

# Implementasi Sistem Kendali Suhu Berbasis PID pada Nextion HMI untuk Aplikasi *Infant Warmer*

Farit Ardiyanto\*<sup>1</sup>, Slamet Pambudi<sup>2</sup>, Joko Yuniyanto<sup>3</sup>

<sup>1,2</sup> Program Studi Teknik Elektro Sekolah Tinggi Teknologi “Warga” Surakarta, Jl. Raya Solo-Baki Km 2 Kwarasan Sukoharjo Jawa Tengah Kode Pos 57552

<sup>3</sup> Program Studi Teknik Mesin Sekolah Tinggi Teknologi “Warga” Surakarta, Jl. Raya Solo-Baki Km 2 Kwarasan Sukoharjo Jawa Tengah KodePos 57552

email : [\\*farit@sttw.ac.id](mailto:*farit@sttw.ac.id)

## Abstrak

Stabilitas suhu tubuh bayi merupakan hal yang sangat krusial, terutama bagi bayi prematur yang belum mampu mempertahankan keseimbangannya sendiri. Pada penelitian ini, dieksplorasi algoritma kendali *Proportional-Integral-Derivative* (PID) yang diimplementasikan secara langsung pada *Human-Machine Interface* (HMI) Nextion untuk mengatur suhu *infant warmer*. Berbeda dengan sistem konvensional yang menempatkan perhitungan utama PID pada mikrokontroler dan HMI hanya berfungsi sebagai tampilan, metode ini mengintegrasikan logika PID langsung ke dalam HMI, sehingga berpotensi mengurangi beban mikrokontroler, meminimalkan keterlambatan komunikasi, serta menyederhanakan arsitektur perangkat keras. Tiga kali percobaan dilakukan pada setpoint konstan sebesar 37 °C dengan kombinasi parameter PID yang berbeda dalam konfigurasi eksperimen yang sama. Parameter respons suhu seperti rise time, settling time, persentase overshoot, dan steady-state error diukur dan dibandingkan. Hasil menunjukkan bahwa dengan parameter  $K_p = 1,50$ ,  $K_i = 0,05$ , dan  $K_d = 1,50$ , sistem mencapai kondisi tunak sebesar 36,97 °C dengan overshoot sebesar 2,16% dan waktu settling sekitar 7 menit, serta memenuhi persyaratan sistem pemanas neonatal. Hasil ini mengonfirmasi bahwa kendali PID yang dijalankan langsung pada HMI Nextion mampu menghasilkan performa pengaturan suhu yang sebanding dengan implementasi berbasis mikrokontroler konvensional, sekaligus meningkatkan kesederhanaan sistem dan efisiensi kode. Pendekatan ini menjadi alternatif yang baik untuk pengembangan *infant warmer* portabel berdaya rendah maupun sistem kendali termal embedded lainnya.

**Kata kunci:** kendali tertanam, perawatan neonatal, respon overshoot, antarmuka cerdas, sistem termal

## Abstract

*Infant body temperature stability is paramount, especially for preterm newborns unable to maintain their own thermal equilibrium. Here, we explore a Proportional-Integral-Derivative (PID) control algorithm implemented directly on a Nextion Human-Machine Interface (HMI) to regulate infant warmer temperature. Unlike typical systems where the microcontroller holds the major PID calculation and the HMI acts as a display only, this method integrates the PID logic into the HMI itself, with possible reductions of microcontroller load, minimization of communication delays, and hardware architecture simplification. Three trials at a constant setpoint of 37 °C with varying combinations of PID gains were used with a fixed experimental*

PROGRAM STUDI TEKNIK ELEKTRO FTS UIKA-BOGOR

setup. Temperature response indicators like rise time, settling time, percent overshoot, and steady-state error were measured and compared. Results indicate that with gains of  $K_p = 1.50$ ,  $K_i = 0.05$ , and  $K_d = 1.50$ , the system reached a steady state of  $36.97\text{ }^\circ\text{C}$  with just 2.16 % of an overshoot and a settling time of about 7 minutes and satisfied neonatal warmer requirements. The results confirm that PID control executed directly on the Nextion HMI can achieve temperature regulation performance comparable to conventional microcontroller-based implementations while improving system simplicity and code efficiency. It presents a good alternative choice of low-power and portable infant warmer and also of other embedded hot and cold control systems.

**Keywords:** *embedded control, neonatal care, overshoot response, smart interface, thermal system*

## I. LATAR BELAKANG

Menjaga kestabilan suhu tubuh bayi baru lahir, khususnya bayi prematur atau dengan berat badan lahir rendah, merupakan aspek krusial dalam mendukung kelangsungan hidup serta mengurangi risiko komplikasi kesehatan jangka pendek maupun jangka panjang [1]. Namun demikian, kejadian hipotermia masih sering ditemukan bahkan di fasilitas kesehatan, termasuk di wilayah tropis, yang disebabkan oleh ketidakmatangan sistem termoregulasi bayi, rasio luas permukaan tubuh yang besar terhadap berat badan, serta keterbatasan akses terhadap sistem pengendalian suhu yang optimal [2], [3]. Oleh karena itu, penggunaan perangkat pemanas seperti infant warmer menjadi solusi penting, selama suhu yang dihasilkan berada dalam rentang fisiologis yang aman, yaitu  $36,5\text{ }^\circ\text{C}$  hingga  $37,5\text{ }^\circ\text{C}$  [4], [5], [6].

Pengembangan perangkat *infant warmer* saat ini tidak hanya difokuskan pada akurasi pengendalian suhu, tetapi juga pada efisiensi energi dan portabilitas, terutama untuk digunakan pada fasilitas kesehatan dengan keterbatasan sumber daya [5], [6]. Selain itu, faktor lain seperti tingkat kebisingan juga menjadi perhatian karena dapat memengaruhi kenyamanan dan perkembangan sensorik bayi [7]. Berbagai pendekatan berbasis pemodelan dan desain sistem terbuka (open-source) telah dikembangkan untuk meningkatkan efisiensi dan aksesibilitas perangkat ini, termasuk integrasi sensor dan analisis dinamika termal [8], [9]. Teknologi pemantauan suhu berbasis non-kontak juga mulai dikembangkan untuk mendukung sistem kendali yang lebih adaptif dan responsif.

Dalam konteks sistem kendali, algoritma *Proportional-Integral-Derivative* (PID) masih menjadi metode yang paling banyak digunakan karena kesederhanaan, keandalan, serta kemampuannya dalam menghadapi ketidakpastian sistem [10], [11], [12]. Berbagai penelitian terbaru menunjukkan bahwa metode PID tetap relevan dibandingkan metode kendali lanjutan seperti *Model Predictive Control* (MPC), terutama karena kebutuhan komputasi yang rendah dan kemudahan implementasi [11], [13], [14].

Pada umumnya, sistem pengendalian suhu pada perangkat medis menggunakan arsitektur konvensional, di mana algoritma PID dijalankan pada mikrokontroler, sedangkan *Human Machine Interface* (HMI) hanya berfungsi sebagai media tampilan dan interaksi pengguna [15]. Meskipun pendekatan ini telah banyak digunakan, arsitektur tersebut meningkatkan

PROGRAM STUDI TEKNIK ELEKTRO FTS UIKA-BOGOR

kompleksitas sistem, membutuhkan komunikasi serial yang kontinu, serta menambah beban komputasi pada mikrokontroler [16]. Perkembangan teknologi HMI modern menunjukkan bahwa perangkat ini kini telah dilengkapi dengan kemampuan komputasi dan scripting, sehingga memungkinkan sebagian fungsi kendali dipindahkan langsung ke HMI [17].

Beberapa penelitian sebelumnya telah mengembangkan sistem infant warmer dengan berbagai pendekatan kendali, seperti PID konvensional dan kombinasi fuzzy-PID untuk meningkatkan stabilitas system [18], [19]. Penelitian lain juga menunjukkan bahwa sistem berbasis PID mampu mencapai waktu tunak dalam beberapa menit dengan performa yang cukup baik [20]. Namun, sebagian besar penelitian tersebut masih mempertahankan mikrokontroler sebagai pusat utama komputasi kendali.

Berdasarkan kajian tersebut, dapat diidentifikasi bahwa masih terdapat kesenjangan penelitian terkait pemanfaatan HMI sebagai unit utama pemrosesan kendali dalam sistem regulasi suhu medis [21]. Oleh karena itu, penelitian ini mengusulkan pendekatan baru dengan mengimplementasikan algoritma PID secara langsung pada HMI Nextion, sehingga HMI tidak hanya berfungsi sebagai antarmuka, tetapi juga sebagai unit pemrosesan utama dalam sistem kendali.

Perbedaan utama penelitian ini dibandingkan dengan penelitian sebelumnya terletak pada arsitektur sistem yang digunakan, di mana komputasi PID dipindahkan dari mikrokontroler ke HMI. Pendekatan ini diharapkan dapat mengurangi kompleksitas perangkat keras, menurunkan latensi komunikasi, serta meningkatkan efisiensi sistem tanpa mengurangi performa pengendalian suhu.

## II. METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan pendekatan eksperimen kuantitatif untuk mengevaluasi implementasi algoritma kendali PID pada *Human Machine Interface* (HMI) Nextion dalam pengaturan suhu infant warmer. Tiga sampel pengujian dilakukan pada setpoint 37 °C dengan menggunakan kombinasi parameter PID yang berbeda untuk mengamati pengaruh nilai  $K_p$ ,  $K_i$ , dan  $K_d$  terhadap respons sistem.

### A. Algoritma Kendali PID

Hukum kendali PID dalam bentuk waktu kontinu dinyatakan pada Persamaan (1), dengan  $K_p$ ,  $K_i$ , dan  $K_d$  masing-masing merupakan penguat untuk komponen proporsional, integral, dan derivatif. Untuk mengimplementasikan pengendali ini pada HMI Nextion, dilakukan proses diskretisasi menggunakan periode sampling tetap sebesar 250 ms sehingga diperoleh bentuk diskrit seperti yang ditunjukkan pada Persamaan (2).

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

Di mana  $K_p$  merupakan penguat proporsional yang menskalakan keluaran kendali secara langsung terhadap galat suhu,  $K_i$  merupakan penguat integral yang menghilangkan galat

PROGRAM STUDI TEKNIK ELEKTRO FTS UIKA-BOGOR

keadaan tunak dengan mengakumulasi galat masa lalu terhadap waktu, dan  $K_d$  merupakan penguat derivatif yang memprediksi kecenderungan galat di masa depan sehingga membantu meredam overshoot serta meningkatkan respons transien sistem.

$$u(k) = u(k - 1) + K_p(e(k) - e(k - 1)) + K_i \cdot e(k) \cdot \Delta t + \left(\frac{K_d}{\Delta t}\right)(e(k) - 2e(k - 1) + e(k - 2)) \quad (2)$$

Diskretisasi ini memungkinkan komputasi yang efisien dalam lingkungan scripting HMI tanpa memerlukan pemrosesan tambahan dari mikrokontroler eksternal.

- *Perbedaan Galat (Error Differences)*

Persamaan (3) merupakan perubahan galat orde pertama yang menunjukkan selisih antara sampel saat ini dengan sampel sebelumnya. Selanjutnya, Persamaan (4) menyatakan perubahan galat orde kedua yang merepresentasikan percepatan perubahan galat.

$$dE_1[k] = e[k] - e[k - 1] \quad (3)$$

Formula:  $dE1[k]=e[k]-e[k-1]$

HMI Code:

`vDE1.val=vE.val`

`vDE1.val=vDE1.val-vE1.val`

$$dE_2[k] = e[k] - 2e[k - 1] + e[k - 2] \quad (4)$$

Formula:  $d2E[k]=e[k]-2e[k-1]+e[k-2]$

HMI Code:

`vD2E.val=vE.val`

`vD2E.val=vD2E.val-vE1.val`

`vD2E.val=vD2E.val-vE1.val`

`vD2E.val=vD2E.val+vE2.val`

- *Komponen Proporsional (Proportional Term)*

Persamaan (5) mendefinisikan komponen proporsional, di mana keluaran kendali diperoleh dengan mengalikan penguat proporsional  $K_p$  dengan selisih galat orde pertama  $dE_1[k]$ .

$$P[k] = K_p \cdot dE_1[k] \approx \frac{K_p s \cdot dE_1}{s} \quad (5)$$

Formula:  $P[k]=K_p \cdot dE1[k] \approx (K_p S \cdot dE1)/S$

HMI Code:

`vTmp.val=vKpS.val`

`vTmp.val=vTmp.val*vDE1.val`

`vP.val=vTmp.val/vS.val`

- *Komponen Integral (Integral Term)*

PROGRAM STUDI TEKNIK ELEKTRO FTS UIKA-BOGOR

Persamaan (6) mendefinisikan komponen integral, di mana galat yang terakumulasi terhadap waktu dikalikan dengan penguat integral  $K_i$  dan periode sampling  $\Delta t$ , sehingga menghasilkan aksi koreksi yang diperlukan untuk menghilangkan galat keadaan tunak.

$$I[k] = K_i \cdot e[k] \cdot \Delta t \approx \frac{K_i S \cdot e \cdot \Delta t_{ms}}{S \cdot 1000} = \frac{K_i S \cdot e \cdot \Delta t_{ms}}{vDen} \quad (6)$$

Formula:  $I[k]=K_i \cdot e[k] \cdot \Delta t \approx (K_i S \cdot e \cdot \Delta t_{ms}) / (S \cdot 1000) = (K_i S \cdot e \cdot \Delta t_{ms}) / vDen$

HMI Code:

```
vTmp.val=vKiS.val
vTmp.val=vTmp.val*vE.val
vTmp.val=vTmp.val*vDtMs.val
vI.val=vTmp.val/vDen.val
```

- *Komponen Derivatif (Derivative Term)*

Komponen derivatif yang dijelaskan pada Persamaan (7) digunakan untuk memprediksi kecenderungan galat di masa depan dengan mengalikan selisih galat orde kedua dengan penguat derivatif ( $K_d$ ) dan interval sampling ( $\Delta t$ ), sehingga membantu meningkatkan stabilitas sistem serta mengurangi overshoot.

$$D[k] = K_d \cdot \Delta t \cdot d2E[k] \approx \frac{K_d S \cdot \Delta t_{ms} \cdot d2E}{S \cdot 1000} = \frac{K_d S \cdot \Delta t_{ms} \cdot d2E}{vDen} \quad (7)$$

Formula:

$D[k]=K_d \cdot \Delta t \cdot d2E[k] \approx (K_d S \cdot \Delta t_{ms} \cdot d2E) / (S \cdot 1000) = (K_d S \cdot \Delta t_{ms} \cdot d2E) / vDen$

HMI Code:

```
vTmp.val=vKdS.val
vTmp.val=vTmp.val*vDtMs.val
vTmp.val=vTmp.val*vD2E.val
vD.val=vTmp.val/vDen.val
```

- *Akumulasi Keluaran (Output Accumulation)*

Pada pendekatan ini, aksi kendali akhir dihitung dengan mengakumulasikan keluaran sebelumnya bersama dengan komponen P, I, dan D, sebagaimana dijelaskan pada Persamaan (8).

$$u[k] = u[k - 1] + P[k] + I[k] + D[k] \quad (8)$$

Formula:  $u[k]=u[k-1]+P[k]+I[k]+D[k]$

HMI Code:

```
vU.val=vU1.val
vU.val=vU.val+vP.val
vU.val=vU.val+vI.val
vU.val=vU.val+vD.val
```

- *Anti Wind-Up*

PROGRAM STUDI TEKNIK ELEKTRO FTS UIKA-BOGOR

Untuk mencegah terjadinya integrator wind-up, ditambahkan suatu komponen umpan balik tambahan sebagaimana dirumuskan pada Persamaan (9), di mana penguat anti-windup ( $K_{aw}$ ) berfungsi mengompensasi perbedaan antara sinyal kendali yang mengalami saturasi dan sinyal sebelum saturasi.

$$\dot{i}(t) = K_i e(t) + K_{aw} (u_{sat}(t) - u_{pre}(t)) \quad (9)$$

Formula:  $I[k]=I[k-1]+(K_i e[k]+K_{aw}(u_{sat}[k]-u_{pre}[k]))\Delta t$

HMI Code:

```

if(nKp.val>0)
{
    vaKaw.val=nKi.val*vaS.val
    vaKaw.val=vaKaw.val/nKp.val
}else
{
    vaKaw.val=0
}
vaTmp1.val=vaU.val-vaUuns.val
vaTmp2.val=vaKaw.val*vaTmp1.val
vaTmp4.val=vaTmp2.val/vaS.val
    
```

• *Pembaruan Riwayat (History Update)*

Untuk menjaga akurasi perhitungan rekursif, keluaran kendali dan nilai galat diperbarui sebagaimana ditunjukkan pada Persamaan (10), di mana nilai sebelumnya digeser untuk menyimpan sampel terbaru.

$$u[k - 1] \leftarrow u[k]; e[k - 2] \leftarrow e[k - 1]; e[k - 1] \leftarrow e[k] \quad (10)$$

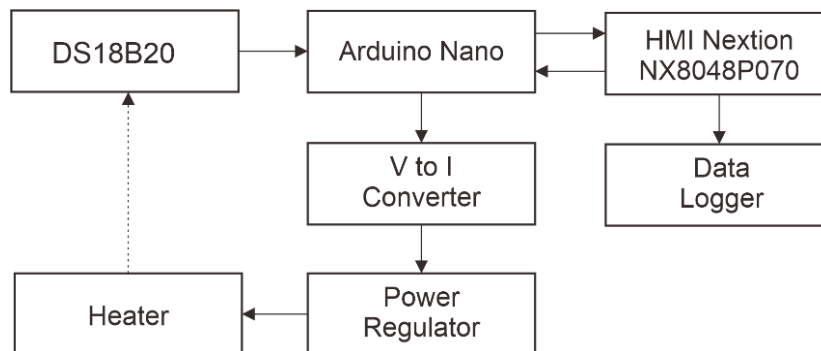
Formula:  $u[k-1] \leftarrow u[k]; e[k-2] \leftarrow e[k-1]; e[k-1] \leftarrow e[k]$

HMI Code:

```

vU1.val=vU.val
vE2.val=vE1.val
vE1.val=vE.val
vU.val=0
    
```

B. System Configuration



Gambar 1. Diagram Blok Sistem

PROGRAM STUDI TEKNIK ELEKTRO FTS UIKA-BOGOR

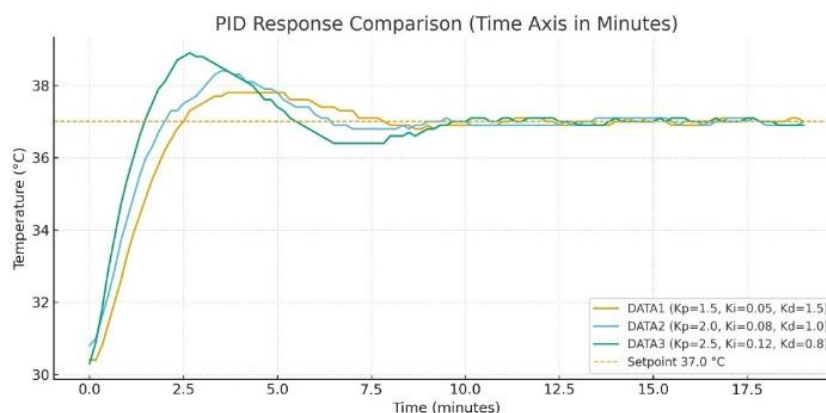


Gambar 2. Prototipe perangkat keras infant warmer dan sistem pengendaliannya

Gambar 1 menunjukkan arsitektur sistem, di mana HMI menjalankan algoritma PID dan mikrokontroler (MCU) berfungsi sebagai penggerak aktuator, sedangkan Gambar 2 menampilkan prototipe perangkat keras infant warmer. Sistem menggunakan sensor suhu DS18B20 untuk pengukuran termal, dan HMI Nextion diprogram untuk mengimplementasikan PID sekaligus menampilkan data suhu secara real-time. Keluaran dari HMI dikirim ke Arduino untuk dikonversi menjadi sinyal PWM dan diteruskan ke modul konverter tegangan-ke-arus sebagai driver pemanas. Data suhu disimpan secara berkala pada EEPROM HMI, sehingga HMI berperan sebagai antarmuka sekaligus pemroses PID, sementara mikrokontroler hanya digunakan untuk pengendalian aktuator.

### III. HASIL DAN PEMBAHASAN

Eksperimen dilakukan pada setpoint  $37\text{ }^{\circ}\text{C}$  dengan sampling berkala menggunakan HMI Nextion yang mengimplementasikan algoritma PID, untuk mengukur parameter kinerja seperti waktu naik, waktu tunak, overshoot, dan galat keadaan tunak. Tiga pengujian (Sampel 1–3) dilakukan dengan variasi  $K_p$ ,  $K_i$ , dan  $K_d$ . Hasil menunjukkan bahwa sistem mampu menjaga kestabilan termal sesuai standar neonatal, dengan konfigurasi terbaik pada Sampel 2 ( $K_p = 2.00$ ,  $K_i = 0.08$ ,  $K_d = 1.00$ ) yang memberikan respons cepat, overshoot moderat, dan kesalahan kumulatif terendah, tanpa menurunkan performa dibandingkan arsitektur berbasis mikrokontroler serta dengan keunggulan pada penyederhanaan sistem dan komunikasi..



Gambar 3. Timeline pencatatan data (interval 10 detik) dan profil setpoint pada  $37\text{ }^{\circ}\text{C}$  dengan penanda untuk Sampel 1 hingga Sampel 3

PROGRAM STUDI TEKNIK ELEKTRO FTS UIKA-BOGOR

Gambar 3 menunjukkan timeline pencatatan data setiap 10 detik pada setpoint tetap 37 °C serta urutan penerapan tiga konfigurasi tuning PID. Prototipe infant warmer diinisialisasi dengan setpoint suhu 37 °C, kemudian tiga kombinasi parameter PID diterapkan secara berurutan pada HMI dengan urutan data Kp, Ki dan Kd, yaitu Sampel 1: (1.50, 0.05, 1.50), Sampel 2: (2.00, 0.08, 1.00), dan Sampel 3: (2.50, 0.12, 0.80). Respons suhu selanjutnya direkam setiap 10 detik menggunakan sistem pencatatan data internal pada HMI. Berdasarkan data tersebut, parameter kinerja utama yang meliputi waktu naik (rise time), waktu tunak (settling time), persentase overshoot, galat keadaan tunak (steady-state error), serta riak suhu (temperature ripple) dihitung untuk setiap pengujian.

Tabel 1. Perbandingan Parameter Respons Dinamis untuk Tiga Setelan PID (SP = 37 °C)

Data	Kp–Ki–Kd	t <sub>rise 10–90%</sub>	Overshoot (°C / %)	t <sub>settle (±2% SP)</sub>	SS error (≈last 30 samples)	IAE (°C·s)
Sample-1 (DATA1)	1.50–0.05–1.50	~100 s	0.8 / 2.16%	~320 s	-0.033 °C	744
Sample-2 (DATA2)	2.00–0.08–1.00	~90 s	1.4 / 3.78%	~310 s	+0.010 °C	644
Sample-3 (DATA3)	2.50–0.12–0.80	~60 s	1.9 / 5.14%	~280 s	+0.010 °C	717

Tabel 1 menunjukkan bahwa Sampel 1 memiliki overshoot paling kecil namun respons paling lambat, Sampel 2 memberikan keseimbangan terbaik dengan kesalahan kumulatif terendah, sedangkan Sampel 3 menghasilkan respons tercepat dengan overshoot tertinggi. Hal ini menunjukkan adanya trade-off antara kecepatan respons dan stabilitas, sehingga penalaan PID perlu disesuaikan dengan kebutuhan aplikasi.

#### IV. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian, sistem infant warmer berbasis kendali PID yang diimplementasikan langsung pada HMI Nextion dapat bekerja dengan baik dalam menjaga kestabilan suhu pada setpoint 37 °C. Sistem mampu mencapai kondisi stabil dengan galat keadaan tunak yang kecil (≈ -0,033 °C hingga ≈ +0,010 °C), overshoot yang terbatas (≈ 2,16%–5,14%), serta waktu tunak berkisar antara 280–320 detik.

Dari tiga konfigurasi yang diuji, parameter PID dengan Kp = 2,00, Ki = 0,08, dan Kd = 1,00 memberikan performa terbaik dengan keseimbangan antara kecepatan respons dan kestabilan sistem, serta menghasilkan kesalahan kumulatif paling rendah. Hal ini menunjukkan bahwa implementasi algoritma PID pada HMI tidak menurunkan performa sistem dibandingkan metode konvensional berbasis mikrokontroler.

Selain itu, penggunaan HMI sebagai pemroses utama mampu menyederhanakan arsitektur sistem dan mengurangi kebutuhan komunikasi dengan mikrokontroler. Dengan demikian,

PROGRAM STUDI TEKNIK ELEKTRO FTS UIKA-BOGOR

pendekatan ini berpotensi diterapkan pada perangkat medis portabel yang membutuhkan efisiensi energi dan sistem yang lebih sederhana.

## V. UCAPAN TERIMA KASIH

Penelitian ini didanai oleh Direktorat Jenderal Riset dan Pengembangan, Kementerian Pendidikan Tinggi, Sains, dan Teknologi, sebagaimana tercantum dalam Kontrak Penelitian Tahun Anggaran 2025.

## VI. REFERENSI

- [1] M. N. Cramer, D. Gagnon, O. Laitano, and C. G. Crandall, "Human temperature regulation under heat stress in health, disease, and injury," *Physiol. Rev.*, vol. 102, no. 4, pp. 1907–1989, Oct. 2022, doi: 10.1152/physrev.00047.2021.
- [2] E. A. Dunne, C. P. F. O'Donnell, B. Nakstad, and L. K. McCarthy, "Thermoregulation for very preterm infants in the delivery room: a narrative review," *Pediatr. Res.*, vol. 95, no. 6, pp. 1448–1454, May 2024, doi: 10.1038/s41390-023-02902-w.
- [3] M. Kyokan, N. Bochaton, V. Jirapaet, and R. E. Pfister, "Early detection of cold stress to prevent hypothermia: A narrative review," *SAGE Open Med.*, vol. 11, Jan. 2023, doi: 10.1177/20503121231172866.
- [4] J. Uwamariya *et al.*, "Safety and effectiveness of a non-electric infant warmer for hypothermia in Rwanda: A cluster-randomized stepped-wedge trial," *EClinicalMedicine*, vol. 34, p. 100842, Apr. 2021, doi: 10.1016/j.eclinm.2021.100842.
- [5] N. D. P. Bluhm *et al.*, "Preclinical validation of NeoWarm, a low-cost infant warmer and carrier device, to ameliorate induced hypothermia in newborn piglets as models for human neonates," *Front. Pediatr.*, vol. 12, Apr. 2024, doi: 10.3389/fped.2024.1378008.
- [6] U. Mishra, D. August, K. Walker, P. R. Jani, and M. Tracy, "Thermoregulation, incubator humidity, and skincare practices in appropriate for gestational age ultra-low birth weight infants: need for more evidence," *World Journal of Pediatrics*, vol. 20, no. 7, pp. 643–652, Jul. 2024, doi: 10.1007/s12519-024-00818-x.
- [7] R. Hernández-Molina, V. Puyana-Romero, J. L. Beira-Jiménez, A. Morgado-Estévez, R. Bienvenido-Bárcena, and F. Fernández-Zacarias, "Silent Neonatal Incubators, Prototype Nica+," *Acoustics*, vol. 6, no. 3, pp. 638–650, Jul. 2024, doi: 10.3390/acoustics6030035.
- [8] A. Rincón Casado, M. Larrodé-Díaz, F. Fernandez Zacarias, and R. Hernández Molina, "Experimental and Computational Model for a Neonatal Incubator with Thermoelectric Conditioning System," *Energies (Basel)*, vol. 14, no. 17, p. 5278, Aug. 2021, doi: 10.3390/en14175278.
- [9] R. Cuervo, M. A. Rodríguez-Lázaro, R. Farré, D. Gozal, G. Solana, and J. Otero, "Low-cost and open-source neonatal incubator operated by an Arduino microcontroller," *HardwareX*, vol. 15, p. e00457, Sep. 2023, doi: 10.1016/j.ohx.2023.e00457.

PROGRAM STUDI TEKNIK ELEKTRO FTS UIKA-BOGOR

- [10] C. Zhao and L. Guo, "Towards a theoretical foundation of PID control for uncertain nonlinear systems," *Automatica*, vol. 142, p. 110360, Aug. 2022, doi: 10.1016/j.automatica.2022.110360.
- [11] E. Hernández-Arroyo, J. L. Díaz-Rodríguez, and O. Pinzón-Ardila, "Estudio del comportamiento de un Control MPC [Control Predictivo Basado en el Modelo] comparado con un Control PID en una Planta de Temperatura," *REVISTA FACULTAD DE INGENIERÍA*, vol. 23, no. 37, p. 45, Jul. 2014, doi: 10.19053/01211129.2789.
- [12] J. Zhang, C. Zhao, and L. Guo, "On PID Control Theory for Nonaffine Uncertain Stochastic Systems," *J. Syst. Sci. Complex.*, vol. 36, no. 1, pp. 165–186, Feb. 2023, doi: 10.1007/s11424-022-1486-9.
- [13] Z. Li, "Review of PID control design and tuning methods," *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 2649, no. 1, p. 012009, Nov. 2023, doi: 10.1088/1742-6596/2649/1/012009.
- [14] M. Ghita *et al.*, "A robust self-tuning PID-type control for time-varying process in the pharmaceutical industry," in *2022 13th Asian Control Conference (ASCC)*, IEEE, May 2022, pp. 637–642. doi: 10.23919/ASCC56756.2022.9828229.
- [15] F. Ardiyanto, Wiyono, and Rahmat, "Design and build LCD touchscreen (HMI) as a controller and indicator on biological safety cabinet machines to protect workers from virus exposure," 2023, p. 020103. doi: 10.1063/5.0120936.
- [16] M. Mahmud, S. M. A. Motakabber, A. H. M. Zahirul Alam, and A. N. Nordin, "Adaptive PID Controller Using for Speed Control of the BLDC Motor," in *2020 IEEE International Conference on Semiconductor Electronics (ICSE)*, IEEE, Jul. 2020, pp. 168–171. doi: 10.1109/ICSE49846.2020.9166883.
- [17] M. Huba, S. Chamraz, P. Bistak, and D. Vrancic, "Making the PI and PID Controller Tuning Inspired by Ziegler and Nichols Precise and Reliable," *Sensors*, vol. 21, no. 18, p. 6157, Sep. 2021, doi: 10.3390/s21186157.
- [18] A. Majid, Endang Dian Setioningsih, A. Kholiq, S. Y. Setiawan, and A. Suthar, "Comparative Analysis of PID and Fuzzy Temperature Control System on Infant Warmer," *Journal of Electronics, Electromedical Engineering, and Medical Informatics*, vol. 4, no. 4, Oct. 2022, doi: 10.35882/jeeemi.v4i4.257.
- [19] A. Alimuddin, R. Arafiyah, I. Saraswati, R. Alfan, P. Hasudungan, and T. Taufik, "Development and Performance Study of Temperature and Humidity Regulator in Baby Incubator Using Fuzzy-PID Hybrid Controller," *Energies (Basel)*, vol. 14, no. 20, p. 6505, Oct. 2021, doi: 10.3390/en14206505.
- [20] I. Sharma and M. Singh, "Infant Warmer Design with PID Control for Stability and Equal Temperature Distribution Equipped with Digital Scales for Prevention of Hypothermia in Newborns," *International Journal of Advanced Health Science and Technology*, vol. 1, no. 1, pp. 7–13, Oct. 2021, doi: 10.35882/ijahst.v1i1.2.
- [21] Y. Wang, Z. Jiang, S. H. Kwon, M. Ibrahim, A. Dang, and L. Dong, "Flexible Sensor-Based Human–Machine Interfaces with AI Integration for Medical Robotics," *Advanced Robotics Research*, vol. 2, no. 1, Feb. 2026, doi: 10.1002/adrr.202500027.