

Rancang Bangun Sistem Pengendalian Suhu dan Ketinggian Air Dengan Pengendalian PID Berbasis *Direct Digital Controller*

Amanda Nabila¹, Nanang Mulyono², Febi Ariefka Septian Putra³

^{1,2,3}Jurusan Teknik Elektro, Politeknik Negeri Bandung, Bandung 40559

¹E-mail : amanda.nabila.toi21@polban.ac.id

²E-mail : nanang.mulyono@polban.ac.id

³E-mail : febi.ariefka@polban.ac.id

ABSTRAK

Pengendalian suhu dan ketinggian air merupakan aspek penting dalam berbagai proses industri, seperti pengolahan makanan dan minuman. Penelitian ini merancang dan merealisasikan sistem pengkondisi air otomatis untuk mengatasi tantangan fluktuasi suhu dan level air yang dapat mempengaruhi kualitas dan mutu produk. Sistem pengkondisi air yang dirancang merupakan sistem *Multi-Input Multi-Output* (MIMO) dan pengendali yang digunakan *Proportional-Integral-Derivative* (PID) berbasis *Direct Digital Controller* menggunakan Raspberry Pi Pico. Penalaan parameter PID menggunakan metode Ziegler-Nichols dan topologi kontrol paralel. Hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem mampu merespon perubahan *setpoint* suhu dengan *rise time* tercepat 31,24 detik, *overshoot* maksimum 18,77%, dan *settling time* tercepat 94,53 detik, serta *error steady-state* kurang dari 5%.

Kata Kunci

PID, Ziegler-Nichols, kontrol paralel, Raspberry Pi Pico, kontrol suhu, MIMO

Controlling water temperature and level is an important aspect in various industrial processes, such as food and beverage processing. This study designs and realizes an automatic water conditioning system to overcome the challenges of temperature and water level fluctuations that can affect product quality. The designed water conditioning system is a Multi-Input Multi-Output (MIMO) system and the controller used is Proportional-Integral-Derivative (PID) based on a Direct Digital Controller using a Raspberry Pi Pico. PID parameter tuning uses the Ziegler-Nichols method and parallel control topology. The test results show that the system is able to respond to changes in temperature setpoint with the fastest rise time of 31.24 seconds, a maximum overshoot of 18.77%, and the fastest settling time of 94.53 seconds, as well as a steady-state error of less than 5%.

Keywords

PID, Ziegler-Nichols, parallel control, Raspberry Pi Pico, temperature control, MIMO

1. PENDAHULUAN

Kemajuan teknologi mendorong pengembangan kendali otomatis guna meningkatkan efisiensi dan efektivitas produksi. Pengendalian suhu dan ketinggian air dalam tangki menjadi aspek penting dalam industri, seperti pengolahan makanan dan minuman, guna menjaga mutu produk, efisiensi energi, dan stabilitas proses (1)(2). Suhu optimal diperlukan pada begbagai proses, seperti ekstraksi kopi, suhu air 20°C menghasilkan rasa dan aroma yang baik serta memengaruhi viskositas dan kapasitas kalor (3). Pada susu pasteurisasi, busa minimal terbentuk di 25°C, dan kualitas meningkat di atas 40°C (4). Produk daging olahan seperti sosis menggunakan suhu 32°C dalam proses emulsi untuk menghasilkan tekstur yang baik (5). Namun, sistem pengkondisi air sering menghadapi fluktuasi suhu dan level air yang menyebabkan ketidaksesuaian terhadap *setpoint*, berdampak pada mutu produk dan efisiensi proses. Oleh karena itu, diperlukan sistem kendali otomatis yang responsif dan stabil, dengan metode umum seperti *Proportional-Integral* (PI), *Proportional-Integral-Derivative* (PID), *Fuzzy Logic Controller* (FLC), serta metode kendali lanjutan lainnya (6). Seperti pada penelitian (7), sistem pengkondisi air pada vending machine dengan kontrol PID membutuhkan 22 menit untuk memanaskan 5

liter air dari 28°C ke 50°C, dan 4 jam untuk pendinginan dari 28°C ke 20°C.

Sebagian besar penelitian sebelumnya hanya berfokus pada satu variabel, seperti suhu atau level air, padahal keduanya saling terkait sehingga lebih tepat dikendalikan dengan pendekatan multivariabel. Beberapa studi telah menerapkan pendekatan ini, salah satunya oleh (8) yang berhasil mengendalikan suhu dan level air pada *vending machine*, dimana penurunan suhu 2 liter air dari 27°C ke 20°C memerlukan 145 menit. Penelitian lain oleh (9) mengembangkan sistem pengkondisi air untuk kolam ikan menggunakan kontrol logika fuzzy, dengan waktu pemanasan 1°C selama 38,9 menit dan pendinginan 1°C selama 20,4 menit pada ketinggian air 15 cm. Sementara itu, (10) merancang sistem pemanas air berbasis servo *valve* yang mampu mempertahankan suhu 40°C pada tangki 10 liter dalam 30 menit, dan (11) merancang sistem pengendalian suhu berbasis Arduino untuk pemanasan dari 45°C ke 50°C dalam 540 detik dan pendinginan ke 40°C dalam 238 detik. Kedua penelitian terakhir menggunakan kontrol PID dan menunjukkan kemampuan menjaga suhu air sesuai *setpoint* dengan respon yang stabil.

Penelitian ini bertujuan merancang dan merealisasikan sistem pengkondisi air dengan kontrol PID paralel

menggunakan penalaan Ziegler-Nichols berbasis *Direct Digital Controller* (DDC) (12) menggunakan Raspberry Pi Pico, untuk menghasilkan sistem dengan respon cepat dan stabil terhadap perubahan suhu dan level air, dengan spesifikasi *overshoot* kurang dari 20%, *settling time* kurang dari 10 menit, *rise time* kurang dari 5 menit, dan *error steady-state* kurang dari 5%.

2. PENGENDALIAN *PROPORTIONAL INTEGRAL DERIVATIVE* DAN PENALAN *ZIEGLER-NICHOLS*

Kontrol *Proportional-Integral-Derivative* (PID) dengan konfigurasi paralel merupakan metode pengendalian di mana dua atau lebih kontrol PID bekerja secara bersamaan pada suatu sistem untuk mengatur variabel proses (13)(14). Setiap kontroler memiliki jalur kendali sendiri, dan *output* PID digabungkan untuk mengendalikan aktuatur. Dengan menempatkan kontrol PID secara terpisah pada katup air panas dan air dingin, pengendalian menjadi lebih presisi karena tiap kontroler fokus pada satu bagian proses. *Output* dari konfigurasi PID paralel dihitung menggunakan persamaan yang ditunjukkan pada Persamaan (1).

$$u(t) = K_p \cdot e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt + T_d \frac{de(t)}{dt} \quad (1)$$

Parameter K_p , K_i , dan K_d pada kendali PID dapat ditentukan menggunakan metode Ziegler-Nichols berbasis respon langkah dengan mengambil nilai L (waktu tunda), T (waktu naik), dan K_s (gain sistem) dari grafik tanggapan (15). Nilai tersebut kemudian dimasukkan ke dalam rumus empiris Ziegler-Nichols untuk memperoleh konstanta PID, seperti ditunjukkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Tabel Penalaan Parameter PID

Pengendali	K_p	T_i	T_d
P	$T/(K_s \cdot L)$	∞	0
PI	$0.9 T/(K_s \cdot L)$	$L/0.3$	0
PID	$1.2 T/(K_s \cdot L)$	$2L$	$0.5L$

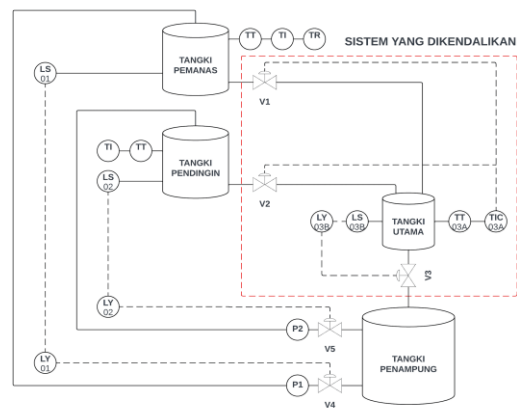
3. METODE PENELITIAN

Penelitian ini dilaksanakan melalui tiga tahap utama yaitu pendahuluan, perancangan dan realisasi, serta pengujian dan pelaporan. Tahap pendahuluan mencakup identifikasi masalah dan studi literatur. Tahap perancangan meliputi pembangunan dan integrasi perangkat keras dan lunak berbasis algoritma PID. Tahap pengujian bertujuan mengevaluasi performa sistem terhadap parameter yang ditentukan dan menyusunnya dalam laporan akhir. Tahapan ini disusun agar penelitian berjalan runtut, terstruktur, dan terukur.

3.1 Sistem Pengkondisi Air

Gambar 2 menunjukkan diagram alir proses sistem pengkondisi air, yang terdiri dari tiga tangki penunjang, yaitu tangki pemanas, pendingin, dan penampung, serta satu tangki utama sebagai sistem yang dikendalikan. Tangki

pemanas dan pendingin dilengkapi katup servo V1 dan V2 untuk mengatur aliran air ke tangki utama dalam proses pencampuran. Setiap tangki dilengkapi sensor suhu (TT), kecuali tangki penampung yang hanya menampung hasil pencampuran. Sensor suhu yang digunakan adalah DS18B20 dengan protokol *1-wire* dan akurasi $\pm 0,5^\circ\text{C}$, dipasang pada TT01, TT02, TT03A, dan TT03B untuk memantau suhu secara *real-time*. Selain itu, sensor level (LS) berbasis konduktivitas air dipasang pada LS01, LS02, LS03A, dan LS03B, terhubung ke modul ADS1115 untuk dikonversi menjadi sinyal digital dengan keluaran “HIGH” atau “LOW”. Tangki utama juga dilengkapi katup servo (V3) untuk mengalirkan air hasil pencampuran ke tangki penampung, sedangkan katup selenoid (V4 dan V5) bersama pompa (P1 dan P2) pada tangki penampung digunakan untuk mensirkulasikan kembali air ke tangki sumber, guna menjaga kontinuitas proses. Dengan konfigurasi ini, sistem membentuk tiga *loop* utama, yaitu *loop* tangki pemanas, *loop* tangki pendingin, dan *loop* tangki utama sebagai pusat pengendalian dan pencampuran.



Gambar 2. P&ID Sistem Pengkondisi Air

Sistem pengkondisi air menggunakan tangki dengan volume berbeda sesuai fungsi dan kebutuhan, sehingga memengaruhi ketinggian sensor level berdasarkan spesifikasi masing-masing tangki, seperti pada Tabel 2. Hasil realisasi sistem pengkondisi air seperti pada Gambar 3 dan 4.

Tabel 2. Kapasitas Tangki Air

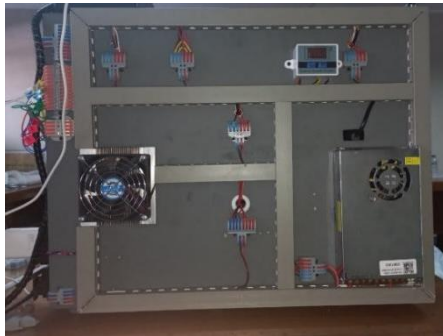
Tangki	Kapasitas	Diameter	Tinggi
Sumber Air Panas	1000mL	± 12 cm	± 10 cm
Sumber Air Dingin	1000mL	± 11 cm	$\pm 10,5$ cm
Utama	550mL	± 9 cm	$\pm 8,5$ cm
Penampung	1200mL	± 12 cm	± 11 cm

Tabel 3. Spesifikasi Sensor Ketinggian Air

Tangki	Sensor High	Sensor Low	Keterangan
Sumber Air Panas	10cm	3cm	Ukuran sensor
Sumber Air Dingin	10cm	3cm	terhitung dari
Utama	7,5cm	3cm	dasar tangki



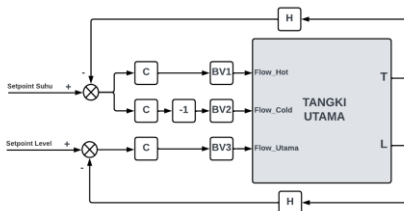
Gambar 3. Realisasi Plant Tampak Depan



Gambar 4. Realisasi Plant Tampak Belakang

3.2 Pengendalian Sistem Pengkondisi Air

Sistem pengendalian suhu dan ketinggian air pada sistem pengkondisi air ditunjukkan pada Gambar 5.

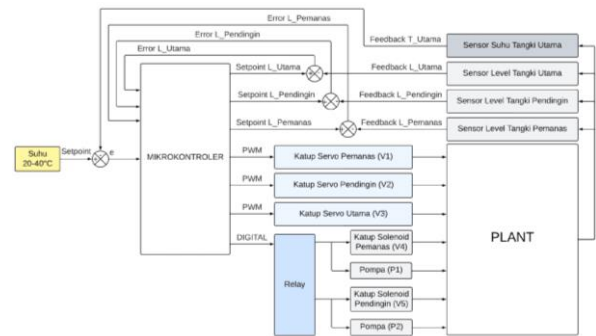


Gambar 5. Sistem Pengendali Suhu dan Level Air pada Tangki Utama

Sistem pengkondisi air menerima dua masukan *setpoint*, yaitu suhu dan level air. *Setpoint* suhu dapat diatur sesuai kebutuhan proses, sedangkan *setpoint* level bersifat tetap (konstan) dan tidak dapat diubah selama sistem beroperasi, guna menjaga kestabilan volume air dalam tangki utama selama proses berlangsung. Data pembacaan sensor suhu (T) dibandingkan dengan *setpoint* untuk menghasilkan nilai *error* yang kemudian diproses oleh pengendali PID (C). Hasil keluaran PID berupa sinyal PWM digunakan untuk mengatur bukaan katup pemanas (V1) dan katup pendingin (V2). Untuk pengendalian level air, sensor level (L) memantau ketinggian air dan membandingkannya dengan *setpoint* tetap. Nilai *error* yang dihasilkan diproses oleh pengendali PID (C), kemudian dikonversi menjadi sinyal PWM untuk mengatur bukaan katup (BV3), sehingga level air tetap dalam batas yang diinginkan. Mekanisme ini menjaga kestabilan suhu dan level air di tangki utama meskipun *setpoint* suhu berubah selama proses.

Pengendalian suhu dan ketinggian air pada tangki utama memerlukan komponen pengendali yang terintegrasi agar membentuk sistem yang bekerja secara menyeluruh dan

responsif. Gambar 6 menunjukkan bahwa sistem ini terdiri dari beberapa komponen utama, seperti modul sensor dan modul elektronik pendukung, yang saling terhubung untuk menjalankan proses secara otomatis.



Gambar 6. Diagram Blok Komponen Pengendali

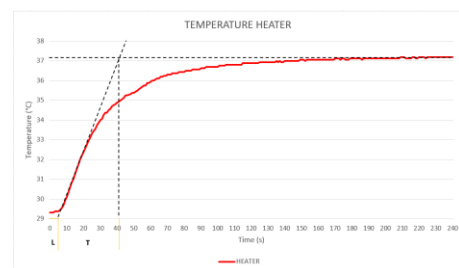
Gambar 6 menunjukkan rancangan sistem kontrol suhu dan level air yang dikendalikan oleh mikrokontroler sebagai unit pengendali utama. Sistem menerima dua jenis masukan, yaitu *input setpoint* dan data pembacaan sensor suhu serta level air. *Input setpoint* berupa suhu yang diinginkan dalam rentang tertentu berfungsi sebagai referensi utama dalam pengambilan keputusan kontrol. Mikrokontroler memproses selisih antara *setpoint* dan nilai aktual dari sensor untuk menghasilkan sinyal kontrol, yang kemudian digunakan untuk mengatur aktuator berupa katup servo dan relay. Tujuan sistem adalah menjaga kestabilan suhu dan level air dalam plant, yang terdiri dari tangki pemanas, tangki pendingin, dan tangki utama sebagai pusat pencampuran.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengujian mencakup *open loop* untuk menentukan L, T, dan Ks sebagai dasar perhitungan PID Ziegler-Nichols, dan *closed loop* untuk mengevaluasi kinerja sistem dengan kontrol PID paralel.

4.1 Pengujian Sistem Open-Loop

Pengujian respon *open loop* diperlukan untuk menentukan parameter konstanta PID pada sistem pengkondisi air, seperti pada Gambar 7 dan 8.



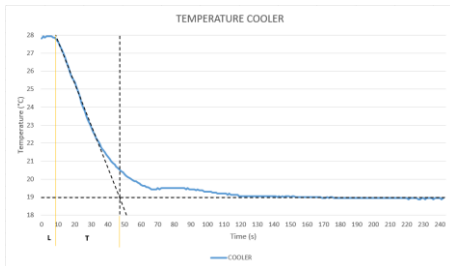
Gambar 7. Respon *Open Loop* Sumber Air Panas

Berdasarkan Gambar 7, dengan *setpoint* 37°C diperoleh waktu tunda (L) sebesar 5 detik, waktu naik (T) sebesar 41 detik, dan Ks = 1. Sehingga dapat dihitung parameter kendali PID sebagai berikut.

$$K_p = 1,2 \frac{T}{K_s \times L} \quad T_i = 2L = 10s \quad T_d = 0,5L = 2,5s$$

$$K_p = 9,84 \quad K_i = \frac{1}{T_i} = 0,1 \quad K_d = T_d = 2,5$$

Respon *open loop* sumber air dingin pada Gambar 8, menunjukkan karakteristik *invers*. Untuk menyesuaikan arah kendali, *output* PID pada katup pendingin dikalikan -1 dalam pemrograman.



Gambar 8. Respon *Open Loop* Sumber Air Dingin

Hasil pengujian *open loop* sumber air panas dengan setpoint 19°C menunjukkan waktu tunda (L) 9 detik, waktu naik (T) 46 detik, dan $K_s = 1$.

$$K_p = 1,2 \frac{T}{K_s \times L} \quad T_i = 2L = 18s \quad T_d = 0,5L = 4,5s$$

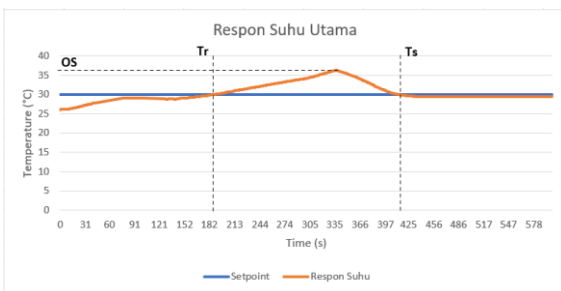
$$K_p = 6,133 \quad K_i = \frac{1}{T_i} = 0,056 \quad K_d = T_d = 4,5$$

4.2 Pengujian Sistem *Closed-Loop*

Pengujian *closed loop* mengevaluasi respon sistem terhadap *setpoint* suhu dengan umpan balik sensor untuk menjaga suhu tetap stabil secara *real-time*.

4.2.1 Respon Suhu 26°C ke 30°C

Ketika diberi *setpoint* 30°C dengan suhu awal tangki utama 26°C, menghasilkan respon seperti pada Gambar 9.

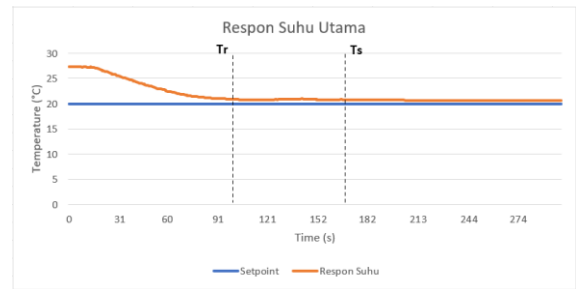


Gambar 9. Respon Suhu Air 26°C ke 30°C

Berdasarkan Gambar 9, sistem merespon *setpoint* 30°C dengan *rise time* 185,12 detik. Suhu maksimum 35,63°C, sehingga menghasilkan *overshoot* 18,77%. Suhu masuk batas toleransi $\pm 5\%$ pada 412,37 detik (*settling time*) dan stabil di 29,5°C dengan *error steady-state* 1,67%. Hasil ini menunjukkan sistem mampu merespon dan menjaga suhu mendekati *setpoint* secara stabil.

4.2.2 Suhu 27°C ke 20°C

Ketika diberi *setpoint* 20°C dengan suhu awal tangki utama 27°C, menghasilkan respon seperti pada Gambar 10.

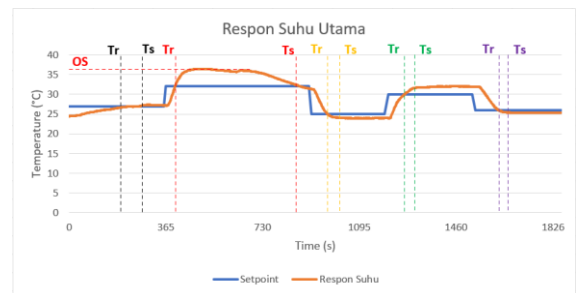


Gambar 10. Respon Suhu Air 27°C ke 20°C

Berdasarkan Gambar 10, sistem merespon *setpoint* 20°C dengan *rise time* 96,33 detik. Tidak terjadi *overshoot* karena suhu tidak melewati *setpoint*. Suhu masuk batas toleransi $\pm 5\%$ (19°C–21°C) pada 156,21 detik (*settling time*) dan stabil di 20,58°C dengan *error steady-state* 2,9%. Hasil ini menunjukkan sistem mampu merespon dan menjaga suhu mendekati *setpoint* secara stabil.

4.2.3 Respon Sistem Terhadap Variasi *Setpoint* Suhu

Pengujian dilakukan dengan *setpoint* suhu yang bervariasi, yaitu 27°C, 32°C, 25°C, 30°C, dan 26°C. Respon sistem terhadap variasi *setpoint* tersebut ditunjukkan pada Gambar 11.



Gambar 11. Respon Suhu Air Terhadap Variasi *Setpoint*

a. Tangki Utama dengan *Setpoint* = 27°C

Sistem merespon dari suhu awal 25°C menuju *setpoint* 27°C. *Rise time* tercapai dalam 131,05 detik saat suhu mencapai 26,06°C. Suhu puncak 27,38°C menghasilkan *overshoot* 1,407%. *Settling time* dicapai pada 232,57 detik, dan suhu akhir stabil di 26,81°C dengan *error steady-state* 0,7%.

b. Tangki Utama dengan *Setpoint* = 32°C

Pada pengujian dengan *setpoint* 32°C, *rise time* tercapai dalam 31,24 detik. Suhu maksimum 36,38°C menghasilkan *overshoot* 13,68%. *Settling time* dicapai pada 485,55 detik, dan suhu akhir stabil di 31,38°C dengan *error steady-state* 1,93%.

c. Tangki Utama dengan *Setpoint* = 25°C

Perubahan *setpoint* ke 25°C menurunkan suhu dari 32°C dengan *rise time* 47,72 detik hingga 90% dari selisih awal. Tidak terjadi *overshoot*, hanya sedikit *undershoot* sebelum stabil. *Settling time* tercapai pada 94,53 detik. Suhu akhir 24°C dengan *error steady-state* 4%.

d. Tangki Utama dengan *Setpoint* = 30°C

Setelah *setpoint* dinaikkan, suhu naik menuju 30°C dengan *rise time* 46,26 detik. Suhu maksimum 32°C menghasilkan *overshoot* 6,67%. *Settling time* tercapai pada 167,36 detik. Suhu akhir 31,5°C dengan *error steady-state* 5%.

e. Tangki Utama dengan *Setpoint* = 26°C

Pada penurunan terakhir, suhu turun dari 30°C ke 26°C dengan *rise time* 69,41 detik tanpa *overshoot*. *Settling time* tercapai pada 101,48 detik. Suhu akhir 25,31°C dengan *error steady-state* 2,61%.

5. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian dapat disimpulkan bahwa penerapan kontrol PID dengan konfigurasi paralel dan metode penalaan Ziegler-Nichols mampu mengendalikan suhu dengan stabil. Sistem menunjukkan kinerja respon yang baik terhadap setiap perubahan *setpoint*, baik saat mengalami kenaikan suhu maupun penurunan suhu air. Hasil pengujian menunjukkan bahwa respon suhu pada sistem pengkondisi air menghasilkan *rise time* tercepat 31,24 detik, *overshoot* maksimum 18,77%, dan *settling time* tercepat 94,53 detik, serta *error steady-state* kurang dari 5%. Pengebangan alat kedepannya yaitu menggunakan IoT untuk pemantauan dan kontrol jarak jauh secara *real-time*.

UCAPAN TERIMA KASIH

Terima kasih kepada Politeknik Negeri Bandung atas dukungan berupa dana dan fasilitas yang telah diberikan. Bantuan tersebut sangat mendukung kelancaran proses penelitian dan kontribusi signifikan terhadap keberhasilan hasil yang dicapai.

DAFTAR PUSTAKA

1. Setiawan IR. The Effect of Changes In Water Flow Rate On The Water Level Control Cascade Control Method Using PID Controller. *Instrumentasi*. 2021;45(2).
2. Tunjung D, Prajitno P, Handoko D. Temperature and water level control system in water thermal mixing process using adaptive fuzzy PID controller. In: *Journal of Physics: Conference Series*. IOP Publishing Ltd; 2021.
3. da Silva ACC da, Biz AP, Longhi DA, Schmidt FC. Effect of concentration and temperature on the physical and thermophysical properties of coffee extract. *J Food Eng*. 2023 Mar;230.
4. Kamath S, Huppertz T, Houlihan A V., Deeth HC. The influence of temperature on the foaming of milk. *Int Dairy J*. 2008 Oct;18(10–11):994–1002.
5. Cenci DF, Kilian J, Janeczko MU, Manzoli A, Rigo E, Soares MBA. Effect of meat and water temperature and emulsion speed on the industrial process for chicken mortadella. *J Food Process Eng*. 2018 Nov;
6. Akbar A. Perancangan Dan Analisa Online PID Controller Untuk Kendali Posisi Sudut Motor DC. Universitas Andalas; 2024.
7. Pramoeद्या HA, Priyadi B, Luqman M. Implementasi Kontrol PID Untuk Mengontrol Suhu dan Level Pada Alat Vending machine. *Jurnal Elektronika dan Otomasi Industri*. 2023 May 31;10(1):18–25.
8. Audhy Chairawati B, Priyadi B. Pengkondisian Level dan Suhu Tangki Minuman pada Eco Vending Machine. *Jurnal Elkolind* [Internet]. 2021;8(2). Available from: <http://dx.doi.org/10.33795/elkolind.v8i2.245>
9. Amalia S, Andari R, Kartiria K, Putra PE. Prototype Sistem Kontrol Dan Monitoring Suhu Serta Ketinggian Air Pada Kolam Budidaya Ikan Menggunakan Fuzzy. *RADIAL: Jurnal Peradaban Sains, Rekayasa dan Teknologi*. 2021 Jul 12;9(1):23–38.
10. Homepage J, Prasetyo P, Achmad Komarudin I, Pracoyo A, Teknik Elektro J, Negeri Malang P, et al. IJEERE: Indonesian Journal of Electrical Engineering and Renewable Energy Temperature Control System for Water Heater with Servo Valve using PID Method Sistem Pengendalian Suhu Pada Pemanas Air Dengan Servo Valve Menggunakan Metode PID. 2023;3(2).
11. Rupilu YunusT, Wardhana AS, Dewi AK. Rancang Bangun Sistem Pengendalian Temperature Pada Tangki Air Menggunakan Arduino. *Marsiah Diana Berbiru*. 2021 Nov 1;1.
12. Bobby M, Darring R, Faqihuddin M, Indrayani DS. Pemrograman Direct Digital Controller (DDC) Kieback & Peter untuk Sistem Kontrol Otomatis HVAC. Vol. 7, Prosiding Seminar Nasional Teknik Elektro.
13. Su SJ, Zhu YY, Li CJ, Tang WX, Wang HR. Dual-valve parallel prediction control for an electro-hydraulic servo system. *Sci Prog*. 2020 Jan 1;103(1).
14. Ichsan RA. Analisis Kinerja Pengendalian kecepatan Motor DC Menggunakan PID Dengan Metode Tuning Trial & Error, Ziegler-Nichols, dan Algoritma Genetika. Universitas Andalas; 2025.
15. Solekha R, Latifa U. *Electron: Jurnal Ilmiah Teknik Elektro Sistem Kendali Proportional Integral Derivative (PID) Menggunakan Mikrokontroler Arduino Pada Thinkercad*