

PENGARUH DEBIT UDARA TERHADAP RESPON SISTEM KENDALI SUHU PADA MESIN SANGRAI KOPI PEMANAS RADIASI BERBASIS PID

Candra Wahyu Sportyawan^{1*}, Niyar Candra Agustin², Puji Basuki¹, January Jefry Prasetya¹, Shintawati Dyah Purwaningrum², Sukaryo²

¹ Program Studi D3 Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Pandanaran

² Program Studi D3 Teknik Kimia, Fakultas Teknik, Universitas Pandanaran
Jl. Banjarsari Barat No.1, Pedalangan, Kec. Banyumanik, Kota Semarang.

* Email: candra.wahyu@unpand.ac.id

Abstrak

Mesin sangrai kopi yang banyak digunakan saat ini umumnya memanfaatkan metode pemanasan induksi atau konveksi. Metode induksi sering menghasilkan distribusi panas yang kurang merata, sedangkan metode konveksi membutuhkan konsumsi energi yang relatif tinggi. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh variasi debit udara masukan terhadap respon sistem kendali suhu pada mesin sangrai kopi berbasis pemanas radiasi dengan kontrol Proportional-Integral-Derivative (PID) serta menentukan nilai debit udara yang menghasilkan respon suhu paling optimal. Penelitian dilakukan menggunakan metode eksperimen dengan memberikan variasi debit udara sebesar 0 LPM, 2,5 LPM, 5 LPM, 7,5 LPM, 10 LPM, dan 12,5 LPM. Parameter yang dianalisis meliputi waktu respon sistem, suhu maksimum, suhu minimum, dan elevasi suhu. Hasil penelitian menunjukkan bahwa waktu respon sistem berada pada rentang 704,5–842,5 detik. Suhu maksimum yang dicapai berkisar antara 150°C–151,5°C, sedangkan suhu minimum berada pada rentang 147°C–148°C dengan elevasi suhu antara 3°C–5°C. Analisis regresi linier menunjukkan adanya kecenderungan peningkatan parameter suhu seiring bertambahnya debit udara. Namun demikian, hasil uji ANOVA menunjukkan bahwa variasi debit udara tidak memberikan pengaruh yang signifikan terhadap parameter yang diamati. Respon sistem terbaik diperoleh pada kondisi tanpa penambahan debit udara (0 LPM).

Kata kunci: Debit Udara, Kontrol PID, Mesin Sangrai Kopi, Radiasi Panas, Respon Sistem Suhu.

PENDAHULUAN

Perkembangan bisnis kopi di Indonesia berkembang sangat pesat. Ini dibuktikan dengan banyaknya cafe dan kedai kopi yang berkembang di seluruh daerah Indonesia. Cafe kopi tidak hanya digunakan untuk sekedar minum kopi, namun sudah menjadi tempat berkumpul, meeting dan pertemuan dengan relasi atau bahkan tempat rekreasi keluarga. Bisnis kopi sangat menjanjikan ditengah perkembangan cafe dan warung kopi di Indonesia.

Minuman kopi yang nikmat tidak dibuat dengan proses yang mudah. Perlu proses panjang yang dilewati biji-biji kopi untuk menghasilkan secangkir kopi yang nikmat. Proses pengolahan kopi dilakukan melalui proses sortir, pengeringan, pengupasan kulit, penyangraian (*roaster*) dan penggilingan sebelum jadi bubuk kopi. Proses penyangraian biji kopi merupakan proses yang sangat penting untuk menghasilkan rasa kopi yang nikmat. Oleh karena itu, pengendalian suhu selama proses sangrai kopi menjadi faktor penting untuk menghasilkan kualitas kopi yang konsisten (Dewi Anggraeni, Saputra and Sakti, 2025). Saat ini terdapat mesin sangrai kopi dengan beberapa metode. Metode yang pertama menggunakan sistem induksi panas dengan memberikan panas dari luar tabung untuk memanaskan dinding tabung yang bersentuhan langsung ke biji kopi. Dengan metode tersebut, kualitas hasil kurang maksimal karena terjadi titik-titik gosong pada biji kopi dan juga kopi matang diluar tapi belum matang dibagian dalam. Metode yang kedua dengan sistem konveksi panas yaitu udara panas dimasukan kedalam tabung. Sistem menghasilkan kualitas yang lebih baik tetapi karena panas mengalir melewati pipa-pita sehingga banyak panas hilang dalam perjalanan ke tabung. Dengan begitu energi yang dibutuhkan menjadi lebih banyak dan boros. Disamping itu, temperatur *roasting* yang tidak stabil dapat menyebabkan ketidak konsistenan kematangan biji kopi serta mempengaruhi karakteristik rasa dan aroma produk akhir. Oleh karena itu, penerapan sistem kendali otomatis pada mesin sangrai kopi menjadi solusi untuk meningkatkan stabilitas suhu dan konsistensi kualitas produk (Dewi, Yoga and Rusli, 2026).

Dari permasalahan tersebut maka perlu dibuat metode sangrai kopi menggunakan sistem radiasi panas. Dengan sistem ini dapat lebih menghemat energi. Pengendalian suhu pada ruang sangrai kopi dikendalikan dengan metode kontrol PID. Kontrol PID terbukti dapat menghasilkan performa kendali yang baik walaupun dengan menggunakan algoritma yang sederhana. Beberapa penelitian juga banyak menggunakan kontrol PID untuk pengendalian suhu. Kontrol PID dapat digunakan untuk mengendalikan suhu pada pengendalian parameter suhu dan kelembaban pada lemari khusus pengering untuk pakaian (Awwal, Murtono and Adhisuwignjo, 2024). Masih banyak penelitian yang menggunakan metode PID dalam rangka pengendalian suhu untuk aplikasi tertentu.

Dalam rangka pengendalian suhu, pada mesin sangrai kopi ini menggunakan peralatan kontrol berupa mikrokontrol arduino. Mikrokontroler arduino sudah banyak digunakan untuk penelitian dan menghasilkan data yang akurat. Pada aplikasi terkait pengolahan kopi juga menggunakan mikrokontroler arduino seperti kendali mesin sangrai biji kopi yang dapat meningkatkan tingkat produktifitas pengusaha bubuk kopi, alat uji untuk memonitor suhu pada proses pemanasan terhadap waktu proses sangrai produk biji kopi serta pengendalian parameter suhu pada mesin oven (Dalimunthe, Priyambada and Supriyanto, 2023).

Meskipun beberapa penelitian tersebut telah membahas pengembangan sistem kendali suhu pada mesin sangrai kopi, sebagian besar masih berfokus pada perancangan sistem kontrol dan integrasi sistem monitoring. Kajian mengenai pengaruh parameter fisik khususnya pada parameter debit udara terhadap performa respon sistem kendali suhu masih relatif terbatas. Padahal dalam proses sangrai kopi, aliran udara memiliki peran penting dalam proses pemindahan panas yang dapat mempengaruhi respon sistem kendali suhu pada mesin sangrai kopi.

METODOLOGI

Metode eksperimen digunakan melalui pemberian variasi debit udara masuk ke tabung yang berisi pemanas dan dikendalikan dengan menggunakan kontrol PID (*Proporsional-Integral-derivative*). Pemberian variasi debit udara dilakukan secara bertahap yang kemudian dimonitor respon sistem kendali suhunya. Data kecepatan respon sistem diambil pada saat diberi debit udara masuk ke tabung sangrai untuk kembali ke set poin. Eksperimen dilakukan pada suhu tabung sangrai kopi yang diberikan debit udara masuk. Selanjutnya, data didapat dari grafik yang ditunjukkan pada oscilloscope/data logger. Data tersebut itulah yang nantinya dianalisa untuk diambil suatu kesimpulan.

Sistem kendali PID merupakan metode kontrol yang berfungsi untuk meminimalkan selisih antara suhu aktual yang terukur dengan suhu target yang telah ditentukan (*set point*) melalui mekanisme umpan balik. (Labib and Rusimamto, 2023). Hubungan antara nilai *error* dengan sinyal kontrol pada pengendali PID dinyatakan dalam persamaan berikut:

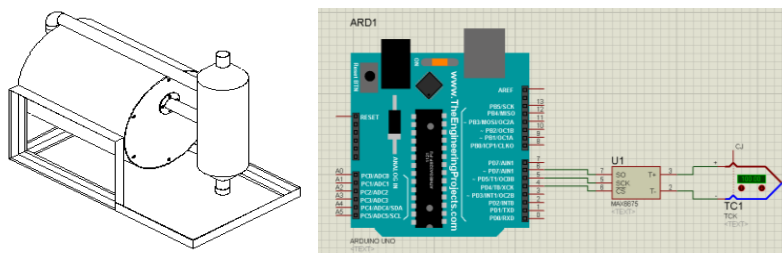
$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (1)$$

dengan:

- $u(t)$: Sinyal Kontrol
- $e(t)$: *Error* (selisih antara *set point* dengan suhu aktual)
- K_p : Konstanta Proporsional
- K_i : Konstanta Integral
- K_d : Konstanta Derivative

Komponen proporsional berfungsi menghasilkan sinyal kontrol yang sebanding dengan nilai *error* sehingga mampu mempercepat respon sistem terhadap perubahan *set point*. Komponen integral berfungsi mengakumulasi *error* sepanjang waktu untuk menghilangkan *error* pada keadaan tunak. Sedangkan komponen derivative berfungsi memprediksi perubahan *error* sehingga mampu mengurangi *overshoot* dan meningkatkan kestabilan sistem (Yao, 2025).

Pada penelitian ini, sistem kendali PID digunakan untuk mengatur temperatur pada mesin sangrai kopi berbasis pemanas radiasi. Temperatur ruang pemanas diukur menggunakan sensor temperatur yang dipasang pada ruang sangrai. Desain tabung uji dan rangkaian pembaca suhu dapat dilihat pada gambar 1.



Gambar 1. Desain Tabung Uji dan Rangkaian Pembaca Suhu

Monitoring respon suhu menggunakan kontroler Arduino Uno. Untuk sensor digunakan sensor termokopel tipe-K dengan modul penguat max6675. Untuk komunikasi data jadi satu dengan konektor USB untuk mendownload program ke arduino.

Pembacaan data dilakukan pada program *visual basic*. *Software visual basic* dengan arduino dikoneksikan dengan komunikasi serial USB. Seting baudrate, Even parity, data dan stop bit sesuai dengan nilai dari parameter yang sama dengan seting pada arduino. Untuk pembacaan data dari arduino menggunakan instruksi `strInput = MSComm1.Input` yang memanfaatkan komponen MSComm dari *software visual basic*. Tampilan program *visual basic* dapat dilihat pada gambar 2.



Gambar 2. Tampilan Program Pengambil Data Suhu

Analisis deskriptif dilakukan dengan melakukan pengamatan pada data hasil eksperimen. Data diambil dari percobaan pada semua parameter uji. Selanjutnya data tersebut dirata-rata dan kemudian data yang didapat tersebut dibuat dalam bentuk tabel, dibuat dalam bentuk grafik dan dilakukan analisis. Analisis dilakukan dengan analisis grafik dengan persamaan garis linier dan dengan uji ANOVA yang selanjutnya ditarik kesimpulannya.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Data diperoleh dari pengujian sistem kendali suhu dengan enam variasi debit udara masukan ke tabung uji. Variasi debit udara yang digunakan yaitu 0 lpm, 2,3 lpm, 5 lpm, 7,5 lpm, 10 lpm dan 12,5 lpm. Pengujian pada setiap nilai debit udara dilakukan sebanyak dua kali percobaan untuk memperoleh data yang lebih representatif.

Parameter yang diamati dalam penelitian ini meliputi parameter modus suhu, suhu tertinggi, suhu terendah, waktu respon, elevasi dan median. Nilai modus merupakan nilai suhu yang sering muncul setelah sistem mencapai *set point*, sedangkan nilai median merupakan nilai tengah dari data suhu yang diperoleh setelah sistem mencapai *set poin*. Data yang didapat dari hasil pengujian dapat dilihat pada tabel 1.

Tabel 1. Tabel Hasil Pengujian

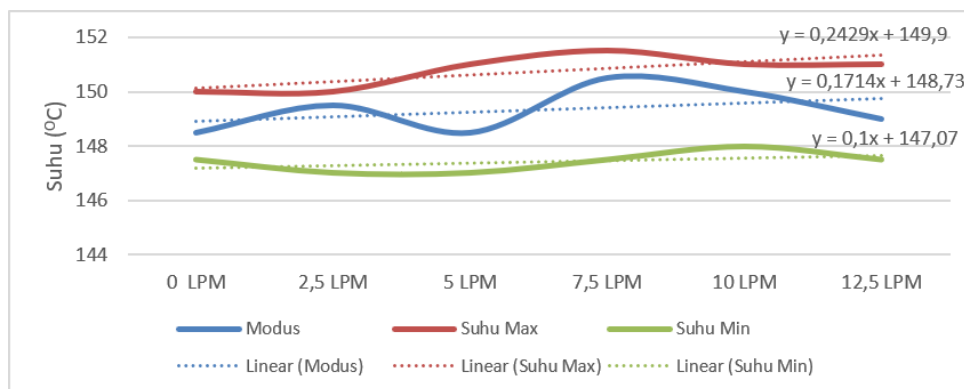
Parameter	0 LPM	2,5 LPM	5 LPM	7,5 LPM	10 LPM	12,5 LPM
Modus	148.5	149.5	148.5	150.5	150	149
Suhu Max	150	150	151	151.5	151	151
Suhu Min	147.5	147	147	147.5	148	147.5
Waktu(s)	704.5	818	820	689	791.5	842.5

Elevasi	3	3	4	5	3	4
---------	---	---	---	---	---	---

Berdasarkan Tabel 1, nilai modus suhu seluruh variasi debit udara berada pada nilai 148°C sampai 150,5°C. Nilai tersebut masih berada pada sekitar *set point* sistem sehingga dapat dikatakan bahwa sistem kendali suhu berbasis PID mampu menjaga suhu sistem tetap pada rentan yang mendekati nilai target yang ditentukan. Hal ini sesuai dengan teori sistem kendali temperatur yang menyatakan bahwa metode *Proportional-Integral-Derivative* (PID) mampu meminimalkan *error* antara suhu aktual dan *set point* melalui mekanisme umpan balik sehingga sistem dapat mempertahankan temperatur mendekati nilai yang diinginkan (Dewi Anggraeni, Saputra and Sakti, 2025).

Nilai suhu tertinggi diperoleh pada debit udara 7,5 LPM dengan suhu mencapai 151,5 °C. Ini berarti terjadi kenaikan sebesar 2,5 °C diatas nilai *set point*. Sementara itu, suhu terendah terjadi pada debit udara 2,5 LPM dan 5 LPM dengan suhu 147 °C. Dengan demikian dapat disimpulkan bahwa nilai *error* sistem berada pada nilai ± 2 °C dari nilai *set point*. Nilai elevasi suhu menunjukan nilai antara 3 °C hingga 5 °C. Hal ini menunjukan bahwa fluktuasi suhu sistem masih berada pada batas relatif kecil sehingga sistem kendali masih mampu mempertahankan suhu selama proses dilakukan.

Data-data yang telah didapat bila dibuat dalam bentuk grafik, dapat dilihat persamaan garis linier yang terbentuk. Berikut ini grafik data yang didapatkan :



Gambar 3. Grafik Data Suhu

Pada grafik suhu terlihat bahwa pola grafik tidak membentuk garis lurus melainkan menunjukan fluktuasi yang menyerupai gelombang. Namun demikian, ketika dilakukan pendekatan menggunakan persamaan garis linier, diperoleh kecenderungan peningkatan suhu seiring dengan bertambahnya debit udara masukan. Pada grafik suhu maksimum, diperoleh persamaan linier:

$$y = 0,2429x + 149,9 \quad (2)$$

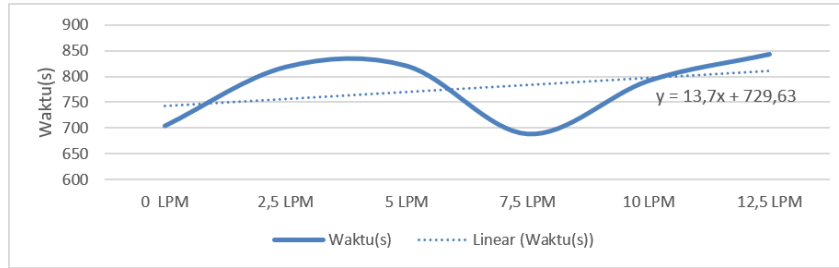
Persamaan tersebut menunjukan bahwa peningkatan debit udara cenderung meningkatkan nilai suhu maksimum sistem. Pada grafik suhu minimum, diperoleh persamaan linier:

$$y = 0,1x + 147,07 \quad (3)$$

Persamaan tersebut menunjukan bahwa suhu minimum mengalami kecenderungan meningkat meskipun dengan gradien yang lebih kecil dibandingkan dengan suhu maksimum. Pada grafik modus suhu, diperoleh persamaan linier:

$$y = 0,1714x + 148,73 \quad (4)$$

Persamaan tersebut menunjukan bahwa nilai suhu yang paling sering muncul juga memiliki kecenderungan meningkat seiring dengan bertambahnya debit udara. Hal ini mengindikasikan bahwa debit udara mempengaruhi distribusi suhu di dalam tabung uji.

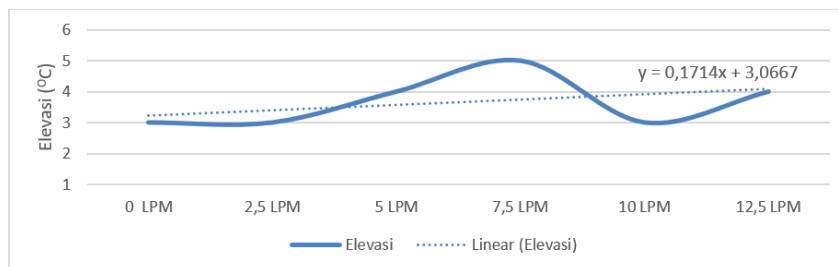


Gambar 4. Grafik Waktu Respon

Grafik waktu respon juga menunjukkan pola fluktuatif. Namun setelah dilakukan pendekatan garis linier diperoleh persamaan:

$$y = 13,7x + 729,63 \quad (5)$$

Persamaan tersebut menunjukkan bahwa waktu respon sistem cenderung meningkat seiring bertambahnya debit udara masukan. Hal ini disebabkan oleh meningkatnya debit udara yang mempengaruhi mekanisme perpindahan panas sehingga sistem memerlukan waktu lebih lama untuk mencapai kondisi stabil. Penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa sistem kontrol temperatur pada proses termal sering dipengaruhi oleh dinamika perpindahan panas dan delay sistem, yang dapat menyebabkan perubahan pada waktu respon dan settling time sistem kontrol (Qi *et al.*, 2022).



Gambar 5. Grafik Elevasi

Elevasi suhu merupakan selisih antara suhu maksimum dan suhu minimum pada setiap kondisi pengujian. Dari grafik diperoleh persamaan linier:

$$y = 0,1714x + 3,0667 \quad (6)$$

Persamaan tersebut menunjukkan bahwa nilai elevasi suhu cenderung meningkat seiring bertambahnya debit udara. Hal tersebut menunjukkan bahwa variasi debit udara masukan dapat mempengaruhi kestabilan distribusi suhu pada tabung uji.

Selain analisis grafik, penelitian ini juga menggunakan uji statistik ANOVA untuk mengetahui apakah variasi debit udara masukan memberikan pengaruh signifikan terhadap parameter yang diamati. Uji ANOVA ini dilakukan dengan menggunakan software MS Excel. Hasil uji ANOVA menunjukkan bahwa:

1. Pada parameter waktu respon, diperoleh nilai $F_{hitung} = 0,226214$ dengan $F_{Tabel} = 5,317655$. Karena F_{hitung} lebih kecil dari F_{Tabel} serta P-Value = 0,647 yang lebih dari 0,05, maka disimpulkan bahwa variasi debit udara tidak memberikan perbedaan yang signifikan terhadap waktu respon sistem.
2. Pada parameter suhu maksimum, diperoleh $F_{hitung} = 1,612903$ dengan P-Value = 0,239 > 0,05. Hasil ini menunjukkan bahwa variasi debit udara juga tidak memberikan pengaruh signifikan terhadap suhu maksimum sistem.

3. Pada parameter suhu minimum. Diperoleh $F_{hitung}=0,533333$ dengan $P\text{-Value} = 0,486 > 0,05$. Hasil ini menunjukkan bahwa variasi debit udara tidak memberikan perbedaan signifikan terhadap suhu minimum sistem.
4. Pada parameter elevasi suhu, diperoleh $F_{hitung}=2$ dengan $P\text{-Value} = 0,195 > 0,05$. Hasil ini menunjukkan bahwa variasi debit udara tidak menunjukkan pengaruh signifikan terhadap elevasi suhu sistem.

Berdasarkan hasil analisis tersebut dapat disimpulkan bahwa meskipun secara grafik terdapat kecenderungan perubahan nilai parameter akibat variasi debit udara masukan, namun secara statistik perubahan tersebut tidak menunjukkan perbedaan yang signifikan terhadap performa sistem kendali menggunakan PID controller. Hal ini sejalan dengan penelitian sebelumnya yang menyatakan bahwa sistem kontrol PID memiliki kemampuan untuk mempertahankan stabilitas temperatur meskipun terjadi gangguan pada sistem, selama parameter pengendali berada pada kondisi yang optimal (Miskon, Rahiman and Taib, 2025).

KESIMPULAN

Kesimpulan yang didapat pada penelitian ini yaitu sebagai berikut:

1. Dari penelitian didapatkan nilai waktu respon antara 704,5 sampai 842,5 detik, nilai suhu tertinggi dari 150 sampai 151 derajat celsius, nilai suhu terendah 147 sampai 148 derajat celsius, dengan elevasi antara 2,5 sampai 3,5 derajat Celsius.
2. Hasil analisa statistik menggunakan uji ANOVA dapat disimpulkan bahwa meskipun secara grafik terdapat kecenderungan perubahan nilai parameter akibat variasi debit udara masukan, namun secara statistik perubahan tersebut tidak menunjukkan perbedaan yang signifikan terhadap performa sistem kendali menggunakan PID controller.
3. Dari hasil analisis data didapatkan bahwa respon sistem yang paling baik adalah pada saat nilai debit udara yaitu 0 LPM atau tidak diberikan udara masukan. Dengan ini direkomendasikan pembuatan desain tabung sangrai kopi metode radiasi panas berdasarkan uji respon suhu yang dilakukan yaitu tabung tanpa diberi udara masukan.

DAFTAR PUSTAKA

- Awwal, Z.I., Murtono, A. and Adhisuwarnjo, S. (2024) 'Implementasi Kontrol PID untuk Pengaturan Suhu dan Kelembaban pada Lemari Pengereng Pakaian', *Kohesi: Jurnal Multidisiplin Saintek*, 2(8), pp. 1–15.
- Dalimunthe, A.K., Priyambada and Supriyanto, G. (2023) 'Pengaruh Suhu Pemanasan Terhadap Waktu Roasting Biji Kopi Arabika Jenis Gayo Varietas Abbysinia Di Tilasawa Coffee Roaster Yogyakarta', *Agricultural Engineering Innovation Journal*, 1(2), pp. 77–94. Available at: <https://doi.org/10.55180/aei.v1i2.716>.
- Dewi, A.F., Yoga, A. and Rusli, R. (2026) 'Automatic Coffee Roasting System With Arduino Uno Based Temperature Control', *G-Tech: Jurnal Teknologi Terapan*, 10(1), pp. 417–424. Available at: <https://doi.org/10.70609/g-tech.v10i1.8921>.
- Dewi Anggraeni, Saputra, A.I. and Sakti, S.P. (2025) 'Optimasi Parameter PID Pada Sistem Kontrol Suhu Alat Roasting Biji Kopi', *Jurnal Fisika Unand*, 14(2), pp. 145–151. Available at: <https://doi.org/10.25077/jfu.14.2.145-151.2025>.
- Labib, A. and Rusimanto, W. (2023) 'Implementation of PID-Based Temperature Control System for Helmet Dryers', *Indonesian Journal of Electrical and Electronics Engineering (INAJEEE)*, 6(1), pp. 23–29. Available at: <https://doi.org/10.26740/inajeee.v6n1>.
- Miskon, M.T., Rahiman, M.H.F. and Taib, M.N. (2025) 'Improving Coffee Roast Yield Consistency with Self-Tuned Fuzzy-PID Controller', *International Journal of Integrated Engineering*, 17(2), pp. 301–314. Available at: <https://doi.org/10.30880/ijie.2025.17.02.025>.
- Qi, R. et al. (2022) 'Design of the PID temperature controller for an alkaline electrolysis system with time delays', *International Journal of Hydrogen Energy*, pp. 1–30. Available at: <http://arxiv.org/abs/2210.00801>.

- Setiyoko, A. and Yuliana, D.E. (2022) ‘Kendali Suhu Minyak Goreng Pada Penggorengan Sosis Menggunakan Kontrol PID’, *JASEE Journal of Application and Science on Electrical Engineering*, 3(01), pp. 52–62. Available at: <https://doi.org/10.31328/jasee.v3i01.6>.
- Yao, J. (2025) *Research on the Optimization of PID Temperature Control for High-Precision Applications*, *Highlights in Science, Engineering and Technology ACME*.