yang diperoleh dikirim ke mikrokontroler ESP32, lalu diproses menggunakan algoritma PID untuk mengontrol suhu secara presisi pada ruang pengering.

Heater dipasang pada samping dinding ruang pengering, menyalurkan panas lewat saluran udara. ESP32, sensor, dan relay disuplai oleh 5V DC 3A, sedangkan *heater* dan *fan blower* menggunakan AC 220V yang dikendalikan relay. Sistem dilengkapi dengan *push button start* manual pada panel kontrol untuk memulai proses pengendalian suhu.

D. Perancangan Perangkat Lunak

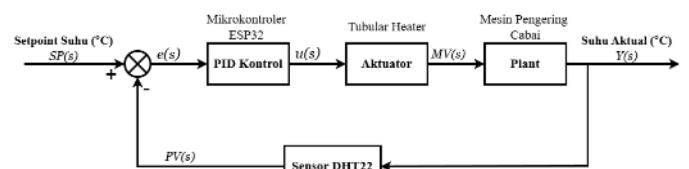
Perangkat lunak sistem pengering cabai ini dirancang dengan logika kontrol otomatis menggunakan kontrol PID untuk mengatur suhu pada titik yang diinginkan. Proses ini dimulai dengan inisialisasi komponen perangkat keras dan perangkat lunak. Sistem memeriksa koneksi Wi-Fi dan MQTT untuk memastikan mikrokontroler ESP32 dan server berkomunikasi. *Flowchart* perangkat lunak dapat dilihat pada Gambar 4.



Gambar 4. Diagram alir sistem.

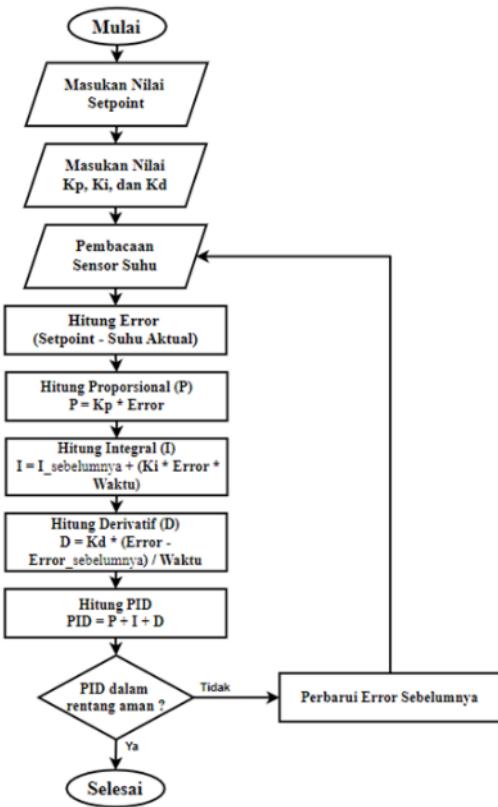
E. Perancangan Kontrol PID

Sistem kontrol PID pada alat pengering cabai berfungsi untuk mengontrol suhu pengering melalui mekanisme *close-loop* yang melibatkan beberapa komponen utama. *Setpoint* suhu ($SP(s)$) adalah nilai suhu target yang diinginkan dan dimasukkan ke dalam sistem. Selanjutnya, pengurangan kesalahan ($e(s)$) dihitung sebagai selisih antara suhu *setpoint* dengan suhu aktual yang diukur oleh sensor ($PV(s)$) yang berfungsi sebagai *input* untuk kontrol PID. Sinyal kontrol ($u(s)$) yang dihasilkan oleh algoritma PID digunakan untuk mengatur aktuator pemanas yang berfungsi untuk menambah atau mengurangi suhu di dalam ruang pengering sesuai dengan arahan dari pengontrol PID. Blok diagram PID pada mesin pengering cabai terdapat pada Gambar 5.



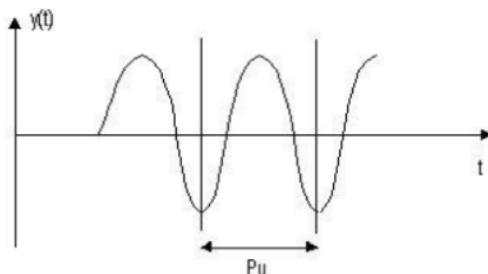
Gambar 5. Blok diagram kontrol PID

Perancangan kontrol PID melibatkan beberapa tahapan untuk menjaga kestabilan suhu sistem. Diawali dengan menetapkan nilai *setpoint* serta konstanta K_p, K_i, dan K_d yang relevan, kemudian dilakukan pengukuran suhu aktual menggunakan sensor. *Error* dihitung sebagai perbedaan antara *setpoint* dan suhu aktual, yang selanjutnya digunakan untuk menghitung komponen proporsional (P), integral (I), dan derivatif (D). Ketiga komponen ini dijumlahkan untuk menghasilkan nilai PID yang akan mengendalikan sistem keluaran. Proses ini diulang hingga suhu sistem stabil dan mencapai *setpoint* yang diinginkan. Diagram alir dari kontrol PID terdapat pada Gambar 6.



Gambar 6. Diagram alir sistem kontrol PID.

Perancangan kontroler dilakukan dengan mengidentifikasi komponen utama, yaitu nilai K_p, K_i, dan K_d melalui metode Ziegler-Nichols dengan pendekatan *ultimate cycle*. Komponen integral dan derivatif pada kontrol PID diaktifkan, sehingga sistem beroperasi hanya dengan kontrol proporsional. Nilai gain proporsional (K_p) ditingkatkan secara bertahap hingga mencapai kondisi dimana pada Gambar 7 sistem menunjukkan osilasi berkelanjutan, yang dikenal sebagai titik osilasi kritis.



Gambar 7. Grafik osilasi.

Pada tahap ini, nilai K_p yang diterapkan dicatat sebagai K_u, dan periode osilasi (P_u) diukur. Parameter K_p, K_i, dan K_d dihitung menggunakan rumus yang direkomendasikan oleh Ziegler-Nichols, berdasarkan nilai K_u dan P_u yang diperoleh.

TABEL I

Tipe Pengendali	K _P	T _i	T _d
P	0,5 K _u	-	-
PI	0,45 K _u	½ P _u	-
PID	0,6 K _u	0,5 P _u	0,125 P _u

Pengujian respon sistem kontrol *close-loop* dilakukan untuk mengetahui parameter K_u dan P_u pada sistem kendali suhu alat pengering cabai. Dari hasil pengujian dan menggunakan formula dari Ziegler-Nichols, maka akan didapatkan nilai T_i dan T_d yang akan dijadikan persamaan untuk menentukan nilai parameter berikut:

1) Gain proportional (K_p):

$$K_p = 0,6 \times K_u \quad (1)$$

2) Gain integral (K_i):

$$K_i = \frac{K_p}{T_i} \quad (2)$$

3) Gain derivative (K_d):

$$K_d = K_p \times T_d \quad (3)$$

F. Perhitungan Parameter Performansi PID

Beberapa parameter untuk perhitungan performa dari kontrol PID meliputi %overshoot, rise time (Tr), settling time (Ts), dan steady-state error (SSE). Beberapa parameter performa dari kontrol PID tersebut dihitung untuk mengevaluasi kinerja sistem PID.

1) %Overshoot

Overshoot menunjukkan sejauh mana suhu sistem melebihi nilai *setpoint* pada awal respons sistem sebelum mencapai stabilitas. Parameter ini penting untuk menilai apakah sistem PID merespons terlalu cepat atau terlalu lambat terhadap perubahan *setpoint*. Rumus untuk menghitung persentase *overshoot* (%OS) adalah:

$$\%Overshoot = \left(\frac{M_p - Setpoint}{Setpoint} \right) \times 100\% \quad (4)$$

Keterangan:

M_p = nilai puncak maksimum dari respon sistem

2) Rise Time

Rise Time mengukur durasi yang diperlukan oleh sistem untuk mencapai 90% dari nilai *setpoint* setelah perubahan *setpoint* dilakukan. Parameter ini menggambarkan kecepatan sistem dalam mencapai suhu yang mendekati *setpoint*. Rumus untuk menghitung *rise time* adalah:

$$Tr = t_{90\%} - t_{10\%} \quad (5)$$

Keterangan:

$t_{90\%}$ = waktu respon sistem mencapai 90%

$t_{10\%}$ = waktu respon sistem mencapai 10%

3) Settling Time (T_s)

Settling Time adalah durasi yang diperlukan oleh sistem untuk mencapai stabilitas di sekitar nilai *setpoint* dan tetap berada dalam batas toleransi tertentu (umumnya $\pm 2\%$ atau $\pm 5\%$) dari *setpoint*. Parameter ini penting untuk menilai kecepatan sistem dalam mencapai kondisi stabil setelah mengalami *overshoot*. Rumus untuk menghitung *settling time* (T_s) adalah:

$$T_s = t_{akhir} \quad (6)$$

Keterangan:

t_{akhir} = waktu ketika respon sistem stabil di sekitar *setpoint*

4) Steady-State Error (SSE)

Steady-State Error (SSE) menunjukkan tingkat akurasi sistem dalam mempertahankan suhu dengan mendekati *setpoint* setelah semua tekanan awal mereda. Semakin kecil kesalahan, maka kemampuan sistem semakin baik dalam mempertahankan suhu yang stabil.

$$SSE = Setpoint - (rata-rata nilai akhir sistem) \quad (7)$$

Untuk menghitung *Steady-State Error* dalam bentuk persentase (*SSE%*), kita dapat menggunakan rumus berikut:

$$SSE \% = \left(\frac{SSE}{Setpoint} \right) \times 100\% \quad (8)$$

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

Penelitian ini mengimplementasikan algoritma kontrol PID pada mesin pengering cabai yang telah dibuat, untuk menjaga stabilitas suhu selama proses pengeringan berlangsung.

A. Pengujian Sensor DHT22

Pada pengujian sensor DHT22, dilakukan perbandingan pembacaan suhu antara sensor DHT22 dan termometer digital. Pengujian ini bertujuan untuk mengevaluasi keakuratan sensor DHT22 dalam pengukuran suhu dan kelembapan, serta melakukan perbandingan dengan hasil yang diperoleh dari perangkat termometer digital sebagai alat ukur pembanding. Hasil pengujian sensor suhu DHT22 disajikan dalam Tabel II.

Hasil pengujian menunjukkan bahwa suhu terendah yang terdeteksi oleh DHT22 adalah 32,3°C, sementara suhu tertinggi mencapai 70,0°C. Perbedaan suhu yang terukur antara DHT22 dan termometer digital berada dalam rentang 0,3°C hingga 0,9°C, menunjukkan adanya variasi kecil namun stabil dalam hasil pengukuran. Dengan tingkat akurasi rata-rata yang dicapai adalah 98,92%, hal ini mengindikasikan bahwa sensor DHT22 menunjukkan kinerja yang sangat baik, dengan perbedaan yang cukup kecil dalam pengukuran suhu. Selaras dengan pernyataan hasil penelitian [12], bahwa pentingnya penggunaan sensor dengan akurasi tinggi untuk menjaga stabilitas suhu dalam

sistem pengering otomatis. Penggunaan DHT22 juga memberikan keuntungan tambahan yaitu kemampuan mengukur kelembapan secara simultan yang sangat bermanfaat dalam proses pengeringan.

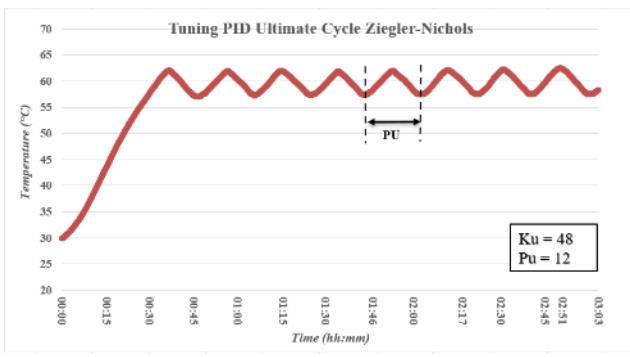
TABEL II
PENGUKURAN AKURASI DHT22

No.	Suhu (°C)		Selisih (°C)
	DHT22	Termometer Digital	
1	32,3	32,6	0,3
2	35	35,3	0,3
3	37,7	38,1	0,4
4	40,4	40,8	0,4
5	43,1	43,4	0,3
6	45,8	46,1	0,3
7	48,5	49,1	0,6
8	51,1	51,6	0,5
9	53,8	54,2	0,4
10	56,5	55,7	0,8
11	59,2	58,4	0,8
12	61,9	61,1	0,8
13	64,6	63,7	0,9
14	67,3	66,6	0,7
15	70	69,2	0,8

B. Mekanisme Tuning PID

Proses tuning kontrol PID bertujuan untuk menentukan parameter PID (K_p , K_i , K_d) yang sesuai dengan karakteristik sistem pengering cabai yang digunakan. Dengan parameter yang tepat, kontrol PID dapat diimplementasikan secara efektif untuk meningkatkan respon sistem dalam mencapai suhu yang stabil selama proses pengeringan. Dalam penelitian ini, proses tuning dilaksanakan dengan menerapkan metode Ziegler-Nichols *Ultimate Cycle*, yang dikenal sebagai salah satu metode tuning yang efektif dan banyak digunakan.

Pengujian dilakukan dengan memberikan sinyal *input step* pada sistem kontrol yang diuji pada *setpoint* 60°C, yang ditentukan sebagai *setpoint* tengah dalam rentang yang diuji, yaitu 50°C, 60°C, dan 70°C. Dengan metode tuning *ultimate-cycle* yang diterapkan, parameter PID disetel dengan hanya menggunakan kontrol P (*proportional*), dimana nilai K_i diatur menjadi 0 dan K_d juga diatur menjadi 0. Selanjutnya, dengan meningkatkan nilai K_p secara bertahap sampai sistem menunjukkan osilasi yang berkelanjutan (*sustain oscillation*) yang stabil. Pada pengujian yang telah dilakukan, diperoleh kondisi *sustain oscillation* pada nilai $K_p=48$, kondisi ini ditampilkan dalam grafik respon sistem yang dapat dilihat pada Gambar 8.



Gambar 8. Grafik sustain oscillation

Berdasarkan respons sistem yang diperoleh, nilai K_p yang dicapai pada titik ini dicatat sebagai Ku (*gain ultimate*), dan Pu (*periode ultimate*) adalah 12 menit. Parameter PID dihitung menggunakan formula Ziegler-Nichols berdasarkan nilai Ku dan Pu yang diperoleh, seperti yang tercantum dalam Tabel I.

TABEL III

PERHITUNGAN NILAI K_P, T_I, T_D DENGAN FORMULA TUNING ZIEGLER-NICHOLS ULTIMATE CYCLE

K _p	T _i	T _d
$\Rightarrow 0,6 \times Ku$	$\Rightarrow 0,5 \times Pu$	$\Rightarrow 0,125 \times Pu$
$\Rightarrow 0,6 \times 48$	$\Rightarrow 0,5 \times 12$	$\Rightarrow 0,125 \times 12$
$\Rightarrow 28,8$	$\Rightarrow 6$	$\Rightarrow 1,5$

Dari nilai T_i dan T_d yang didapatkan dari Tabel III, maka dapat dihitung nilai untuk K_i dan K_d dengan persamaan (2) dan (3) sebagai berikut:

$$\begin{aligned} K_i &= K_p / T_i & K_d &= K_p \times T_d \\ &= 28,8 / 6 & &= 28,8 \times 1,5 \\ &= 4,8 & &= 43,2 \end{aligned}$$

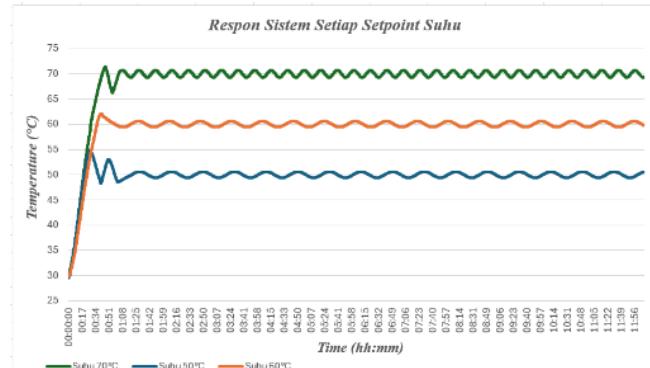
Hasil penyetelan parameter PID dengan metode Ziegler-Nichols *Ultimate Cycle* pada penelitian ini menunjukkan kesesuaian dengan penelitian [13], dimana pada pengering kopi dengan metode serupa juga menghasilkan parameter K_p yang lebih tinggi (37,6) pada setpoint 65°C, namun dengan penambahan *fine-tuning* dapat mereduksi *overshoot* hingga 2,7%, yang sejalan dengan pendekatan *fine-tuning* yang diterapkan dalam penelitian ini untuk memperoleh respon optimal pada setpoint 70°C.

Jika dibandingkan dengan metode *tuning* PID lainnya, metode *Ultimate Cycle* yang digunakan pada penelitian ini menunjukkan keunggulan dalam hal kemudahan implementasi dan konsistensi hasil. Penelitian [14] mengimplementasikan metode *Chien-Hrones-Reswick* pada sistem pengering kayu yang menghasilkan *overshoot* minimal (1,2%) tetapi dengan *rise time* yang lebih lambat (2300 detik). Metode optimasi seperti Algoritma Genetika yang diterapkan pada [15], dimana pengering hasil pertanian menghasilkan performa yang unggul dengan *overshoot* 1,7% dan *settling time* 2950 detik, namun memerlukan komputasi yang lebih kompleks dan waktu penyetelan yang lebih lama. Keseimbangan antara performa dan kompleksitas implementasi menjadikan metode Ziegler-

Nichols *Ultimate Cycle* yang digunakan dalam penelitian ini sebagai pilihan yang efektif untuk sistem pengeringan cabai, dengan ruang untuk optimasi lebih lanjut melalui *fine-tuning* parameter pada berbagai *setpoint*.

C. Pengujian Sistem Kontrol PID

Pengujian dilakukan pada tiga *setpoint* yang berbeda, yaitu 50°C, 60°C, dan 70°C. Pengujian ini bertujuan untuk mengevaluasi kinerja sistem kontrol PID dalam mempertahankan stabilitas suhu pada berbagai *setpoint*.

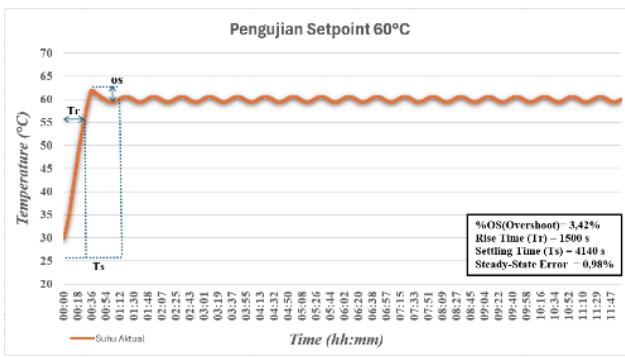


Gambar 9. Respon sistem setiap setpoint suhu

Gambar 9 menampilkan grafik dari respon sistem terhadap 3 *setpoint* suhu yang berbeda yaitu 50°C, 60°C, dan 70°C. Setiap kurva menunjukkan perubahan suhu sistem secara bertahap dengan *setpoint* yang telah ditentukan, serta menuju kemampuan sistem dalam mempertahankan suhu di sekitar nilai tersebut. Ini mengindikasikan bahwa sistem memiliki mekanisme pengendalian yang berupaya mempertahankan suhu dalam jarak yang diinginkan, meskipun terdapat beberapa ketinggian di sekitar titik *setpoint*. Setiap kurva suhu menampilkan pola awal yang jelas, yaitu peningkatan suhu yang cepat hingga mendekati nilai *setpoint* masing-masing. Setelah mencapai *setpoint*, terdapat sedikit osilasi yang kemudian mengendur stabil.

1) Pengujian pada Setpoint 60°C

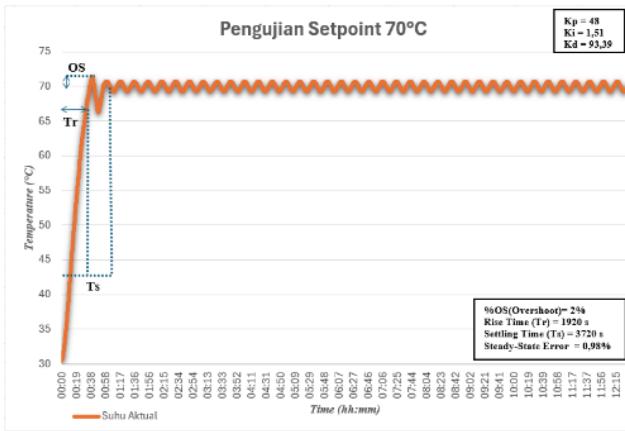
Pengujian ini menggunakan nilai K_p, K_i, dan K_d hasil *tuning* sebelumnya dan didapatkan respon sistem yang dapat dilihat pada Gambar 10. Data pada grafik menunjukkan bahwa pengujian ini memiliki *overshoot* sebesar 3,42%, yang mengindikasikan bahwa suhu sedikit melebihi *setpoint* sebelum mencapai stabilitas. Waktu yang diperlukan untuk mencapai suhu mendekati *setpoint*, yang dikenal sebagai *rise time* (Tr) adalah 1500 detik atau sekitar 25 menit. Selain itu, waktu yang dibutuhkan untuk mencapai kondisi stabil atau *settling time* (Ts) adalah 4140 detik atau sekitar 69 menit. *Steady-State Error* sebesar 0,98% menunjukkan bahwa setelah mencapai stabilitas, suhu hanya mengalami deviasi minimal dari *setpoint*. Temuan penelitian ini sekaligus memperkuat efektivitas penerapan kontrol PID, sebagaimana telah dibuktikan pula dalam penelitian [8] yang menegaskan fungsi kontrol PID dalam menjaga akurasi suhu dalam sistem pengeringan



Gambar 10. Pengujian PID setpoint 60°C

2) Pengujian pada Setpoint 70°C

Pada pengujian dengan perubahan *setpoint* 70°C, diperlukan *fine-tuning*, yaitu penyesuaian nilai KP, KI, dan KD untuk memperoleh respon sistem yang optimal. Pengujian ini dilakukan dalam 6 percobaan dengan nilai PID yang bervariasi. Dari percobaan tersebut, parameter respon sistem yang optimal diperoleh dengan KP = 48, KI = 1,51, dan KD = 93,39. Grafik respon sistem tersebut dapat dilihat pada Gambar 11.



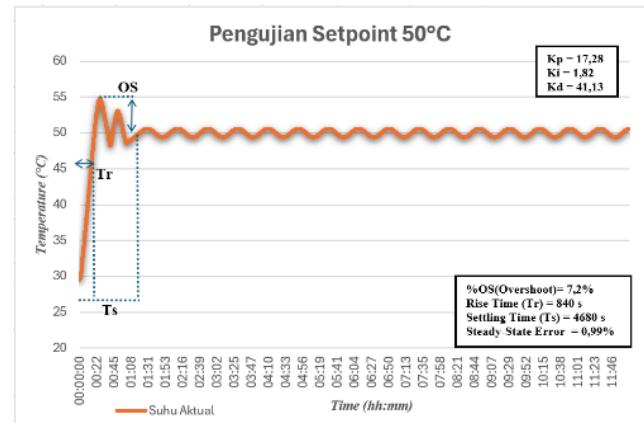
Gambar 11. Pengujian PID setpoint 70°C

Dari grafik yang dihasilkan, sistem menunjukkan *overshoot* (OS) sebesar 2% yang tergolong kecil, hal ini menunjukkan kemampuan sistem dalam mencapai suhu target dengan sedikit kelebihan, sehingga responnya terjaga dengan baik. Waktu yang diperlukan untuk mencapai nilai target pertama kali atau *rise time* (Tr) adalah 1920 detik, hal ini menunjukkan kecepatan respon yang memadai dalam mencapai suhu *setpoint* dari kondisi awal. *Settling time* (Ts) tercatat sebesar 3720 detik, menunjukkan durasi yang diperlukan sistem untuk mencapai kestabilan setelah mengalami *overshoot*. Selain itu, sistem menunjukkan *steady-state error* sebesar 0,98%, yang mengindikasikan kemampuan sistem dalam mempertahankan suhu mendekati *setpoint* dengan akurasi tinggi [12].

3) Pengujian pada Setpoint 50°C

Pada pengujian *setpoint* 50°C, *fine-tuning* diperlukan untuk memperoleh respon sistem yang optimal. Pengujian ini dilaksanakan dalam 6 percobaan dengan nilai PID yang bervariasi. Dari percobaan tersebut, diperoleh parameter respon sistem yang optimal dengan KP = 17,28, KI = 1,82,

dan KD = 41,13. Grafik respon sistem tersebut ditampilkan pada Gambar 12.



Gambar 12. Pengujian PID setpoint 50°C

Grafik menunjukkan bahwa sistem mengalami *overshoot* sebesar 7,2%, yang mengindikasikan bahwa suhu sempat meningkat melebihi *setpoint* hingga mencapai sekitar 53,6°C sebelum akhirnya menurun mendekati target. Nilai *overshoot* yang lebih tinggi menunjukkan bahwa respon awal sistem cenderung cepat. Waktu yang diperlukan untuk mencapai suhu mendekati *setpoint* atau *rise time* (Tr) tercatat sebesar 840 detik. Waktu ini menunjukkan bahwa sistem bereaksi lebih cepat dibandingkan dengan pengujian pada *setpoint* 60°C, sambil tetap mempertahankan kestabilan dalam mencapai *setpoint*. *Settling time* (Ts) atau waktu yang diperlukan sistem untuk mencapai stabilitas di sekitar *setpoint* adalah 4680 detik. Meskipun sistem menunjukkan respon yang lebih cepat pada awalnya, waktu yang diperlukan untuk mencapai stabilitas penuh cukup lama, hal ini disebabkan oleh pengaruh lonjakan suhu di awal. *Steady-state error* sebesar 0,99% menunjukkan bahwa setelah mencapai stabilitas, suhu sangat dekat dengan *setpoint*, dengan deviasi yang minimal. Hal ini menunjukkan tingkat akurasi yang tinggi dalam mempertahankan suhu sekitar 50°C setelah fluktuasi awal berkurang [16].

TABEL IV
PARAMETER PID SETIAP SETPOINT

SP (°C)	Kp	Ki	Kd	OS (%)	Tr (s)	Ts (s)	SSE (%)
50	17,28	1,82	41,13	7,2	840	4680	0,99
60	28,8	4,8	43,2	3,42	1500	4140	0,98
70	48	1,51	93,39	2	1920	3720	0,98

Keterangan:

SP = *Setpoint*

OS = *Overshoot*

Tr = *Rise Time*

Ts = *Settling time*

SSE = *Steady State Error*

Dalam proses tuning PID, pemilihan nilai parameter (Kp, Ki, Kd) mempertimbangkan berbagai aspek performa sistem,

termasuk *overshoot*, *rise time*, *settling time*, dan *steady-state error*. Pemilihan ini didasarkan pada evaluasi hasil pengujian pada 3 *setpoint* yang berbeda yaitu 50°C, 60°C, dan 70°C, dimana parameter PID yang diperoleh dilihat pada Tabel IV.

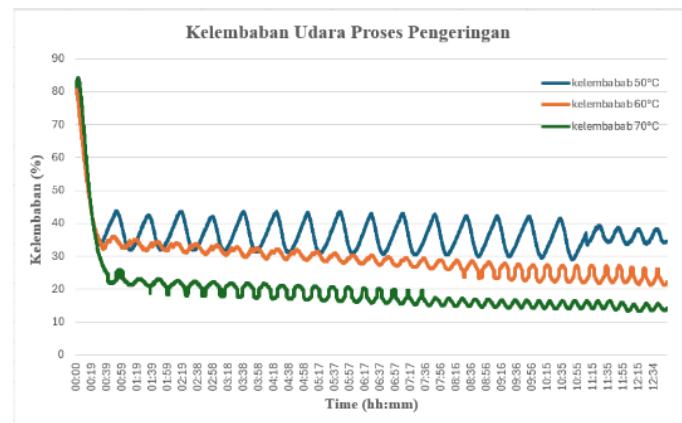
Dalam pengujian *setpoint* 50°C, nilai K_p, K_i, dan K_d yang ditentukan adalah 17.28, 1.82, dan 41.13. Parameter ini dipilih karena menciptakan keseimbangan antara kecepatan respon dan stabilitas. Walaupun terjadi *overshoot* yang signifikan yaitu mencapai 7,2%, sistem berhasil mencapai *setpoint* dengan waktu kenaikan yang cepat yaitu 840 detik. Meskipun waktu yang diperlukan untuk mencapai stabilitas penuh adalah 4680detik, *Steady-state error* yang rendah sebesar 0,99% menunjukkan bahwa sistem dapat mempertahankan suhu dengan deviasi minimal setelah mencapai kestabilan. Parameter ini dipilih karena memberikan keseimbangan antara kecepatan respon dan stabilitas. Meskipun terdapat *overshoot* yang lebih tinggi, sistem dapat mencapai *setpoint* dengan cepat dan mempertahankan akurasi suhu pada kondisi *steady-state*.

Dalam pengujian *setpoint* 60°C, nilai K_p, K_i, dan K_d yang ditetapkan adalah 28.8, 4.8, dan 43.2. Performa sistem menunjukkan *overshoot* sebesar 3,42%, yang lebih rendah dibandingkan dengan *setpoint* 50°C. Sistem memerlukan waktu 1500detik untuk mencapai suhu yang mendekati *setpoint*, dan 4140detik untuk mencapai stabilitas penuh. *Steady-state error* sebesar 0,98% menunjukkan bahwa sistem memiliki akurasi yang memadai dalam mempertahankan suhu stabil setelah mencapai *setpoint*. Parameter tuning ini menghasilkan keseimbangan antara *overshoot* yang minimal dan waktu stabilitas yang memadai, meskipun dengan respon yang lebih lambat dibandingkan *setpoint* 50°C.

Dalam pengujian pada *setpoint* 70°C, nilai tuning PID yang ditetapkan adalah K_p=48, K_i=1.51, dan K_d=93.39. Pengaturan ini menghasilkan *overshoot* terendah di antara ketiga *setpoint* yaitu hanya 2%, ini menunjukkan bahwa sistem mencapai suhu target dengan efisiensi tinggi tanpa kelebihan yang signifikan. *Rise time* sebesar 1920detik menunjukkan respons sistem yang memadai, sedangkan *settling time* sebesar 3720detik menunjukkan waktu yang lebih cepat untuk mencapai kestabilan dibandingkan *setpoint* lainnya. *Steady-state error* sebesar 0,98% menunjukkan bahwa parameter ini memiliki akurasi tinggi dalam mempertahankan suhu di sekitar *setpoint*. Parameter ini dipilih karena memberikan kombinasi optimal antara *overshoot* minimal, stabilitas cepat, dan akurasi tinggi pada *setpoint* yang lebih tinggi [17].

D. Pengujian Pengeringan Cabai

Proses pengeringan cabai dipengaruhi secara signifikan oleh tingkat kelembaban udara. Selama proses pengeringan, pengukuran kelembaban relatif dilakukan secara berkala untuk menganalisis pengaruhnya terhadap efektivitas pengeringan. Kelembaban udara yang tinggi berpotensi memperlambat proses pengeringan, sementara kelembaban yang rendah cenderung meningkatkan laju penguapan. Dalam pengujian pengeringan ini, proses pengeringan cabai dilakukan dengan menggunakan pengendali PID untuk mencapai hasil yang optimal. Pada percobaan ini, cabai yang digunakan memiliki berat 1000gram (1kg) dengan masing-masing variasi laju pengeringan yang diterapkan selama 8 jam, 10 jam, dan 12 jam dan pengeringan dilakukan pada suhu 50°C, 60°C, dan 70°C.



Gambar 13. Grafik kelembaban udara proses pengeringan

Grafik pada Gambar 13 menggambarkan fluktuasi kelembaban udara sepanjang waktu pada tiga tingkat suhu pengeringan yang berbeda yaitu 50°C, 60°C, dan 70°C. Pada tahap awal, tingkat kelembaban udara berada pada level yang sangat tinggi sekitar 83%, sebelum mengalami penurunan yang signifikan dalam waktu singkat di semua suhu. Proses pengeringan cabai dimulai dengan penguapan yang cepat, dimana mayoritas air bebas yang terdapat di permukaan cabai menguap terlebih dahulu. Kondisi tersebut sesuai dengan hasil penelitian [18] yang menekankan pentingnya tahap awal penguapan cepat dalam mempercepat proses pengeringan cabai

Pada suhu *setpoint* 50°C, kelembaban udara awalnya tercatat di atas 80% dan menunjukkan penurunan yang signifikan dalam waktu yang relatif singkat. Suhu 50°C dengan kelembaban yang berfluktuasi sekitar 40% selama proses pengeringan, menunjukkan bahwa pada suhu ini proses pengeringan berlangsung lebih lambat dengan kelembaban yang tetap tinggi. Temuan penelitian mengindikasikan bahwa suhu yang lebih tinggi berhubungan dengan penurunan laju penguapan air, sehingga menyebabkan waktu yang dibutuhkan untuk mencapai kelembaban stabil menjadi lebih lama. Hal tersebut menandakan adanya hubungan terbalik antara suhu dan kecepatan penguapan, dimana suhu tinggi justru memperlambat proses pengeringan. Hasil penelitian ini relevan dengan penelitian [6], yang menyatakan bahwa suhu pengeringan yang lebih rendah dapat meningkatkan fluktuasi kelembaban selama proses pengeringan. Fluktuasi kelembaban memperlambat laju pengeringan, karena pada suhu yang lebih rendah air cenderung menguap lebih lambat dan ketidakstabilan kelembaban mempengaruhi efisiensi pengeringan.

Pada suhu *setpoint* 60°C, terdapat pola yang konsisten dengan penurunan kelembaban yang signifikan pada awal proses, meskipun kelembaban udara akhirnya mencapai kestabilan sekitar 25% setelah periode awal. Pada grafik mengindikasikan fluktuasi yang lebih konsisten dan menurun dibandingkan suhu 50°C, yang mencerminkan adanya keseimbangan antara laju pengeringan dan pengendalian kelembaban. Suhu 60°C terbukti menciptakan keseimbangan yang optimal antara efisiensi proses pengeringan dan pemeliharaan kestabilan kelembaban yang menjadi faktor mencapai hasil pengeringan yang maksimal. Pada suhu tersebut, proses penguapan berlangsung dengan lebih cepat tanpa mengesampingkan kualitas fisik produk yang dihasilkan. Hasil penelitian yang diperoleh mendukung hasil penelitian [5],

bahwa suhu yang seimbang dalam proses pengeringan tidak hanya mampu mempercepat laju penguapan tetapi juga menjaga kualitas fisik produk yang diproses.

Pada suhu *setpoint* 70°C, terjadi penurunan kelembaban udara yang signifikan pada awal proses, dan kemudian stabil mendekati 15%. Hal tersebut mengindikasikan bahwa peningkatan suhu berkontribusi pada percepatan laju penguapan air secara signifikan, sementara kelembaban relatif tetap stabil pada tingkat yang lebih rendah [18].

Grafik pada Gambar 13 menunjukkan bahwa suhu yang lebih tinggi (70°C) menghasilkan proses pengeringan yang lebih cepat dengan tingkat kelembaban yang lebih rendah. Sebaliknya, suhu yang lebih rendah (50°C) memerlukan waktu yang lebih lama dan diiringi oleh kelembaban yang lebih tinggi serta fluktuasi yang lebih signifikan. Penentuan suhu yang optimal sangat bergantung pada kebutuhan kualitas produk akhir, dimana suhu sedang (60°C) menunjukkan kemampuan untuk memberikan stabilitas yang baik dalam proses pengeringan cabai.



Gambar 14. Proses pengeringan cabai (a) cabai segar, (b) 3 jam pengeringan, (c) 7 jam pengeringan, (d) 12 jam pengeringan

Cabai hasil proses pengeringan dengan mesin pengering cabai pada Gambar 14 menunjukkan perbedaan yang jelas dalam tekstur dan warna cabai yang terjadi selama proses pengeringan. Cabai segar memiliki warna merah cerah dan kandungan air yang tinggi di fase awal proses. Selama proses pengeringan, cabai mengalami pengertutan dan perubahan warna menjadi merah tua, yang menunjukkan penurunan kadar air yang terkandung di dalamnya. Pemanasan dengan suhu yang terkontrol terbukti efektif dalam menjaga warna alami cabai serta meminimalkan risiko pembakaran atau kekeringan berlebihan, yang sering kali terjadi pada metode pengeringan dengan suhu tinggi yang tidak teratur.

Hasil pengeringan cabai yang ditampilkan pada Gambar 14 juga menekankan pentingnya stabilitas suhu dalam mempertahankan kualitas visual cabai kering. Seperti dalam sistem PID penelitian ini menghasilkan warna cabai yang lebih konsisten dan cerah dibandingkan dengan pengeringan konvensional dan pengeringan suhu tinggi tanpa kontrol yang tepat.

IV. KESIMPULAN

Penelitian ini menunjukkan bahwa suhu dan kelembaban berperan penting dalam efektivitas pengeringan cabai, dengan suhu optimal teridentifikasi pada 60°C dan kelembaban relatif 25%, yang menghasilkan kondisi paling ideal untuk proses tersebut. Implementasi kontrol PID dengan parameter $K_p=28.8$, $K_i=4.8$, dan $K_d=43.2$ menunjukkan keberhasilan dalam menjaga suhu tetap stabil, dengan *steady-state error* mencapai 0,98% mendekati *setpoint* yang diinginkan. Proses pengeringan menghasilkan penurunan berat cabai dari 1030gram menjadi 261gram, mencerminkan keberhasilan dalam mencapai kadar air rendah yang diperlukan untuk penyimpanan jangka panjang. Secara umum, sistem pengeringan berbasis PID ini efektif dalam mengurangi kadar air sambil menjaga tekstur, warna, dan potensi daya tahan produk. Namun, penelitian ini masih terbatas pada satu varietas cabai dan lingkup pengujian yang belum mencerminkan kondisi produksi yang lebih luas, serta belum mencakup analisis kandungan nutrisi dan senyawa bioaktif pasca pengeringan. Untuk pengembangan selanjutnya, disarankan dilakukan pengujian pada berbagai varietas cabai, implementasi sistem kontrol adaptif yang dapat menyesuaikan parameter PID secara otomatis terhadap kondisi lingkungan, serta analisis lebih lanjut terhadap retensi nutrisi dan senyawa bioaktif setelah proses pengeringan.

REFERENSI

- [1] A. Kumar, K. U. Singh, M. K. Singh, A. K. S. Kushwaha, A. Kumar, and S. Mahato, "Design and Fabrication of Solar Dryer System for Food Preservation of Vegetables or Fruit," *J. Food Qual.*, vol. 2022, 2022, doi: 10.1155/2022/6564933.
- [2] N. Sahar *et al.*, "Effects of drying surfaces and physical attributes on the development of Aflatoxins (AFs) in red chilies," *J. Food Process. Preserv.*, vol. 46, no. 2, 2022, doi: 10.1111/jfpp.16173.
- [3] C. A. Afgani and A. Ariskanopitasari, "Sosialisasi Penanganan Pascapanen Buah Cabai Merah Di Sernu Labu Badas Kabupaten Sumbawa," *J. Agro Dedi. Masy. (JADM ...)*, vol. 5, no. 1, pp. 1–6, 2024, [Online]. Available: <http://112.78.38.8/index.php/JADM/article/view/23437>
- [4] L. G. Hakim, A. Sofwan, and A. Triwiyatno, "Perancangan Sistem Rekayasa Lingkungan Smart Greenhouse Menggunakan Fuzzy Logic Controller Pada Tanaman Cabai," *Transient J. Ilm. Tek. Elektro*, vol. 9, no. 1, pp. 46–55, 2020, doi: 10.14710/transient.v9i1.46–55.
- [5] G. E. S. Batiha *et al.*, "Biological properties, bioactive constituents, and pharmacokinetics of some capsicum spp. And capsaicinoids," *Int. J. Mol. Sci.*, vol. 21, no. 15, pp. 1–35, 2020, doi: 10.3390/ijms21155179.
- [6] C. Gu *et al.*, "Effects of catalytic infrared drying in combination with hot air drying and freeze drying on the drying characteristics and product quality of chives," *Lwt*, vol. 161, no. September 2021, p. 113363, 2022, doi: 10.1016/j.lwt.2022.113363.
- [7] N. K. Mahanti *et al.*, "Refractance WindowTM-Drying vs. other drying methods and effect of different process parameters on quality of foods: A comprehensive review of trends and technological developments," *Futur. Foods*, vol. 3, no. March, p. 100024, 2021, doi: 10.1016/j.fufo.2021.100024.
- [8] V. C. Guntara, "Rancang Bangun Alat Penggiling Dan Pengering Cabai Menggunakan Atmega 328," *J. Energy Electr. Eng.*, vol. 3, no. 1, pp. 39–45, 2021, doi: 10.37058/jeee.v3i1.3647.
- [9] P. Zhang, A. Daraz, S. A. Malik, C. Sun, A. Basit, and G. Zhang, "Multi-resolution based PID controller for frequency regulation of a hybrid power system with multiple interconnected systems," *Front. Energy Res.*, vol. 10, no. February, pp. 1–16, 2023, doi: 10.3389/fenrg.2022.1109063.
- [10] R. L. Sianturi, W. S. Nababan, and S. Sihombing, "Evaluasi Kinerja Mesin Pengering Surya Type Kolektor Pelat Datar Sebagai Pengering Cabai yang Efektif," vol. 6, no. 2, pp. 20–29, 2025.
- [11] A. Kurniawan and I. Ita, "Analisis Faktor-Faktor Permintaan Cabai

- Merah Kering Impor oleh Pedagang Bumbu di Pasar Perumnas Kota Palembang Sumatera Selatan,” *Mbia*, vol. 19, no. 2, pp. 121–131, 2020, doi: 10.33557/mbia.v19i2.971.
- [12] A. Anwari and M. Syaefullah, “Rancang Bangun Alat Pengering Cabai Merah Menggunakan Sistem Rotary Dryer Berbasis Mikrokontroler,” vol. 3, no. 1, 2024.
- [13] M. Yamin *et al.*, “Studi Awal Kinerja Alat Pengering Berbasis Panas Bohlam dengan Komoditi Cabe Keriting (*Capsicum Annum L.*),” vol. 20, no. 01, 2024.
- [14] P. Putu *et al.*, “Pembuatan Alat Pengering Cabai Dengan Sistem Efek Rumah Kaca Berbasis Panel Surya,” Vol. 6, No. 3, Pp. 90–104, 2023.
- [15] D. Santoso and A. Waris, “Uji Kinerja Sistem Kontrol Untuk Pengendalian Suhu Pada Alat Pengering Biji-Bijian Berbasis Fuzzy Logic,” *J. Ilm. Rekayasa Pertan. dan Biosist.*, vol. 8, no. 1, pp. 33–39, 2020, doi: 10.29303/jrpb.v8i1.161.
- [16] M. A. Prasetyo, N. Tamami, and A. Wijayanto, “Prototipe Alat Pengering Padi dan Jagung Tipe Putar Secara Otomatis Menggunakan Metode PID Berbasis Internet of Things,” *J. Fokus Elektroda*, vol. 09, no. 2, pp. 63–72, 2024, [Online]. Available: <https://elektroda.uho.ac.id/>
- [17] R. F. Fadarina, Indah Purnamasari, “Efisiensi Mesin Pengering Beku Vakum pada Pengeringan Cabai Merah (*Capsicum annuum L.*),” *J. Kinet.*, vol. 11, no. 01, pp. 1–8, 2020, [Online]. Available: <https://jurnal.polsri.ac.id/index.php/kimia/index>
- [18] A. N. Aliansyah, “Rancang Bangun Oven Pengering Cabai dilengkapi Kontrol Suhu Otomatis.” *Enthalpy J. Ilm. Mhs. Tek. Mesin*, vol. 8, no. 2, p. 50, 2023, doi: 10.55679/enthalpy.v8i2.36498.