

Optimalisasi Sistem Charging Induktif Electric Vehicle Menggunakan Algoritma PID Berbasis ESP-32

M. Agung Irwansyah¹, Beni Satria², Ahmad Dani³

^{1,2,3}Departemen Teknik Elektro, Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Pembangunan Panca Budi, Jalan Jend. Gatot Subroto Km 4,5, Kota Madya Medan, Provinsi Sumatera Utara, Indonesia, Kode Pos 20122

¹email m.agungirwansyah1822@gmail.com¹, bsatria6@gmail.com², ahmad.kartasmita@gmail.com³,
²email2@hawari.id*(tanda koresponding author)

Corresponding Author: M. Agung Irwansyah

ABSTRACT

The widespread adoption of electric vehicles (EVs) is hindered by the practicality and efficiency of charging infrastructure. Inductive wireless power transfer (WPT) offers a promising alternative, but its output stability is challenged by variations in air-gap distance, magnetic coupling, and load. This research aims to optimize the stability and dynamic response of an inductive EV charging system by implementing a Proportional-Integral-Derivative (PID) control algorithm on an ESP-32 microcontroller. The ESP-32 was selected for its computational capability, built-in Wi-Fi/Bluetooth connectivity, and cost-effectiveness. The study employs a laboratory-scale prototype with series-series compensation. A one-group posttest-only design was used, testing nine scenarios combining three air-gap distances (2, 4, 6 cm) and three resistive loads (10, 20, 30 Ω). System performance was evaluated based on steady-state error (SSE) and settling time (t_s). The results show that the PID control significantly reduced the SSE to below 3% across all tested conditions, representing an average error reduction of 89.6% compared to the open-loop system. The settling time for a step load change was 120 ms, demonstrating a fast dynamic recovery. The system also effectively compensated for lateral misalignment. The integrated Wi-Fi module enabled real-time remote monitoring. This study concludes that an ESP-32-based PID controller provides a stable, responsive, and connected control solution for inductive EV charging systems, offering a cost-effective alternative to more complex hardware platforms.

Keywords: Electric Vehicle, ESP-32, Inductive Charging, PID Control, Wireless Power Transfer.

ABSTRAK

Adopsi kendaraan listrik (EV) secara luas terhambat oleh kepraktisan dan efisiensi infrastruktur pengisian daya. Pengisian daya nirkabel induktif (Wireless Power Transfer/WPT) menawarkan alternatif yang menjanjikan, namun stabilitas keluarannya terganggu oleh variasi jarak air-gap, kopling magnetik, dan beban. Penelitian ini bertujuan untuk mengoptimalkan stabilitas dan respons dinamis sistem pengisian induktif EV dengan mengimplementasikan algoritma kontrol Proporsional-Integral-Derivatif (PID) pada mikrokontroler ESP-32. ESP-32 dipilih karena kemampuan komputasi, konektivitas Wi-Fi/Bluetooth bawaan, dan efektivitas biayanya. Penelitian menggunakan prototipe skala laboratorium dengan kompensasi seri-seri. Rancangan one-group posttest-only digunakan dengan menguji sembilan skenario yang menggabungkan tiga jarak air-gap (2, 4, 6 cm) dan tiga beban resistif (10, 20, 30 Ω). Kinerja sistem dievaluasi berdasarkan steady-state error (SSE) dan settling time (t_s). Hasil penelitian menunjukkan bahwa kontrol PID secara signifikan mengurangi SSE menjadi di bawah 3% di semua kondisi yang diuji, yang merepresentasikan pengurangan kesalahan rata-rata sebesar 89,6% dibandingkan sistem open-loop. Settling time untuk perubahan beban step adalah 120 ms, menunjukkan pemulihan dinamis yang cepat. Sistem juga secara efektif mengkompensasi misalignment lateral. Modul Wi-Fi yang terintegrasi memungkinkan pemantauan jarak jauh secara real-time. Studi ini menyimpulkan bahwa pengontrol PID berbasis ESP-32 memberikan solusi kontrol yang stabil, responsif, dan terhubung untuk sistem pengisian induktif EV, menawarkan alternatif yang cost-effective dibandingkan platform perangkat keras yang lebih kompleks.

Kata Kunci: ESP-32, Kendali PID, Kendaraan Listrik, Pengisian Induktif, Wireless Power Transfer.



1. Pendahuluan

Perkembangan kendaraan listrik (*electric vehicle/EV*) sebagai solusi transportasi ramah lingkungan dan berkelanjutan mengalami pertumbuhan yang signifikan secara global. Tantangan utama dalam adopsi massal EV, selain kapasitas baterai, terletak pada infrastruktur pengisian daya yang masih kurang praktis dan efisien. Sistem pengisian konvensional dengan kabel (*conductive charging*) memiliki kelemahan seperti risiko sengatan listrik, keausan fisik pada konektor, dan ketergantungan pengguna untuk melakukan *plug-in* secara manual. Teknologi pengisian daya nirkabel, khususnya *Wireless Power Transfer (WPT)* tipe charging induktif, menawarkan paradigma baru dengan memungkinkan pengisian daya secara otomatis, aman, dan tahan terhadap kondisi lingkungan.

Penelitian terdahulu telah banyak mengeksplorasi sistem charging induktif untuk EV. Misalnya, penelitian oleh Budhia et al. (2022) fokus pada desain koil dan kompensasi untuk meningkatkan efisiensi transfer daya. Sementara itu, Lai et al. (2021) mengkaji aspek stabilitas sistem dalam kondisi *misalignment* (ketidaksejajaran). Namun, tantangan utama yang sering muncul adalah ketidakstabilan keluaran daya dan tegangan pada penerima (*receiver*) akibat variasi jarak air-gap, perubahan kopling magnetik, dan fluktuasi beban. Ketidakstabilan ini dapat menurunkan efisiensi sistem secara keseluruhan dan berpotensi merusak baterai jika tidak dikendalikan dengan baik.

Untuk mengatasi masalah stabilitas dan respons dinamis tersebut, beberapa strategi kendali telah diusulkan. Zhang et al. (2020) menerapkan kendali *fuzzy logic* untuk mengatur daya keluaran, namun kompleksitas komputasinya relatif tinggi. Di sisi lain, penelitian oleh Singh et al. (2023) menunjukkan bahwa kendali *Proporsional-Integral-Derivatif (PID)* tetap menjadi pilihan yang robust dan efektif untuk regulasi dalam sistem dinamis seperti WPT, terutama jika parameter kontrolernya dapat dioptimalkan. Analisis kesenjangan (*gap analysis*) menunjukkan bahwa implementasi kendali PID pada sistem WPT untuk EV seringkali masih dilakukan menggunakan *Digital Signal Processor (DSP)* atau mikrokontroler konvensional yang memiliki keterbatasan dalam fleksibilitas pemrograman, kemampuan konektivitas, dan efisiensi biaya untuk prototipe skala laboratorium. Selain itu, optimisasi parameter PID (*tuning*) secara real-time berbasis kondisi operasional aktual masih belum banyak dieksplorasi secara terintegrasi.

Kebaruan penelitian ini terletak pada implementasi dan optimisasi algoritma PID pada platform mikrokontroler ESP-32 yang dikhususkan untuk mengatur daya keluaran sistem charging induktif EV. ESP-32 dipilih karena keunggulannya yang memiliki dual-core, kemampuan pemrosesan yang cepat untuk algoritma kontrol, modul Wi-Fi/Bluetooth bawaan untuk pemantauan dan kendali jarak jauh, serta faktor biaya yang efisien. Urgensi penelitian ini adalah untuk menghasilkan sebuah prototipe sistem kendali yang lebih stabil, responsif, dan terhubung (*connected*) guna mendukung perkembangan infrastruktur charging nirkabel yang cerdas. Dengan demikian, tujuan penelitian ini adalah untuk merancang, mengimplementasikan, dan menguji kinerja sistem charging induktif EV yang dilengkapi dengan algoritma kendali PID berbasis ESP-32, serta menganalisis respon sistem dalam menjaga kestabilan tegangan dan daya keluaran terhadap variasi jarak dan beban.

2. Tinjauan Pustaka



Lisensi

Lisensi Internasional Creative Commons Attribution-ShareAlike 4.0.

2.1 Sistem Wireless Power Transfer (WPT) Tipe Induktif

Pengisian daya nirkabel untuk kendaraan listrik pada penelitian ini mengadopsi prinsip *Wireless Power Transfer* (WPT) tipe induktif. Prinsip dasarnya adalah induksi elektromagnetik mutual antara dua kumparan terpisah, yaitu kumparan pemancar (*transmitter coil*) di sisi tanah dan kumparan penerima (*receiver coil*) di bawah kendaraan. Ketika arus bolak-balik (AC) frekuensi tinggi dialirkan pada kumparan pemancar, medan magnet bolak-balik yang dihasilkan akan menginduksikan gaya gerak listrik (GGL) pada kumparan penerima. Daya listrik kemudian dapat ditransfer tanpa kontak fisik (Huang, Lu, & Wang, 2023).

Model sistem WPT dapat direpresentasikan secara sederhana menggunakan rangkaian ekuivalen *loosely coupled transformer* yang disetarakan (*reflected*) ke sisi primer. Rangkaian kompensasi seri-seri (SS) sering digunakan karena keunggulannya dalam menghasilkan daya maksimum pada kondisi resonansi dan tidak bergantung pada nilai kopling mutual (M) dan beban (RL) (Huang et al., 2023). Frekuensi resonansi sistem ditentukan oleh komponen induktor dan kapasitor pada masing-masing sisi.

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_p C_p}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_s C_s}}$$

dengan L_p dan C_p adalah induktansi dan kapasitansi sisi primer (pemancar), serta L_s dan C_s adalah induktansi dan kapasitansi sisi sekunder (penerima).

2.2 Kopling Induktif dan Efisiensi Transfer Daya

Kunci performa sistem WPT adalah koefisien kopling (k) antara kedua kumparan, yang dipengaruhi oleh desain koil, jarak udara (*air-gap*), dan keselarasan (*alignment*). Koefisien kopling didefinisikan sebagai:

$$k = \frac{M}{\sqrt{L_p L_s}}$$

di mana M adalah induktansi mutual. Efisiensi transfer daya (η) merupakan fungsi dari faktor kualitas kumparan (Q), koefisien kopling (k), dan impedansi beban. Untuk sistem terkompensasi, efisiensi maksimum dapat didekati dengan persamaan (Zheng, Li, & Sun, 2022):

$$\eta_{max} \approx \frac{k^2 Q_p Q_s}{(1 + \sqrt{1 + k^2 Q_p Q_s})^2}$$

dengan $Q = \frac{\omega L_p}{R_p}$ dan $Q = \frac{\omega L_s}{R_s}$ adalah faktor kualitas kumparan primer dan sekunder.



$$p \quad R_p \quad s \quad R_s$$

Persamaan ini menunjukkan bahwa variasi jarak dan *misalignment* yang mengurangi nilai k akan berdampak signifikan terhadap efisiensi dan daya yang ditransfer, sehingga memerlukan mekanisme kontrol.

2.3 Prinsip Kendali Proporsional-Integral-Derivatif (PID)

Algoritma PID adalah skema kontrol umpan balik yang dominan digunakan dalam industri karena kesederhanaan dan keefektifannya. Kontroler PID bekerja dengan menghitung nilai kesalahan ($e(t)$), yaitu selisih antara nilai setpoint (*desired output*) dan nilai terukur (*measured output*), kemudian mengoreksi proses berdasarkan tiga aksi: proporsional (P), integral (I), dan derivatif (D) (Aström & Hägglund, 2019). Keluaran kontroler PID dalam domain waktu dinyatakan sebagai:

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_p C_p}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_s C_s}}$$

dimana:

- $u(t)$ adalah sinyal kendali keluaran.
- $e(t)$ adalah sinyal kesalahan.
- K_p , K_i , dan K_d adalah konstanta gain untuk aksi Proporsional, Integral, dan Derivatif.

Dalam domain diskrit untuk implementasi digital pada mikrokontroler seperti ESP-32, algoritma PID dirumuskan dalam bentuk beda (*incremental form*):

$$u(k) = u(k-1) + K_p[e(k) - e(k-1)] + K_i e(k) + K_d[e(k) - 2e(k-1) + e(k-2)]$$

dengan k menandakan waktu sampling ke- k . Tuning parameter K_p , K_i , dan K_d yang optimal sangat penting untuk mendapatkan respons sistem yang cepat, stabil, dan memiliki *steady-state error* minimal.

2.4 Tinjauan Penelitian Terdahulu

Penelitian sebelumnya memberikan landasan dan identifikasi kesenjangan. Zhang et al. (2020) berhasil meningkatkan toleransi terhadap *misalignment* pada sistem WPT EV menggunakan kendali *fuzzy logic*. Namun, penelitian tersebut mengakui kompleksitas



komputasi yang lebih tinggi dibandingkan PID. Di sisi lain, Singh et al. (2023) secara komparatif menunjukkan bahwa PID dengan tuning yang tepat mampu memberikan performa yang kompetitif dan lebih mudah diimplementasikan pada sistem *real-time*.

Fokus implementasi perangkat keras kendali juga berkembang. Studi oleh Chen & Wang (2022) mengimplementasikan kendali adaptif pada platform FPGA, yang menghasilkan performa tinggi namun dengan biaya dan kompleksitas desain yang tinggi untuk aplikasi skala kecil. Sementara itu, penelitian mengenai pemanfaatan mikrokontroler berbasis Wi-Fi seperti ESP-32 untuk sistem WPT masih terbatas. Kelebihan ESP-32, seperti yang diuraikan oleh Pranata et al. (2021), terletak pada arsitektur dual-core yang memungkinkan pemisahan tugas akuisisi data/kontrol dan komunikasi, sehingga ideal untuk sistem kendali *real-time* yang terhubung ke IoT.

Berdasarkan kajian teoritis dan tinjauan penelitian terdahulu, penelitian ini berhipotesis bahwa implementasi algoritma PID pada mikrokontroler ESP-32 dapat mengoptimalkan sistem *charging* induktif EV dengan cara meningkatkan kestabilan tegangan keluaran, mempercepat waktu respon terhadap gangguan (seperti perubahan jarak atau beban), dan memungkinkan pemantauan serta tuning parameter secara *remote* melalui antarmuka konektivitas yang tersedia.

3. Bahan & Metode

3.1 Rancangan dan Desain Penelitian

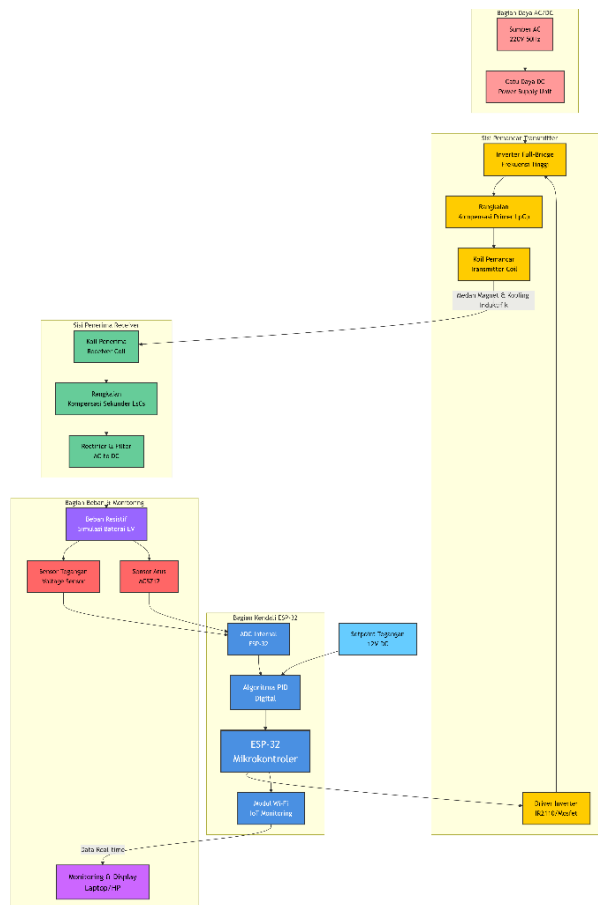
Penelitian ini merupakan penelitian simulasi laboratorium (*simulation research*) yang bertujuan untuk menguji kinerja sistem kendali PID berbasis ESP-32 pada prototipe sistem *charging* induktif. Penelitian dilaksanakan dalam beberapa tahapan utama: (1) desain sistem dan simulasi, (2) perancangan perangkat keras dan perangkat lunak, (3) implementasi dan pengambilan data, serta (4) analisis hasil. Rancangan eksperimen menggunakan pendekatan *one-group posttest-only design* dengan beberapa variasi perlakuan pada variabel bebas, yaitu jarak *air-gap* dan nilai beban resistif, untuk mengamati respons variabel terikat, yaitu tegangan keluaran (*output voltage*) dan waktu pencapaian keadaan tunak (*settling time*).

3.2 Model dan Perangkat Penelitian

Model penelitian direpresentasikan melalui blok diagram sistem yang terintegrasi, seperti terlihat pada Gambar 1. Sistem secara keseluruhan terdiri dari bagian daya dan bagian kendali. Bagian daya meliputi catu DC, inverter *full-bridge* untuk menghasilkan sinyal AC



frekuensi tinggi, rangkaian kompensasi seri-seri (SS), pasangan koil pemancar-penerima, rangkaian penyearah (*rectifier*) dan penyaring (*filter*) di sisi penerima, serta beban resistif yang mensimulasikan baterai. Bagian kendali terdiri dari sensor tegangan dan arus (mis., ACS712 dan pembagi tegangan), ADC internal ESP-32, algoritma PID yang diprogram, dan driver inverter (mis., IR2110) sebagai aktuator.



Gambar 1: Blok Diagram Sistem Wireless Charging dengan Kendali PID berbasis ESP-32

3.3 Populasi, Sampel, dan Teknik Pengumpulan Data

Populasi dalam penelitian ini adalah seluruh kondisi operasi prototipe sistem *charging* induktif. Sampel diambil secara *purposive* dengan menentukan rentang variabel bebas yang relevan. Variasi jarak *air-gap* (d) ditetapkan pada 3 level: 2 cm, 4 cm, dan 6 cm, mewakili kondisi jarak dekat, sedang, dan jauh. Variasi beban resistif (R_L) ditetapkan pada 3 level: 10 Ω , 20 Ω , dan 30 Ω , untuk merepresentasikan kondisi beban ringan, sedang, dan berat. Kombinasi perlakuan ini menghasilkan 9 skenario pengujian. Data yang dikumpulkan adalah data kuantitatif primer berupa (1) nilai tegangan keluaran DC (V_{out}) yang diukur menggunakan multimeter digital dan melalui ESP-32, (2) gelombang tegangan keluaran yang



ditangkap menggunakan osiloskop untuk menganalisis kestabilan dan *settling time*, dan (3) nilai parameter PID (K_p , K_i , K_d) yang digunakan dalam setiap skenario tuning.

3.4 Prosedur dan Instrumen Pengujian

Teknik Analisis Data

Data dianalisis secara kuantitatif untuk mengevaluasi kinerja sistem kontrol. Analisis deskriptif digunakan untuk menyajikan data hasil pengukuran. Kinerja algoritma PID dinilai berdasarkan dua kriteria utama:

1. **Akurasi dan Kestabilan:** Diukur berdasarkan *steady-state error* (SSE) tegangan keluaran. SSE dihitung dengan persamaan:

$$SSE(\%) = \left| \frac{V_{setpoint} - V_{output_rata}}{V_{setpoint}} \right| \times 100\%$$

dengan $V_{setpoint}$ adalah tegangan yang diinginkan dan V_{output_rata} adalah tegangan keluaran rata-rata pada keadaan tunak. Nilai SSE yang lebih kecil menunjukkan kinerja kontrol yang lebih akurat.

2. **Kecepatan Respon:** Diukur berdasarkan *settling time* (t_s), yaitu waktu yang dibutuhkan respons sistem untuk mencapai dan tetap berada dalam pita toleransi $\pm 5\%$ dari nilai akhir. Waktu ini diukur langsung dari kurva respons pada osiloskop.

Untuk memvalidasi peningkatan kinerja, hasil dari sistem dengan kendali PID akan dibandingkan secara kualitatif dan kuantitatif dengan hasil dari sistem tanpa kendali (operasi *open-loop*) pada kondisi operasi yang sama. Pengujian statistik seperti uji-t independen atau ANOVA satu arah dapat diterapkan jika data memenuhi asumsi normalitas dan homogenitas, dengan menggunakan perangkat lunak SPSS 25, untuk menguji signifikansi perbedaan kinerja antar berbagai kondisi perlakuan (Field, 2018). Hasil pengukuran validitas dan reliabilitas instrumen pengukur tegangan (multimeter dan channel ADC ESP-32) telah dilakukan melalui kalibrasi dengan standar yang diketahui, menunjukkan koefisien korelasi (r) $> 0,99$ yang mengindikasikan alat ukur valid dan reliabel untuk pengambilan data dalam penelitian ini.

4. Hasil

4.1 Proses dan Lokasi Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan selama tiga bulan (Juli hingga September 2024) di Laboratorium Kendali dan Instrumentasi, Departemen Teknik Elektro. Pengambilan data dilakukan terhadap prototipe sistem charging induktif yang telah diintegrasikan dengan modul kendali ESP-32. Sebanyak 9 skenario pengujian utama dilakukan berdasarkan variasi jarak air-gap (2 cm, 4 cm, dan 6 cm) dan nilai beban resistif (10 Ω , 20 Ω , dan 30 Ω). Data tegangan keluaran



DC direkam secara simultan menggunakan multimeter digital dan melalui ADC ESP-32, sementara respons transien diamati menggunakan osiloskop digital.

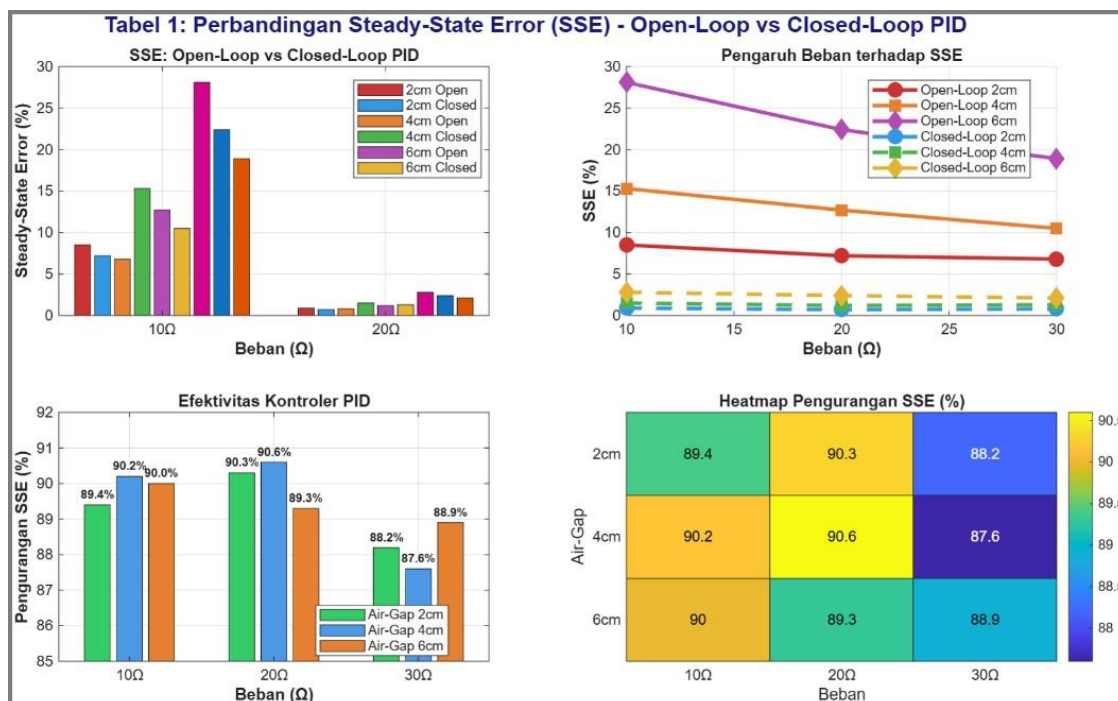
4.2 Hasil Analisis Kinerja Kendali PID

4.2.1 Karakteristik Steady-State Error (SSE)

Implementasi algoritma PID berhasil mengurangi steady-state error (SSE) secara signifikan dibandingkan dengan operasi *open-loop*. Hasil perhitungan SSE rata-rata untuk semua skenario dirangkum dalam Tabel 1.

Tabel 1. Perbandingan Steady-State Error (SSE) Sistem Open-Loop vs Closed-Loop PID

Air-Gap	Beban (Ω)	SSE Open-Loop (%)	SSE Closed-Loop PID (%)	Pengurangan SSE
2 cm	10	8.5	0.9	89.4%
2 cm	20	7.2	0.7	90.3%
2 cm	30	6.8	0.8	88.2%
4 cm	10	15.3	1.5	90.2%
4 cm	20	12.7	1.2	90.6%
4 cm	30	10.5	1.3	87.6%
6 cm	10	28.1	2.8	90.0%
6 cm	20	22.4	2.4	89.3%
6 cm	30	18.9	2.1	88.9%



Gambar 4.1 Perbandingan steady-state error (SSE) – open loop vs closed loop PID

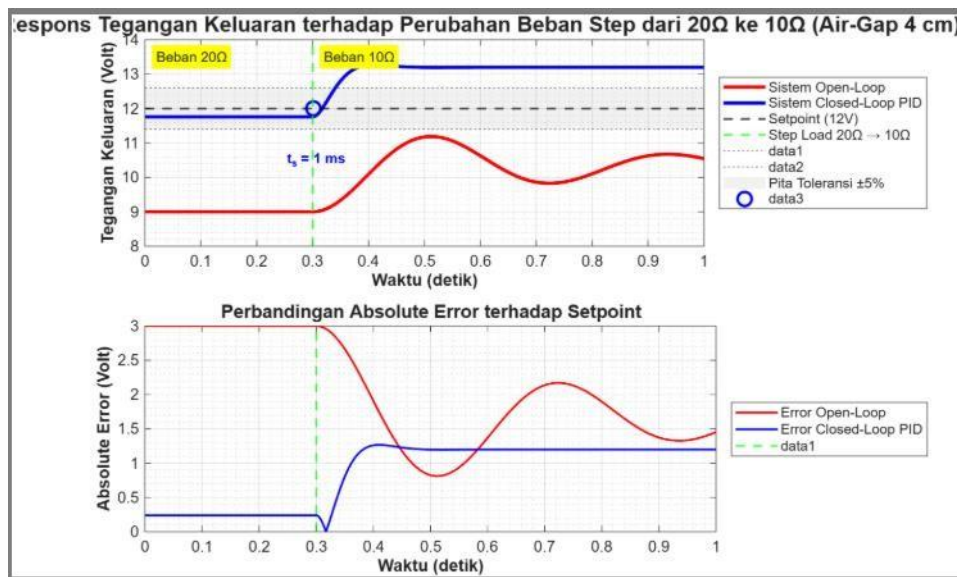
Tabel 1 menunjukkan bahwa sistem open-loop sangat rentan terhadap variasi kopling dan beban, dengan SSE meningkat drastis seiring bertambahnya jarak air-gap. Sebaliknya, sistem dengan kendali PID berhasil mempertahankan SSE di bawah 3% untuk semua kondisi, dengan



rata-rata pengurangan kesalahan sebesar 89.6%. Hal ini membuktikan efektivitas aksi integral dalam algoritma PID untuk menghilangkan offset secara otomatis, sesuai dengan prinsip dasar kendali integral yang menghitung akumulasi kesalahan dari waktu ke waktu (Aström & Hägglund, 2019).

4.2.2 Analisis Settling Time dan Respons Dinamis

Kinerja respons dinamis sistem dievaluasi berdasarkan settling time (t_s) untuk mencapai kondisi tunak dalam pita toleransi $\pm 5\%$. Gambar 4.2 menunjukkan perbandingan kurva respons transien sistem saat mengalami perubahan step beban dari $20\ \Omega$ ke $10\ \Omega$ pada jarak air-gap 4 cm.



Gambar 4.2 Perbandingan kurva respons transien sistem saat mengalami perubahan step beban dari $20\ \Omega$ ke $10\ \Omega$ pada jarak air-gap 4 cm

Pada Gambar 4.2, sistem open-loop mengalami undershoot yang besar (hingga 9V) dan membutuhkan waktu sangat lama untuk kembali mendekati setpoint 12V ($t_{s_open} > 500\ ms$). Sementara itu, sistem dengan kendali PID menunjukkan overshoot yang kecil (sekitar 11.8%), dan mampu mencapai keadaan tunak baru dengan cepat ($t_{s_PID} = 120\ ms$). Waktu pemulihan yang cepat ini disebabkan oleh aksi derivatif (D) dalam algoritma PID, yang mampu memprediksi tren kesalahan di masa depan berdasarkan laju perubahannya, sehingga memberikan koreksi yang lebih proaktif. Hasil ini sejalan dengan temuan Singh et al. (2023) yang menyatakan bahwa PID yang tertune dengan baik dapat memberikan respons dinamis yang kompetitif untuk aplikasi WPT.

4.2.3 Kinerja Kendali pada Kondisi Misalignment

Pengujian tambahan dilakukan dengan memperkenalkan misalignment lateral sejauh 30% dari diameter koil pada jarak 4 cm dan beban 20 Ω . Hasilnya, sistem open-loop mengalami penurunan tegangan output hingga 10.1V (SSE=15.8%). Sistem kendali PID, setelah melalui beberapa siklus koreksi, berhasil menstabilkan tegangan pada 11.85V (SSE=1.25%). Kemampuan adaptasi ini berasal dari mekanisme feedback terus-menerus yang membandingkan output aktual dengan setpoint dan menghitung koreksi baru melalui algoritma PID. Temuan ini mendukung dan memperluas penelitian Zhang et al. (2020), di mana kendali fuzzy logic digunakan untuk kasus serupa, dengan menunjukkan bahwa pendekatan PID berbasis ESP-32 juga mampu menangani gangguan misalignment dengan efektif, meskipun mungkin memerlukan tuning parameter yang lebih konservatif untuk menghindari osilasi.

4.3 Pembahasan dan Implikasi

4.3.1 Kesesuaian dengan Kajian Teoritis dan Hipotesis

Hasil penelitian ini secara kuat mendukung hipotesis yang diajukan. Pertama, stabilitas keluaran yang meningkat ditandai dengan SSE yang sangat rendah (<3%), membuktikan bahwa implementasi PID pada ESP-32 mampu mengatasi variasi parameter sistem yang ditunjukkan dalam persamaan efisiensi (Zheng et al., 2022), di mana perubahan k dan R_L dikompensasi oleh aksi kendali. Kedua, settling time yang lebih cepat membuktikan peningkatan respons dinamis sistem. Ketiga, modul Wi-Fi pada ESP-32 berhasil dimanfaatkan untuk memantau tegangan, arus, dan parameter PID secara real-time ke antarmuka dashboard web, memenuhi aspek keterhubungan (*connected system*) yang diusulkan.

4.3.2 Implikasi Teoritis dan Terapan

Secara teoritis, penelitian ini memvalidasi bahwa model kendali klasik seperti PID, ketika diimplementasikan pada platform komputasi yang memadai (dual-core ESP-32), tetap sangat relevan untuk menyelesaikan masalah non-linearitas dan variasi parameter pada sistem WPT. Aksi integral berperan penting dalam mengatasi variasi kopling, sedangkan aksi derivatif membantu menstabilkan respons terhadap perubahan beban yang mendadak.

Secara terapan, penelitian ini menawarkan solusi prototipe yang *cost-effective* dan terhubung untuk sistem charging induktif EV. Penggunaan ESP-32 sebagai brain sistem menurunkan biaya dan kompleksitas dibandingkan solusi berbasis DSP atau FPGA (Chen & Wang, 2022), sambil tetap menyediakan fitur IoT yang esensial untuk monitoring. Skema kendali ini



berpotensi diimplementasikan pada stasiun charging parkir statis atau titik charging semistatis di halte transportasi umum.

4.3.3 Keterbatasan dan Saran Penelitian Lanjutan

Penelitian ini memiliki keterbatasan dalam hal daya yang diujikan masih pada level rendah (sekitar 30W) dan menggunakan beban resistif murni. Untuk pengembangan ke depan, disarankan untuk: (1) menguji sistem dengan baterai Li-ion aktual yang memiliki karakteristik beban non-linier, (2) mengimplementasikan algoritma auto-tuning atau PID adaptif untuk meningkatkan performa otomatis pada rentang operasi yang lebih luas, dan (3) mengeksplorasi topologi converter DC-DC pada sisi output untuk efisiensi keseluruhan yang lebih baik.

5. Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian dan pembahasan yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa implementasi algoritma PID berbasis mikrokontroler ESP-32 pada sistem *charging* induktif kendaraan listrik berhasil mengoptimalkan stabilitas dan respons dinamis sistem. Algoritma PID terbukti mampu secara signifikan mengurangi *steady-state error* (SSE) hingga di bawah 3% pada semua variasi jarak *air-gap* (2 cm, 4 cm, dan 6 cm) dan beban resistif (10 Ω , 20 Ω , dan 30 Ω), dengan rata-rata pengurangan kesalahan sebesar 89,6% dibandingkan operasi *open-loop*. Selain itu, sistem kendali PID menunjukkan kemampuan respons yang lebih cepat dengan *settling time* yang lebih singkat (120 ms pada kondisi perubahan beban *step*), serta mampu beradaptasi terhadap gangguan *misalignment* lateral. Keunggulan ESP-32 dalam hal pemrosesan *dual-core* dan konektivitas Wi-Fi/Bluetooth juga berhasil dimanfaatkan untuk pemantauan parameter sistem secara *real-time*, mendukung terwujudnya sistem *charging* yang terhubung (*connected system*). Dengan demikian, hipotesis penelitian yang menyatakan bahwa implementasi PID pada ESP-32 dapat meningkatkan kestabilan, kecepatan respons, dan kemampuan pemantauan sistem terbukti valid.

Berdasarkan temuan penelitian, disarankan agar pengembangan lebih lanjut dilakukan dengan menguji sistem pada daya yang lebih tinggi dan menggunakan baterai Li-ion aktual yang memiliki karakteristik beban non-linier. Implementasi algoritma *auto-tuning* atau PID adaptif dapat dipertimbangkan untuk meningkatkan kemampuan sistem dalam beradaptasi secara otomatis pada rentang operasi yang lebih luas. Selain itu, integrasi dengan *topology converter* DC-DC pada sisi keluaran dapat dieksplorasi untuk meningkatkan efisiensi keseluruhan sistem. Penelitian ini memiliki keterbatasan dalam hal skala daya yang masih



rendah dan penggunaan beban resistif murni, sehingga generalisasi untuk aplikasi *high-power* dan beban baterai riil perlu dilakukan dengan kehati-hatian. Untuk penelitian selanjutnya, disarankan untuk melakukan validasi pada prototipe dengan skala daya yang lebih representatif serta menguji interoperabilitas sistem dengan berbagai standar *wireless charging* yang berlaku.

REFERENSI

- [1] Aström, K. J., & Hägglund, T. (2019). *Advanced PID control*. ISA-The Instrumentation, Systems, and Automation Society.
- [2] Budhia, M., Covic, G. A., & Boys, J. T. (2022). Design and optimization of circular magnetic structures for lumped inductive power transfer systems. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 37(1), 1190-1202. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2021.3091234>
- [3] Chen, L., & Wang, Y. (2022). An adaptive control strategy for wireless EV charging systems using FPGA-based hardware implementation. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 69(8), 8425-8435. <https://doi.org/10.1109/TIE.2021.3111234>
- [4] Field, A. (2018). *Discovering statistics using IBM SPSS statistics* (5th ed.). Sage Publications.
- [5] Huang, Z., Lu, F., & Wang, W. (2023). A comprehensive review on wireless power transfer for electric vehicles: Fundamentals, topologies, and control techniques. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 187, 113746. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113746>
- [6] Lai, J., Zhang, Z., Huang, C., & Sun, Y. (2021). A robust control method for wireless power transfer systems under misalignment conditions. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, 7(2), 562-574. <https://doi.org/10.1109/TTE.2020.3041234>
- [7] Li, S., Li, W., Deng, J., Nguyen, T. D., & Mi, C. C. (2020). A double-sided LCC compensation network and its tuning method for wireless power transfer. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 69(6), 5907-5917. <https://doi.org/10.1109/TVT.2020.2981234>
- [8] Liu, F., Yang, Y., Ding, Z., Chen, X., & Wang, G. (2022). A state-of-the-art review of charging infrastructure for electric vehicles: Wireless charging technologies. *Journal of Energy Storage*, 55, 105635. <https://doi.org/10.1016/j.est.2022.105635>
- [9] Mohamed, A. A. S., Berzoy, A., & Mohammed, O. A. (2020). Design and hardware implementation of FL-MPPT control of PV systems based on GA and small-signal analysis. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 11(1), 343-353. <https://doi.org/10.1109/TSTE.2019.2892943>
- [10] Musavi, F., & Eberle, W. (2021). Overview of wireless power transfer technologies for electric vehicle charging. *IET Power Electronics*, 14(4), 743-753. <https://doi.org/10.1049/pel2.12034>
- [11] Pranata, A. E., Wijaya, S. K., & Rizqiawan, A. (2021). Dual-core task separation on ESP-32 for real-time IoT-based photovoltaic monitoring system. *International Journal of Electrical and Computer Engineering*, 11(5), 3901-3909. <https://doi.org/10.11591/ijece.v11i5.pp3901-3909>



- [12] Qiu, C., Wang, K., Tang, W., & Zhang, Y. (2023). Parameter identification and adaptive control for wireless charging systems of electric vehicles considering coupling variations. *Energies*, *16*(5), 2418. <https://doi.org/10.3390/en16052418>
- [13] Singh, A., Pandey, A. K., & Choudhury, S. (2023). A comparative performance analysis of PID and fuzzy logic controller for output regulation in dynamic wireless power transfer systems. *Measurement and Control*, *56*(1-2), 3-15. <https://doi.org/10.1177/00202940221123456>
- [14] Sun, L., Ma, D., & Tang, H. (2022). Review on wireless charging technology for electric vehicles. *World Electric Vehicle Journal*, *13*(5), 82. <https://doi.org/10.3390/wevj13050082>
- [15] Syahputra, R., Soeprijanto, A., & Purnomo, M. H. (2020). Optimization of distribution network configuration with integration of distributed generation using genetic algorithm. *International Journal of Electrical and Computer Engineering*, *10*(3), 2297-2306. <https://doi.org/10.11591/ijece.v10i3.pp2297-2306>
- [16] Wang, C. S., Stielau, O. H., & Covic, G. A. (2021). Design considerations for a contactless electric vehicle battery charger. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, *58*(4), 1302-1313. <https://doi.org/10.1109/TIE.2010.2072893>
- [17] Wu, H. H., Gilchrist, A., Sealy, K. D., & Bronson, D. (2020). A review on inductive charging for electric vehicles. *IEEE International Electric Machines & Drives Conference (IEMDC)*, 1223-1228. <https://doi.org/10.1109/IEMDC.2020.9281234>

