DESAIN DAN IMPLEMENTASI SISTEM KONTROL ADAPTIF INTENSITAS PENERANGAN OTOMATIS DI SELASAR LABORATORIUM BERBASIS MIKROKONTROLER DENGAN METODE PROPORSIONAL – INTEGRAL (PI)

Chitra Juliette Azura[1], Toto Tohir[2], Febi Ariefka Septian Putra[3], Yosua Sahat Halomoan[4]

[1]Jurusan Teknik Elektro, Politeknik Negeri Bandung, Bandung, Indonesia
E-mail: chitra.juliette.toi22@polban.ac.id
[2]Jurusan Teknik Elektro, Politeknik Negeri Bandung, Bandung, Indonesia
E-mail: toto.tohir@polban.ac.id
[3]Jurusan Teknik Elektro, Politeknik Negeri Bandung, Bandung, Indonesia
E-mail: febi.ariefka@polban.ac.id
[4]Jurusan Teknik Elektro, Politeknik Negeri Bandung, Bandung, Indonesia
E-mail: yosua.sahat@polban.ac.id

ABSTRAK

Pencahayaan di lorong laboratorium sering kali tidak cukup baik karena kondisi cahaya alami yang dinamis sepanjang hari, sedangkan sistem penerangan yang harus manual dinyalakan ataupun dimatikan tidak bisa menyesuaikan perubahan tersebut. Penelitian ini menerapkan sistem pengendalian intensitas penerangan yang adaptif menggunakan kontroler Proporsional–Integral (PI) pada ESP32. Sistem ini dilengkapi dengan dua sensor BH1750, sebagai sensor umpan balik koridor dan sensor pemantau cahaya luar. Selain itu, sistem juga menggunakan modul dimmer berbasis TRIAC untuk mengontrol tiga lampu pijar berdaya 75 W. *Setpoint* ditentukan secara adaptif menggunakan mekanisme *daylight harvesting* sehingga tingkat cahaya di koridor mendekati standar SNI 6197:2020 sebesar 100 lux pada area kerja. *Plant* dimodelkan dengan nilai K = 0,049 lux/%, L = 0,30 detik, dan τ = 0,45 detik. Parameter kontroler ditentukan menggunakan metode Ziegler–Nichols dan *Internal Model Control*, kemudian dilakukan *tuning trial and error* sehingga diperoleh Kp = 4,0 dan Ki = 10,0. Hasil uji *closed loop* menunjukkan *rise time* sekitar 4 detik, *overshoot* maksimum 4,9%, *settling time* 12 detik, dan *error steady state* hampir nol. Pengujian terhadap gangguan dan peralihan cahaya pada waktu dini hari dan senja menunjukkan bahwa sistem mampu bekerja adaptif terhadap cahaya luar.

Kata Kunci:
Intensitas Penerangan, Kendali PI, Adaptif, ESP32

ABSTRACT

Lighting in laboratory corridors is often inadequate due to fluctuating natural light conditions throughout the day, while manual lighting systems fail to adjust to these changes. This study implements an adaptive lighting intensity control system using a Proportional-Integral (PI) controller on an ESP32. The system utilizes two BH1750 sensors: one for corridor feedback and another for monitoring external light. Additionally, a TRIAC-based dimmer module controls three 75 W incandescent lamps. The setpoint is determined adaptively via a daylight harvesting mechanism, aiming to maintain corridor light levels close to the SNI 6197:2020 standard of 100 lux in the work area. The plant is modeled with parameters K = 0.049 lux/%, L = 0.30 seconds, and τ = 0.45 seconds. Controller parameters were initially determined using the Ziegler–Nichols and Internal Model Control methods, followed by trial-and-error tuning to achieve values of Kp = 4.0 and Ki = 10.0. Closed-loop test results demonstrate a rise time of approximately 4 seconds, a maximum overshoot of 4.9%, a settling time of 12 seconds, and a steady-state error approaching zero. Tests involving disturbances and light transitions during early morning and dusk indicate that the system adapts effectively to external light conditions.

Keywords:
Lightning intensity, PI Controller, Adaptive, ESP32

1. PENDAHULUAN

Pencahayaan merupakan faktor krusial yang mendukung kenyamanan visual dan efisiensi kerja di lingkungan akademis, khususnya pada koridor laboratorium yang sering digunakan oleh mahasiswa, dosen, dan staf untuk berbagai aktivitas sehari-hari. Dalam kondisi nyata, tingkat pencahayaan koridor sering kali tidak memadai akibat fluktuasi cahaya alami; koridor bisa menjadi terlalu terang atau terlalu gelap pada waktu-waktu tertentu, sehingga mengganggu kenyamanan pengguna. Sistem pencahayaan yang mengandalkan sakelar manual memiliki keterbatasan signifikan dalam hal efektivitas dan efisiensi karena tidak memperhitungkan sifat dinamis cahaya alami. Solusi utamanya adalah beralih dari kontrol nyala/mati konvensional ke sistem otomatis yang mampu beradaptasi dengan kondisi pencahayaan eksternal. Salah satu pendekatannya adalah penggunaan metode PI (Proportional–Integral), yang secara cepat dan stabil meminimalkan *error* antara keluaran sistem dan nilai yang diinginkan. Metode ini bekerja dengan mempertimbangkan *error* sesaat (proporsional) maupun akumulasi *error* dari waktu ke waktu (integral). Dalam implementasi ini, metode PI mengatur tingkat kecerahan lampu melalui dimmer berbasis TRIAC, dengan menyesuaikan keluaran berdasarkan selisih antara tingkat kecerahan yang terukur oleh sensor dan *setpoint*. Penelitian ini bertujuan untuk mengimplementasikan sistem kendali intensitas pencahayaan koridor menggunakan pengendali PI pada mikrokontroler ESP32, dengan modul dimmer AC sebagai aktuatornya. Sistem ini menetapkan *setpoint* maksimum sebesar 4,65 lux pada sensor umpan balik (BH1750) berdasarkan posisi pemasangannya yang menghadap ke lantai koridor. *Setpoint* sistem ditetapkan sebesar 4,65 lux pada skala pengukuran sensor *feedback*, yaitu pembacaan sensor plafon pada kondisi ketika lux meter acuan pada bidang kerja menunjukkan 100 lux sesuai persyaratan minimum SNI 6197:2020 untuk area koridor. Spesifikasi kinerjanya mencakup *rise time* 5 detik, *overshoot* 5%, *settling time* 15 detik, *steady-state error* 2%. Selain itu, sistem ini mampu menyesuaikan intensitas pencahayaan sebagai respons terhadap perubahan kondisi cahaya lingkungan.

2. TINJAUAN PUSTAKA

Sistem kontrol pencahayaan adaptif penting untuk mempertahankan keseimbangan antara kenyamanan visual dan efisiensi energi bangunan (1), serta konsep *daylight harvesting* yang menggabungkan pencahayaan alami dan buatan menjadi pendekatan utama dalam hal ini (2)(3). Penelitian sebelumnya telah mengatur tingkat kecerahan dengan menggunakan ESP32, sensor BH1750, dan pengatur kecerahan AC dengan metode PID(4); kontroler PI yang diatur secara manual (Kp = 0,001; Ki = 69) pada ruang miniatur dengan *error* tetap sebesar 0,734%(5); kontroler PI/PID yang diatur dengan metode Ziegler–Nichols berdasarkan model *First Order Plus Dead Time* (FOPDT) pada rumah kaca (6); serta sistem kontrol PID untuk intensitas cahaya ruangan dengan sensor digital sebagai masukan *feedback*(7). Strategi penerangan *hybrid* diakui sebagai metode paling efektif untuk mencapai kenyamanan visual dan efisiensi energi sekaligus (8), serta sensor BH1750 telah secara luas digunakan dalam sistem *smart farming* maupun *smart building* (9)(10).

2.1 Intensitas Penerangan

Intensitas cahaya atau iluminasi adalah ukuran yang menunjukkan seberapa besar energi cahaya yang diterima oleh suatu permukaan dalam waktu tertentu, biasanya diukur dalam satuan lux (lumen/m^2)(11). Pengukuran tingkat cahaya dilakukan dengan menggunakan alat bernama lux meter, yang berfungsi mengubah cahaya menjadi sinyal listrik sehingga dapat diukur secara pasti (12). Penerangan yang terlalu redup bisa mengganggu penglihatan, sementara yang terlalu terang dapat menyebabkan silau dan rasa tidak nyaman (13), sehingga standar nasional seperti SNI menentukan nilai minimum pencahayaan untuk berbagai jenis ruangan sesuai dengan fungsi masing-masing(14).

2.3 Kontroler Proporsional–Integral (PI)

PID (Proportional Integral Derivative) adalah metode kontrol berbasis *feedback* yang berfungsi dengan membandingkan *output* sistem terhadap *setpoint*, dan menghasilkan sinyal kontrol yang bertujuan untuk mengurangi kesalahan (15):

$$e(t) = SP - PV \qquad (1)$$

dengan SP nilai *setpoint* dan PV (*Process Variable*) yang diperoleh dari hasil pengukuran sensor. Persamaan umum kontrol PID dituliskan sebagai(16):

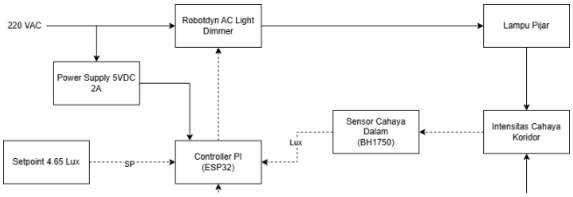
$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int e\,(t)dt + K_d \frac{de(t)}{dt} \qquad (2)$$

Komponen proporsional menghasilkan sinyal kontrol yang sebanding dengan *error* saat ini, sehingga mempercepat respons sistem. Komponen integral berfungsi mengakumulasi *error* seiring waktu, sehingga mampu menghilangkan *error* tetap pada keadaan *steady-state*. Sementara itu, komponen derivatif bekerja berdasarkan laju perubahan kesalahan, yang bertujuan untuk mengurangi *overshoot*(16). Kontroler PI adalah bentuk khusus dari kontroler PID tanpa komponen derivative, dalam penelitian ini nilai Kd ditetapkan menjadi nol karena komponen derivatif dapat memperkuat *noise* kuantisasi dari sensor yang bekerja pada rentang sinyal yang sempit, sehingga berdampak negatif pada stabilitas sistem.

3. METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Perancangan Sistem

Sistem berjalan dengan kendali *closed loop* dengan *setpoint* yang berubah sesuai kondisi dengan maksimum *setpoint* 4,65 Lux. ESP32 berperan sebagai kontroler utama, dua sensor BH1750 digunakan masing-masing sebagai umpan balik koridor dan pemantau cahaya luar, modul RobotDyn AC Light Dimmer berbasis TRIAC mengatur daya tiga lampu pijar 75 W yang terhubung paralel melalui kendali sudut penyalaan (*phase angle control*). Diagram blok sistem ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 2. Diagram blok sistem kendali adaptif intensitas penerangan

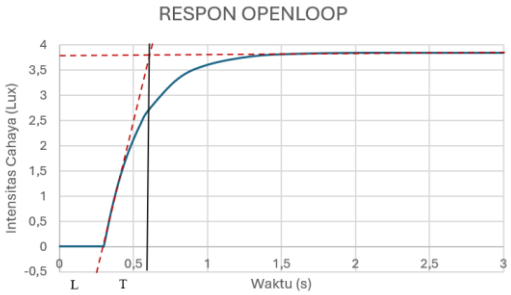
Pada setiap siklus kendali dengan periode pencuplikan Ts = 2 s, sistem membaca sensor cahaya luar dan menghitung *setpoint* efektif melalui mekanisme *daylight harvesting*, saat lingkungan gelap, *setpoint* ditetapkan pada nilai penuh 4,65 lux; saat cahaya alami terang, *setpoint* diturunkan hingga mendekati nol sehingga lampu tidak perlu menyala. Sinyal *error* dihitung sesuai persamaan (2) sebagai selisih *setpoint* efektif dengan variabel proses hasil pembacaan sensor koridor. Kontroler PI diimplementasikan dengan mekanisme *anti-windup* untuk mencegah akumulasi suku integral saat aktuator jenuh:

$$u(k) = K_p e(k) + [I(k-1) + K_i e(k) T_s] \qquad (3)$$

Output dari kontroler dikirim ke modul dimmer dalam bentuk sudut penyalaan TRIAC, yang berfungsi menentukan besar daya yang diberikan pada lampu. Dengan demikian, terbentuklah *closed loop* yang secara terus-menerus melakukan pengoreksian hingga tingkat cahaya di koridor mencapai dan mempertahankan nilai *setpoint.*

3.2 Identifikasi *Plant*

Identifikasi dilakukan melalui percobaan *open loop* dengan perubahan langkah *dimmer* dari 0% ke 95% pada kondisi gelap total. Kurva respons berbentuk S, karakteristik khas sistem orde satu dengan waktu tunda, dengan metode garis singgung pada kurva reaksi diperoleh waktu tunda L = 0,30 s, konstanta waktu τ = 0,45 s, dan penguatan statik K = 0,049 lux. Respons *open loop* dan identifikasi parameter ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 1. Respons step open-loop

3.3 Penalaan Parameter PI

Penalaan awal menggunakan Ziegler–Nichols tipe pertama (ZN-1) untuk kontroler PI:

$$K_p = \frac{0.9\tau}{K \cdot L} \qquad (4)$$

$$T_i = \frac{L}{0.3} \qquad (5)$$

yang menghasilkan Kp = 27,55 dan Ki = 27,55. Karena nilai tersebut menimbulkan osilasi dan *flicker* pada lampu, dilakukan penalaan ulang berbasis *Internal Model Control* (IMC/Lambda *tuning*):

$$K_p = \frac{\tau}{K(\lambda + L)}; \quad K_i = \frac{K_p}{\tau} \qquad (6)$$

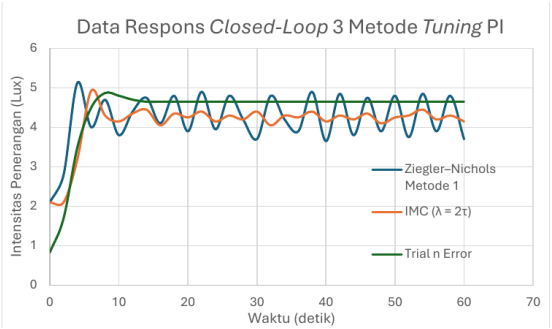
Dengan λ = 2τ = 0,90 s diperoleh Kp = 7,65 dan Ki = 17,0 namun hasilnya masih tetap osilasi, lalu dilakukan tuning dengan metode *trial and error dan* menghasilkan parameter final Kp = 4,0 dan Ki = 10,0 dengan Ts = 2 s. *Setpoint* sistem ditetapkan 4,65 lux pada skala sensor umpan balik, hasil kalibrasi menunjukkan bahwa saat sensor plafon membaca 4,65 lux, lux meter acuan pada bidang kerja menunjukkan 100 lux sesuai persyaratan minimum SNI 6197:2020 untuk area koridor.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Karakteristik Statik Plant

Pengujian statik dengan meningkatkan dimmer secara bertahap dari 0 hingga 95% dalam kondisi gelap menunjukkan karakteristik nonlinier yang terbagi menjadi tiga zona operasi. Zona pertama adalah zona mati, yaitu saat dimmer berada pada rentang 0–40% dengan nilai iluminansi tetap pada 0,83 lux. Zona kedua disebut zona aktif, terjadi pada dimmer 50–80% dengan peningkatan iluminansi secara hampir linier mencapai rentang 2,06 hingga 4,62 lux. Zona ketiga adalah zona jenuh, terjadi pada dimmer 80–95% dengan iluminansi yang tetap berada pada 4,62 hingga 4,65 lux karena filamen mendekati batas kemampuan emisinya. Nilai jenuh cahaya sebesar 4,65 lux tersebut menjadi dasar penentuan batas maksimum *setpoint* sistem.

4.2 Pengujian Closed Loop



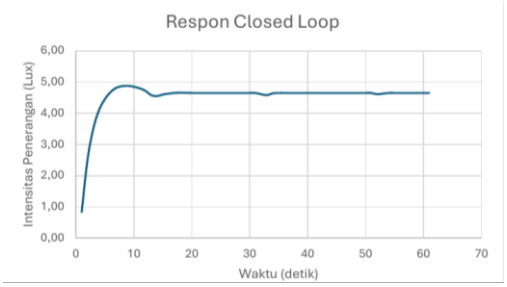
Gambar 3. Perbandingan respons *closed-loop* tiga metode penalaan PI

Gambar 3 menunjukkan perbandingan respons *closed loop* dari tiga metode tuning dan pada Tabel 1 menampilkan hasil perbandingannya. Tuning ZN-1 murni dan IMC menimbulkan osilasi yang berkelanjutan karena nilai K yang rendah menyebabkan penguatan analitis menjadi terlalu besar terhadap kemampuan kuantisasi sensor, sedangkan parameter akhir yang diperoleh melalui *trial and error* memberikan respons yang stabil di sekitar *setpoint* 4,65 lux.

Tabel 1. Perbandingan parameter penalaan dan hasil pengujian

Metode	Kp	Ki	Hasil
ZN-1 murni	27,55	27,55	Osilasi
IMC ($\lambda = 2\tau$)	7,65	17,0	Osilasi
Trial and error	4,0	10,0	Stabil

Respons transien kontroler final dari keadaan lampu mati menuju nilai *setpoint* 4,65 lux ditampilkan pada Gambar 4, dengan parameter performa terdapat pada Tabel 2. Sistem mencapai kondisi stabil dengan dimmer 74–77% (bukan 95%), yang menunjukkan kontroler berhenti meningkatkan daya tepat saat target daya tercapai, sehingga terdapat penghematan energi dibandingkan dengan sistem *on-off* konvensional.



Gambar 4. Respons transien dan kondisi tunak *closed-loop* (*setpoint* 4,65 lux)

Tabel 2. Parameter kinerja respons transien

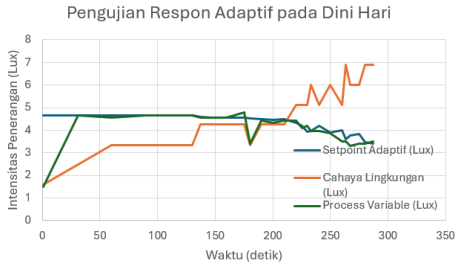
Parameter kinerja	Nilai
Waktu naik (*rise time*)	≈ 4 s
Puncak (*peak*)	4,88 lux (detik ke-9)
Overshoot	≈ 4,9 %
Settling Time	≈ 12 s (pita ±2%)
Error Steady-State	≈ 0 lux
Dimmer kondisi tunak	74–77 %
Riak PV tunak	± 0,015 lux

4.3 Pengujian Penolakan Gangguan

Dalam kondisi stabil, area sensor umpan balik diberi cahaya tambahan dari luar agar meniru masuknya cahaya alami, lalu gangguan tersebut dihilangkan. Hasilnya terlihat pada Gambar 5, ketika intensitas cahaya (PV) meningkat hingga 20–30 lux, kontroler mengatur dimmer menjadi 0% (lampu mati) karena cahaya lingkungan sudah berlebihan, setelah gangguan berakhir, kontroler kembali mengembalikan sistem ke kondisi awalnya (dimmer sekitar 75%, PV sekitar 4,65 lux) dalam waktu 10–15 detik. Pola yang sama pada kedua siklus menunjukkan ketahanan yang dapat diandalkan terhadap gangguan.

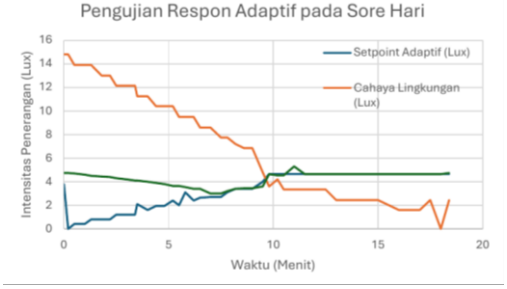
Gambar 5. Pengujian gangguan cahaya eksternal

4.4 Adaptivitas pada Transisi Cahaya Alami



Gambar 6. Respons adaptif sistem pada transisi dini hari - pagi

Pengujian yang dilakukan pada waktu dini hari (sekitar pukul 05.30–06.00 WIB) menunjukkan bahwa saat cahaya luar meningkat dari 1,59 lux menjadi 6,88 lux, *setpoint* efektif berkurang secara bertahap dari 4,65 lux ke 3,43 lux, dan level dimmer turun dari 75% menjadi 5%. Lampu menjadi lebih redup seiring dengan peningkatan cahaya alami secara terus-menerus, bukan dengan cara menyala-mati. Sebaliknya, pada transisi sore hingga malam hari (sekitar pukul 17.30–18.00 WIB, seperti ditunjukkan pada Gambar 7), lampu tetap mati karena koridor masih cukup terang akibat cahaya senja; sekitar menit ke-8, ketika intensitas cahaya PV turun di bawah *setpoint* efektif, dimmer mulai meningkat dari 46% hingga 84% saat cahaya luar hampir mencapai nol dan *setpoint* kembali mencapai 4,65 lux. Perbandingan kedua transisi dirangkum pada Tabel 3.



Gambar 7. Respons adaptif sistem pada transisi sore–malam

Tabel 3. Perbandingan transisi dini hari dan sore hari

Aspek	Transisi dini hari	Transisi sore hari
Waktu	± 05.30–06.00	± 17.30–18.00
Arah cahaya alami	Naik	Turun
Respons SP efektif	Turun	Naik
Respons lampu	Meredup	Menyala
Kesimpulan	Adaptif	Adaptif

Hasil yang berlawan arah dalam kedua pengujian, yaitu cahaya buatan berkurang ketika cahaya alami semakin terang dan sebaliknya, mengonfirmasi bahwa konsep *daylight harvesting* berfungsi sesuai dengan rancangan yang ditetapkan secara dua arah.

4.4 Keterbatasan Sistem

Meskipun hasil pengujian menunjukkan performa yang cukup baik, terdapat beberapa keterbatasan implementasi yang perlu dipertimbangkan sebelum sistem diterapkan pada skala yang lebih luas.

1. Korespondensi antara pembacaan sensor plafon (4,65 lux) dan iluminansi bidang kerja (100 lux) bersifat spesifik terhadap geometri instalasi yang tetap, mencakup posisi sensor, tinggi pemasangan lampu, dan dimensi koridor. Apabila salah satu parameter geometri tersebut berubah, prosedur kalibrasi silang perlu diulang untuk memperoleh nilai *setpoint* yang valid. Hal ini menjadi pertimbangan penting dalam penerapan pada gedung dengan konfigurasi koridor yang beragam.
2. Penggunaan lampu pijar 75 W sebagai beban dipilih karena kompatibel dengan kendali sudut fasa TRIAC dan memiliki karakteristik respons termal yang menghaluskan perubahan cahaya. Namun, lampu pijar memiliki efisiensi luminansi yang rendah dibandingkan lampu LED. Penerapan sistem pada lampu LED memerlukan penyesuaian aktuator, karena LED membutuhkan *driver* khusus yang kompatibel dengan metode peredupan, seperti *driver* dengan antarmuka 0–10 V atau PWM, dan tidak dapat langsung dikendalikan melalui TRIAC *phase control* tanpa potensi kerusakan komponen.
3. Sistem saat ini dirancang sebagai sistem SISO (*Single Input Single Output*) untuk satu zona kendali. Pada koridor panjang dengan distribusi cahaya yang tidak merata, satu sensor umpan balik mungkin tidak merepresentasikan kondisi keseluruhan zona pencahayaan.

Pada implementasi skala luas, penggantian lampu pijar dengan teknologi pencahayaan yang lebih modern dan efisien merupakan langkah yang relevan mengingat lampu pijar sudah jarang digunakan di lingkungan industri maupun institusi saat ini. Lampu LED *dimmable* menjadi alternatif utama karena efisiensi luminansinya jauh lebih tinggi, usia pakainya lebih panjang, dan tersedia dalam berbagai format yang kompatibel dengan sistem otomasi. Namun demikian, penggantian ke LED memerlukan penyesuaian pada sisi aktuator: metode *phase control* berbasis TRIAC yang digunakan pada penelitian ini tidak kompatibel secara langsung dengan driver LED, sehingga perlu diganti dengan driver LED *dimmable* yang mendukung antarmuka kendali analog 0–10 V atau sinyal PWM. Penyesuaian ini juga berdampak pada proses identifikasi *plant*, karena karakteristik respons LED terhadap sinyal kendali berbeda dari lampu pijar yang memiliki inersia termal. Dengan demikian, parameter penalaan kontroler PI perlu diidentifikasi ulang untuk *plant* baru tersebut. Selain LED, lampu TL (*fluorescent*) dengan balast elektronik yang mendukung peredupan juga dapat menjadi alternatif, meskipun rentang peredupannya umumnya lebih terbatas dibandingkan LED. Secara keseluruhan, algoritma kendali PI dan mekanisme *daylight harvesting yang* dirancang pada penelitian ini bersifat independen terhadap jenis lampu, sehingga tetap dapat diterapkan pada teknologi pencahayaan lain dengan penyesuaian pada lapisan aktuator dan identifikasi *plant* yang sesuai.

5. KESIMPULAN

Sistem kendali penerangan berbasis PI mampu menyesuaikan intensitas penerangan koridor secara otomatis berdasarkan *feedback* sensor. Model *plant* berhasil diidentifikasi sebagai FOPDT dengan nilai K = 0,049 lux/%, L = 0,30 detik, dan τ = 0,45 detik. Parameter kontrol akhir yaitu Kp = 4,0 dan Ki = 10,0 menghasilkan respons sistem *closed loop* yang stabil. Hasilnya menunjukkan *rise time* sebesar 4 detik, *overshoot* 4,9%, *settling time* 12 detik, dan *error steady-state* hampir nol pada *setpoint* maksimum 4,65 lux. Sistem terbukti mampu beradaptasi terhadap perubahan cahaya lingkungan baik dalam kondisi pengujian gangguan maupun saat terjadi transisi dini hari dan sore hari. Namun, terdapat beberapa keterbatasan yang perlu diperhatikan untuk pengembangan lebih lanjut. Korespondensi *setpoint* sensor terhadap standar SNI bersifat spesifik terhadap geometri instalasi, sehingga kalibrasi ulang diperlukan apabila konfigurasi fisik sistem berubah. Selain itu, aktuator TRIAC yang digunakan hanya kompatibel dengan beban resistif seperti lampu pijar dan tidak dapat langsung diterapkan pada lampu LED tanpa penyesuaian *driver*. Untuk penerapan pada skala yang lebih luas, penggantian lampu pijar dengan LED dimmable atau lampu TL berballast elektronik dapat meningkatkan efisiensi energi secara signifikan, dengan catatan bahwa aktuator TRIAC perlu diganti dengan *driver* yang kompatibel dan identifikasi *plant* perlu diulang, sementara algoritma PI dan mekanisme *daylight harvesting* yang dirancang bersifat independen terhadap jenis lampu sehingga tetap dapat digunakan tanpa perubahan mendasar pada struktur kendali.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Jurusan Teknik Elektro, Program Studi D4 Teknik Otomasi Industri, Politeknik Negeri Bandung, serta kepada dosen pembimbing atas ilmu, arahan, dan bimbingan selama pelaksanaan Tugas Akhir ini.

DAFTAR PUSTAKA

1. Colaco SG, Varghese SG, Kurian CP, Tm SK. R EVIEW A RTICLE A state-of-the-art arti fi cial intelligent techniques in daylighting controller : models and performance. 2023;37.
2. Mahawan J, Thongtha A. Experimental investigation of illumination performance of hollow light pipe for energy consumption reduction in buildings. Energies. 2021;14(2).
3. Language : English An Adaptive and Scalable Indoor Lighting Control System Using ESP32 Microcontrollers , IoT , and Machine Learning. 2024;1–11.
4. Fikrul M, Aribowo W, Widyartono M, Hermawan AC. Rancang Bangun Kendali PID pada Sistem Penerangan Berbasis Node-red. :9–13.
5. Yofanda RT, Eka Nuryanto Budisusila, Jenny Putri Hapsari. Sistem Pengendalian Parameter Ruangan Otomatis Berbasis Internet of Things dengan Sensor BH1750. Med Tek J Tek Elektromedik Indones. 2025;6(2):113–28.
6. Suhu P, Tanah K, Intesitas DAN. PADA PROTOTYPE SMART GREENHOUSE. 2021;10(1):1–8.
7. Sobirin DM, Ariandi M. Sistem Kendali PID Untuk Intensitas Cahaya Ruang Berbasis Labview PID Control System For Light Intensity Of Space-Based Labview. 2016;4(2):59–67.
8. Mutmainnah N, Musa H. Optimalisasi Pencahayaan Alami dan Buatan pada Laboratorium Komputer Menggunakan Simulasi Dialux. 2025;2(1):1–9.
9. Widura A, Hadiatna F. Fuzzy-Based Smart Farming and Consumed Energy Comparison Using the Internet of Things. 2023;11(June):69241–51.
10. Chiesa G, Di Vita D, Ghadirzadeh A, Muñoz Herrera AH, Leon Rodriguez JC. A fuzzy-logic IoT lighting and shading control system for smart buildings. Autom Constr [Internet]. 2020;120(December 2019):103397. Available from: https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103397
11. Bano TB, Widagda IGA, Trisnawati NLP, Wibawa IMS, Putra IK, Sandi IN. Perancangan Alat Ukur Intensitas Cahaya menggunakan Sensor BH1750 Berbasis Mikrokontroler ATMega328P. Kappa J. 2024;8(1):95–101.
12. Fatma S, Putri D, Materi J, Jmpf F. Analisis Intensitas Cahaya di Dalam Ruangan dengan Menggunakan Aplikasi Smart Luxmeter Berbasis Android. 2022;12:51–5.
13. Oleo UH, Korespondensi P, Mamdani F. OTOMATIS MENGGUNAKAN METODE FUZZY LOGIC. 2025;3(2):122–30.
14. Syamsi WA, Setianto N, Saepuloh A, Suyono AM, Widyatama U. Jurnal Taguchi. 2024;163–70.
15. Kumar A, Expressway Y, Noida G, Pradesh U. A Research Paper on PID Controller. 2018;5(4):598–601.
16. Paper W. Principles of PID Controllers Zurich Instruments. 2023;(July).