

Optimasi Kendali PID berbasis IoT pada Oven Listrik untuk Pengeringan Rempah yang Presisi

Bambang Pratama¹, Irma Salamah^{1,*}, Lindawati¹

¹ Program Studi Teknik Telekomunikasi, Politeknik Negeri Sriwijaya, Indonesia

* Correspondence: irma.salamah@polsri.ac.id

Copyright: © 2025 by the authors

Received: 29 Mei 2025 | Revised: 5 Juni 2025 | Accepted: 20 Juni 2025 | Published: 13 Agustus 2025

Abstrak

Pengeringan rempah yang tidak stabil berpotensi menurunkan kadar senyawa aktif hingga 30% dan meningkatkan risiko kontaminasi mikroba hingga 40%, sementara pengendalian suhu konvensional belum menjamin kestabilan termal. Penelitian ini bertujuan mengembangkan sistem pengering berbasis IoT dengan algoritma PID guna menjaga kestabilan suhu dan memungkinkan pemantauan dan pengendalian jarak jauh. Model penelitian yang digunakan adalah *waterfall*, dimulai dengan analisis kebutuhan, perancangan *hardware* dan *software*, implementasi algoritma PID melalui pendekatan *trial and error*, pengembangan aplikasi IoT dengan Kodular dan Firebase, integrasi sistem, serta uji performa sistem keseluruhan. Komponen utama meliputi sensor suhu DS18B20, ESP32, elemen pemanas, serta sistem IoT. Pengujian *software* dilakukan dengan menggunakan metode *black box testing*, sedangkan pengujian *hardware* dilakukan melalui evaluasi performa sistem kendali suhu dengan parameter *overshoot*, *steady-state error*, *settling time*, dan simulasi gangguan serta perbandingan dengan kontrol *on-off*. Hasil temuan berupa sistem IoT yang mengatur suhu stabil dengan algoritma PID dan pemantauan suhu *real-time* melalui perangkat seluler. Hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem PID lebih stabil dibanding metode *on-off*, dengan *overshoot* <4°C, *steady-state error* <1,5°C, *settling time* ±750 detik, serta respons cepat terhadap gangguan. Aplikasi *mobile* beroperasi stabil tanpa ada kesalahan, sehingga dapat meningkatkan mutu dan efektivitas proses pengeringan rempah yang presisi.

Kata kunci: *internet of things*; kendali suhu; kontrol pid; pengeringan rempah; *smart oven*

Abstract

Unstable spice drying can reduce active compound content by up to 30% and increase the risk of microbial contamination by up to 40%, while conventional temperature control does not ensure thermal stability. This study aims to develop an IoT-based drying system using a PID algorithm to maintain temperature stability and allow remote monitoring and control. The research followed the waterfall model, starting from needs analysis, hardware and software design, PID implementation using a trial-and-error approach, IoT application development with Kodular and Firebase, system integration, and full system performance testing. Key components include the DS18B20 temperature sensor, ESP32, heating element, and IoT platform. Software testing used the black box method, while hardware testing evaluated performance through overshoot, steady-state error, settling time, disturbance simulation, and comparison with the on-off control method. The resulting system automatically regulates temperature with a PID algorithm and enables real-time monitoring via mobile devices. Testing showed the PID system was more stable than the on-off method, with overshoot <4°C, steady-state error <1.5°C, settling time of ±750 seconds, and quick response to disturbances. The mobile application operated reliably without errors, enhancing the quality and precision of the spice drying process.

Keywords: *internet of things*; pid control; smart oven; spice drying; temperature control



PENDAHULUAN

Penggunaan bahan alami dalam pengobatan masih menjadi pilihan utama di berbagai negara berkembang sebagai alternatif terapi konvensional, sehingga permintaan terhadap produk obat herbal terus mengalami peningkatan secara global maupun nasional. Menurut estimasi WHO, hingga 80% populasi di banyak negara berkembang masih mengandalkan obat herbal sebagai bagian utama dari layanan kesehatan primer mereka (Kaur et al., 2024). Indonesia, sebagai salah satu negara megabiodiversitas, memiliki potensi besar dalam produksi rempah-rempah yang dapat digunakan sebagai bahan baku obat herbal. Namun demikian, kualitas pengolahan pasca-panen rempah, khususnya pada tahap pengeringan, masih menjadi tantangan besar yang berdampak langsung terhadap efektivitas *farmakologis* produk akhir. Pengeringan yang tidak optimal terbukti dapat menyebabkan penurunan kadar senyawa aktif hingga 30% dan meningkatkan risiko kontaminasi mikroba hingga 40% akibat fluktuasi suhu dan paparan lingkungan terbuka (Massarioli et al., 2023; Nurhaslina et al., 2022).

Studi terkini menunjukkan bahwa metode pengeringan yang tidak optimal dapat menyebabkan degradasi senyawa bioaktif, seperti minyak *atsiri* dan *polifenol*, yang sangat penting dalam produk *fitofarmaka* (Febrinda et al., 2023; Said et al., 2022). Selain itu degradasi senyawa tersebut tidak hanya menurunkan kualitas, tetapi juga mengurangi nilai ekonomi produk secara signifikan (Utama et al., 2024). Selain itu, pengeringan yang tidak higienis dapat menyebabkan kontaminasi mikrobiologis oleh patogen seperti *Salmonella spp.*, *Clostridium perfringens*, dan *Bacillus cereus* (Silpa et al., 2021). Sebagai solusi, oven listrik mulai digunakan menggantikan penjemuran konvensional karena lebih cepat, bersih, dan presisi (Zuki et al., 2024). Namun, kendala utama adalah ketidakstabilan suhu akibat sistem kontrol *on-off* yang tidak cocok untuk menjaga kestabilan termal (Güney et al., 2020), sehingga senyawa aktif dalam rempah bisa rusak (Ali et al., 2023). Untuk itu, diperlukan solusi berbasis teknologi seperti kontrol suhu berbasis IoT dan algoritma PID yang mampu menjaga kestabilan suhu secara *real-time* dan meningkatkan efisiensi proses pengeringan.

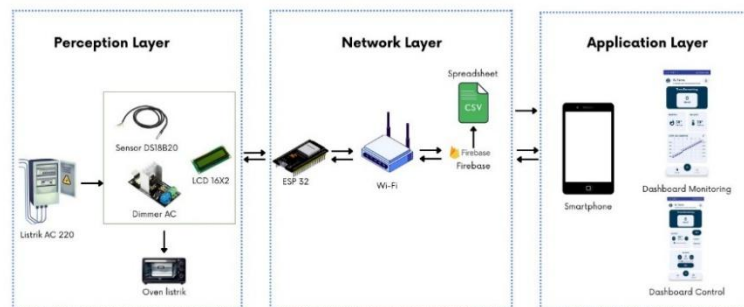
Sistem PID tidak hanya efektif namun juga *fleksibel* dan mudah diimplementasikan pada berbagai sistem pengeringan modern (Annafi et al., 2023). Beberapa penelitian sebelumnya yang telah berhasil menerapkan PID dalam sistem pengeringan bahan pangan seperti pisang dan melon (Yang et al., 2023), sedangkan pada penelitian lain yang mengimplementasikan PID untuk rumah tangga dengan *overshoot* yang mencapai 15°C (Awaludin & Waluyo, 2023). Namun, sebagian besar penelitian yang telah dilakukan masih terbatas pada sistem kendali suhu saja tanpa integrasi dengan teknologi IoT. Sementara itu, IoT telah membuka peluang baru dalam sistem kendali modern dengan menyediakan pemantauan suhu secara *real-time* dan kendali jarak jauh yang lebih *fleksibel* (Altunel et al., 2021), (Tamrakar et al., 2022). Kendati demikian, integrasi penuh antara PID dan IoT dalam konteks pengeringan rempah masih jarang dikaji, terutama yang menyertakan fitur-fitur seperti pengaturan suhu dan waktu dari *smartphone*, grafik suhu *real-time*, serta penyimpanan data historis suhu untuk analisis berkelanjutan. Selain itu, belum banyak sistem yang diuji dengan tolak ukur kinerja terukur seperti *overshoot*, *settling time*, dan *steady state error*, padahal ketiganya sangat penting untuk menjamin mutu hasil pengeringan rempah-rempah obat.

Keterbatasan pada beberapa penelitian sebelumnya yang belum mengembangkan sistem pengering rempah terintegrasi antara pengendali PID dan teknologi IoT secara menyeluruh, serta belum mencantumkan evaluasi terhadap parameter performa termal seperti *overshoot*, *settling time*, dan *steady state error*, menjadi landasan utama dalam perumusan fokus penelitian ini. Sistem yang dirancang dilengkapi dengan kontrol jarak jauh dan pemantauan suhu secara *real-time*. Penyesuaian parameter PID dilakukan menggunakan metode *trial and error*, yang sesuai untuk sistem oven dengan respons termal lambat, guna menghindari osilasi dan mempercepat stabilisasi (Chaisawasd et al., 2024; Kumari, 2021). Integrasi sistem dengan Firebase dan Kodular memungkinkan pengendalian suhu dan waktu pengeringan dari

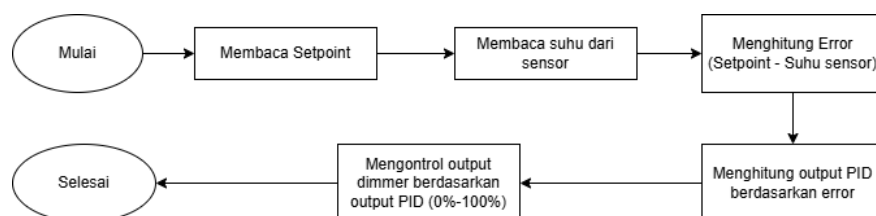
perangkat seluler serta pencatatan data suhu historis secara otomatis. Penelitian ini bertujuan mengembangkan sistem pengering rempah terintegrasi antara PID dan IoT untuk menjaga kestabilan suhu dan meningkatkan efisiensi pengeringan serta mencatat *historical* data pengeringan. Temuan ini diharapkan dapat meningkatkan kualitas hasil pengeringan rempah herbal dan menjadi model teknologi tepat guna berbasis digital dalam pengolahan pascapanen.

METODE

Penelitian ini merupakan penelitian dan pengembangan yang menggunakan model *Waterfall*. Dimulai dengan analisis kebutuhan dalam penelitian ini mencakup identifikasi komponen utama yang diperlukan, seperti sensor suhu akurat DS18B20, mikrokontroler yang mendukung algoritma PID ESP32, aktuator pemanas, serta sistem antarmuka IoT untuk pemantauan jarak jauh. Langkah yang dilakukan meliputi kajian pustaka untuk memahami konsep dasar, perancangan perangkat keras dan lunak, implementasi algoritma PID dengan metode *trial and error*, pengembangan aplikasi IoT menggunakan Kodular dan Firebase, integrasi sistem, serta pengujian performa suhu yang mencakup evaluasi *overshoot*, *settling time*, dan perbandingan dengan kontrol *on-off* serta pengujian *software* menggunakan *blackbox testing* untuk menguji semua fitur pada sistem berjalan sesuai fungsi.



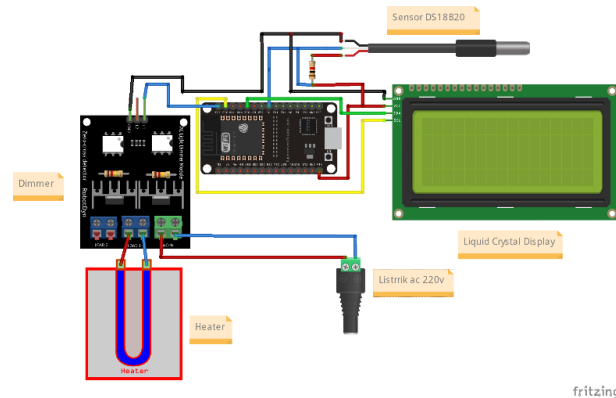
Gambar 1. Perancangan sistem kerja alat keseluruhan



Gambar 2. Blok diagram kontrol pid

Gambar 1 menunjukkan sistem kerja alat secara keseluruhan, mencakup integrasi sensor, mikrokontroler, kontrol PID dengan metode *trial and error*, serta algoritma koneksi ke Firebase agar sistem dapat dipantau dan dikontrol secara *real-time*, Firebase dipilih karena dapat menangani penyimpanan dan pembaruan data secara cepat serta mendukung komunikasi dua arah antara perangkat dan aplikasi pengguna, dan mudah diintegrasikan dengan ESP32. Gambar 2 menunjukkan blok diagram kontrol PID yang dimulai dari pembacaan *setpoint* dan suhu, perhitungan *error*, lalu diproses oleh algoritma PID untuk menghasilkan *output* kendali 0–100% yang mengatur daya pemanas melalui *dimmer*. Parameter PID ditentukan melalui pendekatan *trial and error* karena praktis dan efisien di tengah keterbatasan waktu, serta sesuai dengan karakter sistem yang lambat. *Tuning* yang dihasilkan adalah $K_p=18$, $K_i=0.4$ dan $K_d=180$, ditentukan secara bertahap dengan menaikkan K_p hingga sistem mencapai *setpoint*, kemudian menyesuaikan K_d untuk meredam *overshoot* dan K_i untuk mengurangi *error steady*

state. Nilai awal diestimasi berdasarkan respons sistem terhadap *input*, dan rincian iterasi disajikan pada bagian hasil. Meskipun metode ini memiliki keterbatasan dalam hal *repeatability* dan *robustness* di kondisi berbeda, pendekatan ini dinilai cukup efektif untuk kebutuhan sistem ini. Hal ini sejalan dengan penelitian sebelumnya yang mengklasifikasikan *trial and error* sebagai salah satu pendekatan *tuning* PID yang masih umum digunakan dalam praktik industri karena kemudahannya, meskipun tidak optimal secara teori (Somefun et al., 2021).



Gambar 3. Perancangan *hardware*

Gambar 3 menunjukkan rancangan sistem berbasis mikrokontroler ESP32 yang terhubung dengan LCD, *dimmer*, pemanas oven, *power supply*, dan sensor DS18B20. Sensor ini dipilih karena akurat, mudah diintegrasikan, serta memiliki rentang pengukuran luas (-55°C hingga $+125^{\circ}\text{C}$) dan resolusi tinggi ($0,0625^{\circ}\text{C}$), sesuai untuk pengendalian suhu oven listrik (Ivanov et al., 2022). Sebelum pengujian, sensor dikalibrasi menggunakan termometer referensi. Pengujian dilakukan pada oven 12liter untuk mengeringkan 400–600gram rempah per siklus, dengan tiga *setpoint* suhu (40°C , 50°C , 60°C), diulang beberapa kali, dan dibandingkan dengan kontrol *on-off* pada suhu 40°C . Parameter yang diamati meliputi *steady-state error*, *overshoot*, *rise time*, dan *settling time*, serta respons sistem saat pintu oven dibuka selama ± 15 detik. Pengujian sistem IoT dilakukan melalui aplikasi yang mengatur dan memantau suhu serta waktu secara *real-time*. Penelitian ini belum mengevaluasi kualitas akhir rempah seperti kadar air atau *flavonoid*, yang menjadi keterbatasan sekaligus peluang riset lanjutan.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil

Berdasarkan hasil analisis kebutuhan, sistem pengering rempah yang dikembangkan harus mampu menjaga suhu oven tetap stabil pada *setpoint* tertentu dengan memperhatikan parameter performa seperti *steady-state error*, *overshoot*, *response time*, dan *settling time*. Selain itu, sistem juga dituntut memiliki akurasi pembacaan suhu yang tinggi dan mendukung pemantauan serta pengendalian jarak jauh secara *real-time*. Untuk memenuhi kebutuhan tersebut, digunakan sensor suhu DS18B20, mikrokontroler ESP32, serta aplikasi *mobile* berbasis Kodular yang terintegrasi dengan Firebase. Implementasi sistem menghasilkan rancangan akhir berupa perangkat keras dan antarmuka aplikasi sebagaimana ditampilkan pada Gambar 4. Pengujian menunjukkan bahwa sistem mampu mengontrol suhu dengan *overshoot* $< 4^{\circ}\text{C}$, *steady-state error* $< 1,5^{\circ}\text{C}$, serta *settling time* yang relatif cepat, membuktikan bahwa sistem telah sesuai dengan kebutuhan fungsional dan teknis yang ditetapkan.

Validasi akurasi pembacaan sensor suhu dilakukan melalui perbandingan antara hasil pengukuran sensor DS18B20 dan thermometer. Hasil pengujian yang ditampilkan pada Tabel

1 menunjukkan bahwa sensor DS18B20 menunjukkan performa yang baik, dengan rata-rata deviasi relatif sebesar $\pm 0,25^{\circ}\text{C}$ dari lima kali pengambilan data. Nilai deviasi tersebut masih berada dalam batas toleransi yang ditetapkan oleh spesifikasi pabrikan, yaitu $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$ pada rentang suhu -55°C hingga 125°C . Berdasarkan hasil ini, sensor DS18B20 dinilai andal dan layak digunakan sebagai elemen masukan dalam sistem kendali suhu berbasis PID.



Gambar 4. Hasil perancangan *mobile app* dan perancangan *hardware*

Tabel 1. Hasil perbandingan sensor suhu dan *thermometer*

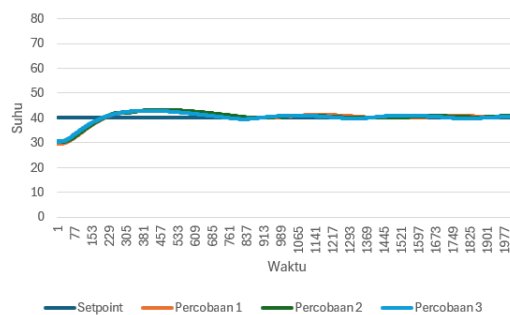
Pengujian ke-	Suhu DS18B20 ($^{\circ}\text{C}$)	Suhu Thermometer ($^{\circ}\text{C}$)	Selisih (%)
1	33,81	33,5	0,31
2	35,31	35,2	0,11
3	41,56	41,9	0,34
4	48,31	48,1	0,21
5	52,75	52,5	0,25
Rata-rata <i>Error</i>			0,244

Tabel 2. Perbandingan performa metode p, pd, dan pid

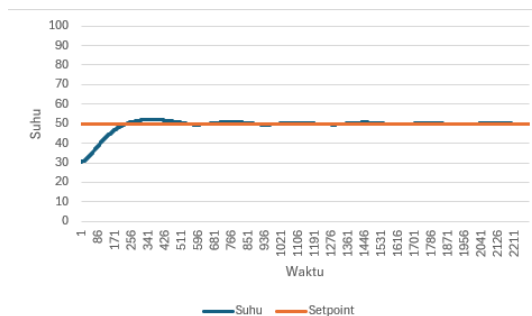
Metode	Kp	Ki	Kd	<i>Overshoot</i> ($^{\circ}\text{C}$)	<i>Error steady state</i> ($^{\circ}\text{C}$)	<i>Rise time</i> (detik)	<i>Settling time</i> (detik)
P	18	0	0	± 7	2	328	1257
PD	18	0	180	± 3.5	2	172	808
PID	18	0.4	180	± 3	< 1.5	154	757

Produk akhir dari penelitian ini berupa sistem pengering rempah berbasis kendali PID yang terintegrasi dengan teknologi IoT, menggunakan sensor DS18B20, mikrokontroler ESP32, dan *dimmer* untuk mengatur daya pemanas oven listrik, serta aplikasi *mobile* berbasis Kodular yang terhubung ke Firebase. Sistem ini memungkinkan pengaturan suhu dan waktu pengeringan, pemantauan suhu secara *real-time*, serta pencatatan dan akses data historis suhu. Implementasi kendali PID dengan metode *trial and error* dilakukan melalui beberapa tahapan untuk mencapai respons sistem yang stabil dan optimal. Tahap awal *tuning* dilakukan dengan menentukan nilai Kp, sedangkan Ki dan Kd disetel ke nol untuk mengisolasi pengaruh *proporsional* terhadap respons sistem. Nilai Kp adalah 18 menunjukkan performa terbaik pada konfigurasi kontrol P yang disajikan pada tabel 2, dengan *overshoot* sebesar $\pm 7^{\circ}\text{C}$, *error steady-state* sebesar 2°C , *rise time* 328 detik, dan *settling time* 1257 detik. Sistem mampu mencapai setpoint dengan cepat, namun masih menunjukkan *overshoot* yang tinggi dan waktu

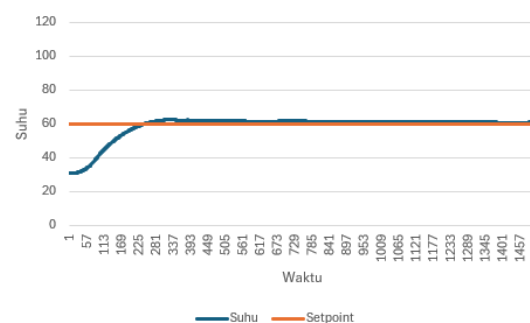
stabilisasi yang cukup lama. Untuk meningkatkan performa sistem, khususnya dalam mengurangi *overshoot*, nilai K_d disesuaikan secara bertahap dan diperoleh nilai optimal sebesar 180, yang diimplementasikan dalam konfigurasi kontrol PD. Hasil pengujian menunjukkan *overshoot* berkurang menjadi $\pm 3.5^\circ\text{C}$, dengan *error steady-state* tetap 2°C , *rise time* menurun menjadi 172 detik, dan *settling time* menjadi 808 detik, yang mengindikasikan peningkatan kestabilan sistem. Meskipun demikian, karena *error steady-state* masih cukup besar, *tuning* dilanjutkan pada parameter K_i , dan nilai optimal diperoleh pada K_i sebesar 0.4. Dengan konfigurasi kontrol PID, sistem menunjukkan performa terbaik secara keseluruhan dengan *overshoot* $\pm 3^\circ\text{C}$, *error steady-state* $< 1.5^\circ\text{C}$, *rise time* 154 detik, dan *settling time* 757 detik. Hasil ini menunjukkan bahwa kombinasi parameter PID tersebut mampu menghasilkan respons yang cepat, akurat, dan stabil seperti yang ditunjukkan pada tabel 2.



Gambar 5. Hasil pengujian berulang sistem pid dengan *setpoint* 40°C



Gambar 6. Respon pada *setpoint* 50°C

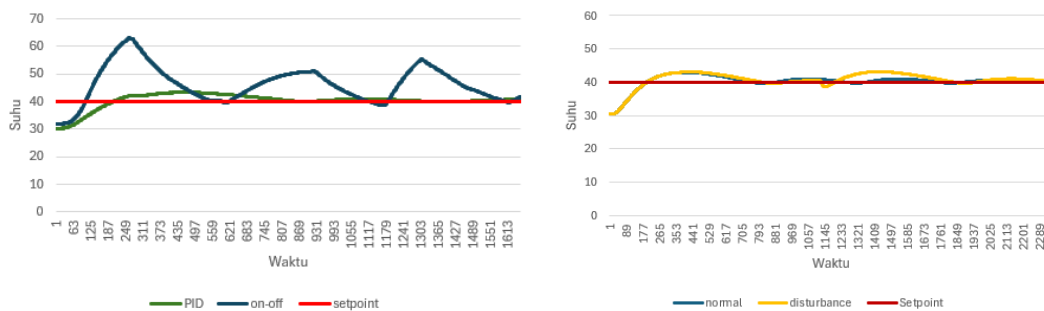


Gambar 7. Respon pada *setpoint* 60°C

Gambar 5 menunjukkan hasil pengujian sistem PID pada *setpoint* 40°C sebanyak tiga kali. Sistem menunjukkan performa baik dengan *overshoot* $< 4^\circ\text{C}$ tanpa osilasi berlebih, *steady-state error* $< 1^\circ\text{C}$, *settling time* ± 750 detik, dan *rise time* ± 120 detik, menandakan respons cepat dan stabil. Gambar 6 dan 7 menunjukkan hasil pengujian pada *setpoint* 50°C dan 60°C dengan performa lebih baik dari 40°C , ditandai *overshoot* $< 3^\circ\text{C}$ akibat pemanasan awal yang lebih agresif. *Steady-state error* tetap $< 1^\circ\text{C}$, *settling time* lebih cepat yaitu ± 500 detik (50°C) dan ± 395 detik (60°C), hal ini disebabkan *overshoot* pada 40°C lebih besar sehingga membuat *settling time* lebih lambat. *Rise time* untuk 50°C dan 60°C masing-masing 110 dan 108 detik, menunjukkan ketiga *setpoint* memiliki respons yang berdekatan.

Gambar 8 menunjukkan perbandingan grafik antara kontrol PID dan kontrol *on-off*, di mana kontrol PID menghasilkan grafik yang lebih baik. Meskipun masih terdapat *overshoot* $< 4^\circ\text{C}$, suhu kembali stabil pada *setpoint*. Sebaliknya, kontrol *on-off* mengalami *overshoot* hingga $< 22^\circ\text{C}$ dan *steady-state error* 10–15 $^\circ\text{C}$, namun metode ini memiliki *rise time* lebih cepat yaitu ± 70 detik. Sementara itu, gambar 9 menunjukkan perbandingan sistem PID saat ada gangguan dan tanpa gangguan, dengan gangguan berupa pembukaan pintu oven selama 15 detik. Pada detik ke-1110 suhu turun drastis hingga 38°C , lalu setelah pintu ditutup, suhu

kembali naik dengan sedikit *overshoot* 2–2.5°C dan stabil kembali pada detik ke-1700. Tabel 3 menunjukkan pengujian aplikasi *mobile* dengan *metode black box testing*, seluruh fitur utama dalam sistem, yaitu login, registrasi, pembaruan suhu *real-time*, grafik, *time remaining*, kontrol suhu dan waktu, tombol *start/stop*, serta *notifikasi*, telah diuji dan berfungsi dengan baik. Fitur login dan registrasi berhasil memverifikasi data pengguna dan mengarahkan ke *dashboard*. Pembaruan suhu berlangsung setiap 3 detik dan grafik diperbarui bersama *time remaining* setiap 1 menit, menunjukkan respons *real-time* sistem terhadap perubahan suhu. Kontrol suhu dan waktu berhasil mengirim data ke Firebase saat pengguna memberikan *input*, dan tombol *start/stop* bekerja sesuai fungsi untuk memulai atau menghentikan proses pengeringan. Fitur *notifikasi* juga aktif saat proses selesai. Beberapa fitur seperti grafik, pembaruan suhu, dan *time remaining* mengalami sedikit *delay* yang disengaja untuk menghindari konflik data dan kesalahan komunikasi antara ESP32 dan *Firestore*.



Gambar 8. Perbandingan pid dan on-off **Gambar 9.** Kendali pid dengan *disturbance*

Tabel 3. Hasil pengujian *mobile app* dengan *metode black box testing*

Fitur Uji	Hasil	Keterangan
Login page	Jika data login valid, sistem mengarahkan user ke <i>dashboard</i>	Berhasil
Register page	Jika <i>username</i> & <i>password</i> sudah benar maka user akan terdaftar	Berhasil
Update suhu <i>real-time</i> & chart	Update setiap 3 detik	Berhasil
Time reaminging	Update setiap 1 menit	Berhasil
Control temperature & time	Jika user melakukan <i>input</i> berupa suhu atau waktu maka data akan terkirim ke <i>Firestore</i>	Berhasil
Button start & stop	Jika <i>button start/stop</i> ditekan maka akan memulai/memberhentikan proses pengeringan	Berhasil
Notification	Muncul pada saat proses pengeringan selesai	Berhasil

Pembahasan

Berdasarkan analisis kebutuhan, sistem pengering rempah harus mampu menjaga suhu oven stabil pada *setpoint* tertentu dengan memperhatikan *steady-state error*, *overshoot*, *rise time*, dan *settling time*. Sistem juga dituntut memiliki akurasi pembacaan suhu tinggi serta mendukung pemantauan dan kendali jarak jauh secara *real-time*. Untuk memenuhi kebutuhan ini, digunakan sensor DS18B20 karena akurasinya tinggi dan kompatibel dengan mikrokontroler digital. ESP32 dipilih karena mendukung perhitungan PID dan konektivitas Wi-Fi. Pemanas dikendalikan melalui *dimmer* berbasis PWM, sementara pemantauan dilakukan melalui aplikasi Kodular yang terhubung ke *Firestore*. Sistem menggunakan algoritma PID untuk pengendalian suhu karena mampu memberikan respons halus dan terukur. *Tuning* dilakukan dengan metode *trial and error*, yang sesuai untuk sistem termal lambat dan

mudah diamati secara *empiris*. Hasil *tuning* pada tabel 2 menunjukkan sistem dapat mencapai performa yang stabil dan presisi.

Pengujian menunjukkan bahwa sistem kendali PID berbasis *trial and error* menunjukkan performa yang stabil dan presisi, dengan *overshoot* $<4^{\circ}\text{C}$, *steady-state error* $<1^{\circ}\text{C}$, *settling time* ± 750 detik, dan *rise time* ± 120 detik pada *setpoint* 40°C . Hasil pada *setpoint* 50°C dan 60°C menunjukkan kinerja lebih baik, dengan *overshoot* $<3^{\circ}\text{C}$ dan *settling time* yang lebih cepat. Salah satu penyebab *overshoot* lebih besar pada suhu 40°C adalah karena suhu target lebih dekat dengan suhu awal, sehingga sistem belum sempat mengoreksi laju pemanasan. Akibatnya, panas berlebih terus naik akibat inersia termal. Pada *setpoint* 50°C dan 60°C , waktu pemanasan lebih lama, memberi ruang bagi PID untuk mengatur kenaikan suhu secara lebih stabil. Hal ini juga mendukung penelitian sebelumnya yang dimana *overshoot* tinggi pada suhu target rendah juga terjadi dan pada suhu target tinggi *overshoot* semakin kecil (Awaludin & Waluyo, 2023).

Hasil yang ditunjukkan pada gambar 8 dan 9 adalah hasil yang menunjukkan bahwa kontrol *on-off* memiliki kelemahan signifikan dibandingkan kontrol PID, terutama pada *overshoot* dan kestabilan. Kontrol *on-off* bekerja secara biner tanpa mempertimbangkan besar dan arah *error*, sehingga menghasilkan *overshoot* hingga $\pm 22^{\circ}\text{C}$ dan *steady-state error* sebesar $10\text{--}15^{\circ}\text{C}$. Sebaliknya, kontrol PID menghitung *output* secara matematis dan merespons perubahan suhu secara halus dan terukur, terbukti dari *overshoot* $<4^{\circ}\text{C}$ dan *error* tunak $<1^{\circ}\text{C}$. Pengujian gangguan berupa pembukaan pintu oven selama 15 detik menyebabkan suhu turun ke 38°C , namun kembali ke *setpoint* dalam ± 590 detik dengan *overshoot* minor $2\text{--}2.5^{\circ}\text{C}$. Respons ini menunjukkan peran efektif elemen *derivatif* dalam mendeteksi perubahan cepat, dan elemen *integral* dalam mengoreksi *error* jangka panjang. Hasil ini mendukung penelitian sebelumnya yaitu di mana kontrol PID terbukti lebih efisien daripada *on-off* dalam sistem termal terutama dalam mengatasi kestabilan (Anil et al., 2023). Pada pengujian aplikasi menggunakan metode *black box testing* pada tabel 3 menunjukkan bahwa semua fitur berfungsi dengan baik tanpa adanya kesalahan ataupun gangguan, sehingga sistem ini telah diintegrasikan dengan ESP32 yang terhubung ke Firebase untuk mengontrol oven.

Penelitian ini mengintegrasikan sistem kendali PID berbasis sensor DS18B20 dengan teknologi IoT untuk pengeringan rempah secara *real-time*. Berbeda dengan penelitian sebelumnya yang hanya menggunakan sensor *thermocouple* tanpa dukungan IoT, sistem ini memungkinkan pemantauan dan pengendalian suhu oven secara jarak jauh melalui Firebase dan aplikasi *mobile*. Meskipun sama-sama menggunakan kontrol PID, metode *tuning trial and error* pada penelitian ini menunjukkan kinerja lebih baik dengan nilai *overshoot* $<4^{\circ}\text{C}$, dibandingkan $>10^{\circ}\text{C}$ pada penelitian sebelumnya.

Akurasi sensor DS18B20 juga telah diverifikasi, sehingga lebih unggul dalam kestabilan suhu dan keandalan pembacaan data dibandingkan temuan Awaludin & Waluyo (2023). Sementara itu, penelitian Annafi et al. (2023) menggunakan sensor *thermocouple* dan metode *Ziegler-Nichols* tanpa integrasi IoT, dengan hasil stabil pada *setpoint* lebih tinggi, namun tanpa verifikasi akurasi sensor, menjadikan penelitian ini lebih terverifikasi. Adapun keterbatasan sistem ini adalah suhu hanya stabil pada rentang $40\text{--}100^{\circ}\text{C}$ karena keterbatasan sensor DS18B20, serta belum dilakukan pengujian kadar air, kandungan senyawa aktif rempah, dan uji beban terhadap aplikasi *mobile* yang dikembangkan.

SIMPULAN

Temuan kami menunjukkan bahwa sistem kendali suhu oven listrik berbasis PID dan IoT berhasil menjaga suhu secara presisi dengan *overshoot* maksimum $<4^{\circ}\text{C}$ dan *steady-state error* $<1^{\circ}\text{C}$. Hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem memiliki kestabilan tinggi pada tiga *setpoint* berbeda, dengan rata-rata *settling time* ± 750 detik dan *rise time* ± 120 detik. Dibandingkan kontrol *on-off*, kontrol PID mampu mengurangi *overshoot* hingga $\pm 18^{\circ}\text{C}$ dan

error akhir hingga $\pm 14\%$, menunjukkan perbedaan signifikan dalam akurasi dan efisiensi kendali suhu. Sistem juga menunjukkan ketahanan terhadap gangguan, di mana suhu dapat kembali ke *setpoint* setelah penurunan akibat gangguan fisik, dengan waktu pemulihan sekitar ± 590 detik dan *overshoot* tambahan hanya $2\text{--}2.5^\circ\text{C}$. *Monitoring* berbasis IoT memungkinkan pengguna memantau dan mengontrol suhu oven secara *real-time* melalui aplikasi *mobile* yang terhubung dengan Firebase, mendukung fleksibilitas dan pemeliharaan sistem secara jarak jauh. Seluruh fitur aplikasi berjalan stabil dengan penundaan data minimal, sehingga sistem andal untuk pemanasan presisi dalam aplikasi pengeringan berbasis suhu.

REFERENSI

- Ali, A., Chua, B. L., Chow, Y. H., & Tee, L. H. (2023). Quality and energy efficiency evaluation of *Rosmarinus officinalis* L. by intermittent and continuous microwave drying: Polyphenol composition, bioactive compounds quantification, antioxidant properties, physical characteristics, and energy consumption. *Journal of Food Process Engineering*, 46(12), e14453. <https://doi.org/10.1111/jfpe.14453>
- Altunel, A. O., Caglar, S., & Altunel, T. (2021). Determining the habitat fragmentation through geoscience capabilities in Turkey: A case study of wildlife refuges. *International Journal of Engineering and Geosciences*, 6(2), 104–116. <https://doi.org/10.26833/ijeg.712549>
- Anil, S., Srinaath, H. H., & Jayakumar, M. (2023). Comparative Analysis of ON/OFF, PID and Model Predictive Control System in HVAC Systems. *2023 Innovations in Power and Advanced Computing Technologies (i-PACT)*, 1–5. <https://doi.org/10.1109/i-PACT58649.2023.10434750>
- Annafi, M. I., Syakur, A., & M., A. A. Z. (2023). Perancangan Kontrol Suhu Berbasis PID dengan Metode Ziegler Nichols 1 pada Oven Listrik. *Transient*, 12(1), 31–38. <https://doi.org/10.14710/transient.v12i1.31-38>
- Awaludin, M. I., & Waluyo, B. D. (2023). Perancangan Sistem Kontrol Suhu Oven Listrik Menggunakan Metode PID Design of Electric Oven Temperature Control System Using PID Method. *Telekontran*, 11(2), 129–139. <https://doi.org/10.34010/telekontran.v11i2.11366>
- Chaisawasd, A., Ardhan, K., Obma, J., & Sa-Ngiamvibool, W. (2024). Designing Pid Controller Using Ssa for Interconnected Thermal Power Systems. *EUREKA, Physics and Engineering*, 2024(3), 73–80. <https://doi.org/10.21303/2461-4262.2024.003321>
- Febrinda, A. E., Laila, F., Mariyani, N., Resmeiliana, I., & Dahliani, L. (2023). Phytochemical profiles and the effect of three drying methods on antioxidant and antibacterial activity of *Eleutherine bulbosa* (Mill.) Urb. *South African Journal of Botany*, 157, 258–265. <https://doi.org/10.1016/j.sajb.2023.03.063>
- Güney, A., Temizkan, M., Tekin, S., Samuk, D. C., & Ç, O. (2020). Temperature Control of an Electric Furnace with Intuitive Control Methods. *Turkish Journal of Electromechanics & Energy*, 5(1), 3–8.
- Ivanov, V., Smolentsev, S., & Filyakov, A. (2022). Microprocessor temperature control device for a thermal object. *E3S Web of Conferences*, 363, 1–6. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202236301027>
- Kaur, H., Singh, S., Kanagala, S. G., Gupta, V., Patel, M. A., & Jain, R. (2024). Herbal Medicine-A Friend or a Foe of Cardiovascular Disease. *Cardiovascular & Hematological Agents in Medicinal Chemistry*, 22(2), 101–105. <https://doi.org/10.2174/0118715257251638230921045029>
- Kumari, H. (2021). Pid Based Room Temperature Control. *International Journal of Advanced Research in Computer Science*, 12(3), 7–11. <https://doi.org/10.26483/ijarcs.v12i3.6739>
- Massarioli, A. P., de Alencar, S. M., Siqueira, A. F., de Melo, M. P., Vidigal, I. G., & Ferreira, A. L. G. (2023). Evaluation of the Quality and Antioxidant Activity of Dehydrated Medicinal Herbs. *Horticulturae*, 9(5), 1–12.

- <https://doi.org/10.3390/horticulturae9050597>
- Nurhaslina, C. R., Andi Bacho, S., & Mustapa, A. N. (2022). Review on drying methods for herbal plants. *Materials Today: Proceedings*, 63(January), S122–S139. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.02.052>
- Said, E. B., Hicham, E. F., Naïma, Z., Naji, A., Hafida, B., & Fatiha, B. (2022). Effect of drying techniques on the Moroccan Pelargonium graveolens L'Hér. leaves essential oil: yield, composition, total polyphenol content, antioxidant activity, and hygroscopic parameters. *Journal of Essential Oil Bearing Plants*, 25(3), 508–523. <https://doi.org/10.1080/0972060X.2022.2086826>
- Silpa, S. G., Smitha, G. R., & Ranjitha, K. (2021). Drying and packaging methods impact the bacoside profile and microbiological quality of Brahmi herb (*Bacopa monnieri* L.) during storage. *Industrial Crops and Products*, 159(November 2020), 113064. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2020.113064>
- Somefun, O. A., Akingbade, K., & Dahunsi, F. (2021). The dilemma of PID tuning. *Annual Reviews in Control*, 52, 65-74. <https://doi.org/10.1016/j.arcontrol.2021.05.002>
- Tamrakar, A. K., Shukla, A., Kalifullah, A. H., Reegu, F. A., & Shukla, K. (2022). extended review on internet of things (IoT) and its characterisation. *International Journal of Health Sciences*, 6(April), 8490–8500. <https://doi.org/10.53730/ijhs.v6ns2.7177>
- Utama, D. M., Abdullah, F. F., Amallynda, I., & Baroto, T. (2024). Integrated production-inventory model for multi-item raw materials with exponential quality degradation: a real case study. *OPSEARCH*, 61(4), 1862–1887. <https://doi.org/10.1007/s12597-024-00759-z>
- Yang, T., Zheng, X., Xiao, H., Shan, C., Yao, X., Li, Y., & Zhang, J. (2023). Drying Temperature Precision Control System Based on Improved Neural Network PID Controller and Variable-Temperature Drying Experiment of Cantaloupe Slices. *Plants*, 12(12), 1–20. <https://doi.org/10.3390/plants12122257>
- Zuki, R. F. M., Ismail, M. F., & Aziz, J. A. (2024). Physical and Chemical Changes of Seven Selected Herbs Used as Herbal Bath Affected by Different Drying Methods. *Pertanika Journal of Tropical Agricultural Science*, 47(3), 621–643. <https://doi.org/10.47836/pjtas.47.3.03>