

ANALISIS KINERJA PENALAAN PID ZIEGLER-NICHOLS UNTUK PENGENDALIAN KECEPATAN MOTOR INDUKSI PADA PLC MITSUBISHI FX5U

Rizqi Ahmad Fatoni Sya'ban Mubarrok¹, Asep Andang², Imam Taufiqurrahman³
Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Siliwangi Tasikmalaya, Indonesia ^{1,2,3}
Email: 227002040@student.unsil.ac.id

Informasi	Abstract
Volume : 3 Nomor : 10 Bulan : Oktober Tahun : 2026 E-ISSN : 3062-9624	<i>Proportional-Integral-Derivative (PID) control remains the most widely adopted strategy for regulating induction motor speed in industrial automation, yet its fixed gains often struggle with the time delay and non-linear dynamics of variable-frequency-driven drives. This study analyzes the parametric performance of a PID controller tuned using the Ziegler-Nichols step-response method and implemented on a Mitsubishi MELSEC iQ-F FX5U Programmable Logic Controller (PLC) to regulate a three-phase, 1 HP induction motor through an Altivar ATV310HU40N4E Variable Frequency Drive (VFD). Parameters were derived analytically from the open-loop reaction curve ($L = 0.115$ s, $T = 0.997$ s) and then empirically fine-tuned ($K_p = 20$, $T_i = 0.2$ s, $T_d = 0.03$ s) to obtain a stable closed-loop response. The system was tested without load at setpoints of 20–50 Hz and under dynamic loading of 0.5–2 N·m applied through a MCA 13I41 - RS0B0 servo motor. Results show the PID controller reduced rise time relative to the open-loop system at low frequencies but produced overshoot up to 97.0% at low setpoints under heavy load, decreasing almost linearly to near 0% at 50 Hz. The open-loop response was essentially overshoot-free but slower to settle at low frequencies. Both configurations converged to a steady-state error not exceeding 0.1 Hz in every test case. These findings indicate that Ziegler-Nichols tuning derived from a single operating point does not generalize well across the setpoint and load range of a variable-frequency drive, and that gain-scheduled or adaptive tuning is recommended for future implementation.</i> Keyword: PID controller, Ziegler-Nichols tuning, Programmable Logic Controller, Variable Frequency Drive, induction motor speed control

Abstrak

Pengendalian Proporsional-Integral-Derivatif (PID) tetap menjadi strategi yang paling banyak digunakan untuk mengatur kecepatan motor induksi dalam otomasi industri, tetapi penguatannya yang tetap sering kesulitan mengatasi waktu tunda dan dinamika nonlinear pada penggerak berfrekuensi variabel. Penelitian ini menganalisis kinerja parametrik pengendali PID yang ditala dengan metode respons langkah Ziegler-Nichols dan diimplementasikan pada Programmable Logic Controller (PLC) Mitsubishi MELSEC iQ-F FX5U untuk mengatur motor induksi tiga fase 1 HP melalui Variable Frequency Drive (VFD) Altivar ATV310HU40N4E. Parameter diturunkan secara analitis dari kurva reaksi open loop ($L = 0,115$ s; $T = 0,997$ s), kemudian disempurnakan secara empiris ($K_p = 20$; $T_i = 0,2$ s; $T_d = 0,03$ s) untuk memperoleh respons closed loop yang stabil. Sistem diuji tanpa beban pada setpoint 20–50 Hz dan di bawah pembebanan dinamis 0,5–2 N·m yang diberikan melalui motor servo MCA 13I41 - RS0B0. Hasil penelitian menunjukkan bahwa pengendali PID mempercepat waktu naik dibandingkan dengan sistem open loop pada frekuensi rendah, tetapi menghasilkan overshoot hingga 97,0% pada setpoint rendah di bawah beban berat, yang menurun hampir linear hingga mendekati 0% pada 50 Hz. Respons open loop pada dasarnya bebas overshoot, tetapi memiliki waktu naik yang lebih lama pada frekuensi rendah.

Kedua konfigurasi menghasilkan galat keadaan tunak yang tidak melebihi 0,1 Hz pada setiap kasus pengujian. Temuan ini menunjukkan bahwa penalaan Ziegler–Nichols yang diturunkan dari satu titik operasi tidak dapat digeneralisasi dengan baik pada rentang setpoint dan beban penggerak berfrekuensi variabel, sehingga penjadwalan penguatan (gain scheduling) atau penalaan adaptif direkomendasikan untuk implementasi selanjutnya.

Kata Kunci : *Pengendali PID, penalaan Ziegler–Nichols, Programmable Logic Controller, Variable Frequency Drive, pengendalian kecepatan motor induksi*

A. PENDAHULUAN

Revolusi industri keempat telah mempercepat penerapan sistem kendali otomatis di sektor manufaktur, pertanian, dan transportasi sehingga meningkatkan efisiensi operasional sekaligus mengurangi kesalahan manusia yang melekat pada proses manual (Anaam dkk., 2022 ; Permana dkk., 2025) . Sistem otomatis juga memungkinkan pemantauan waktu nyata yang berkelanjutan, yang mendukung pengambilan keputusan operasional yang lebih cepat dan akurat serta menghasilkan ekosistem industri yang lebih kompetitif dan adaptif (Permana dkk., 2025; Volta dkk., 2025). Dalam konteks ini, motor induksi tiga fase tetap menjadi penggerak utama karena konstruksinya yang kokoh, biaya perawatannya yang rendah, dan karakteristik torsi–kecepatannya yang menguntungkan. Oleh karena itu, pengaturan kecepatan mesin-mesin tersebut secara presisi merupakan kebutuhan yang terus muncul di rantai pabrik (Karupusamy dkk., 2023; Maghfiroh dkk., 2023; Prasetya & Ramadani, 2024).

Di antara strategi kendali umpan balik, pengendali Proporsional-Integral-Derivatif (PID) tetap menjadi yang paling banyak digunakan di industri karena strukturnya sederhana, kestabilannya memadai, dan mudah diimplementasikan. Kajian terbaru memperkirakan bahwa struktur PID (atau PI) mencakup lebih dari 90% kalang kendali industri dan terus menjadi acuan untuk membandingkan skema yang lebih canggih (Hägglund & Guzmán, 2024). Daya tarik pengendali PID terletak pada strukturnya yang sederhana, kestabilannya yang memadai, dan kemudahan implementasinya pada perangkat keras industri seperti *programmable logic controller* (PLC) (Hägglund & Guzmán, 2024; Saputra dkk., 2023). Namun, seiring dengan semakin kompleksnya sistem kendali industri, pengendali PID konvensional semakin kesulitan menghadapi waktu tunda dan sensitivitas terhadap gangguan yang timbul dari komunikasi, transportasi, dan efek inersia (Hu, 2025) . Waktu tunda semacam itu dapat mendorong respons *closed loop* ke arah osilasi atau ketidakstabilan apabila penguatan pengendali tidak dikalibrasi secara tepat, dan struktur PID klasik juga terbatas dalam mengompensasi dinamika nonlinear yang muncul akibat gangguan eksternal yang berfluktuasi (Díaz-Rodríguez dkk., 2017; Nosheen dkk., 2023),

Metode Ziegler–Nichols (Z–N) merupakan salah satu acuan penalaan yang paling umum untuk sistem semacam itu karena hanya memerlukan uji langkah *open loop* yang sederhana atau percobaan sensitivitas batas *closed loop* (Harahap dkk., 2025; Yefriani & Risfendra, 2023). Meskipun demikian, memperoleh margin penguatan dan margin fase yang tepat tetap sulit dilakukan pada sistem yang nonlinear, yang biasanya tampak sebagai *overshoot* berlebihan atau waktu naik yang tidak sesuai (Heryadi dkk., 2025; Hu, 2025). Eksperimen perangkat keras pada *plant* motor induksi membuktikan kecenderungan ini. Parameter Z–N sering menghasilkan kenaikan respons yang cepat dengan *overshoot* pertama yang besar, dan penguatan yang sama jarang tetap optimal ketika *setpoint* atau beban mekanis berubah (Damayanti dkk., 2022; Harahap dkk., 2025; Heryadi dkk., 2025; Rohadi dkk., 2025).

PLC telah mengubah praktik kendali industri karena menawarkan fleksibilitas, keandalan, skalabilitas, dan kemudahan integrasi dibandingkan dengan sistem berbasis relai konvensional, sekaligus cukup tangguh untuk lingkungan industri yang keras (Herdiana dkk., 2024). Pengintegrasian *Variable Frequency Drive* (VFD) dengan pengendali PID berbasis PLC memungkinkan frekuensi acuan, sinyal umpan balik, dan parameter penalaan dikelola pada satu platform terprogram, yang menguntungkan untuk membangun sistem kendali kecepatan *closed loop* bagi motor induksi (Özbay, 2023; Utomo dkk., 2021; Volta dkk., 2025). Mitsubishi MELSEC iQ-F FX5U, khususnya, memiliki kecepatan eksekusi instruksi dasar 34 ns, yang menguntungkan untuk menjalankan algoritme PID dengan cukup cepat sehingga pengaruh waktu tunda pada sistem dinamis dapat diminimalkan (Herdiana dkk., 2024). Apabila arsitektur ini dipadukan dengan antarmuka manusia–mesin (*Human–Machine Interface*, HMI) operator, *setpoint* dan metrik respons dapat dipantau tanpa mengganggu tugas pengendalian (Volta dkk., 2025).

Berdasarkan pertimbangan tersebut, penelitian ini menganalisis kinerja parametrik pengendali PID yang ditala dengan metode respons langkah Ziegler–Nichols dan diimplementasikan pada PLC Mitsubishi FX5U yang dikombinasikan dengan VFD Altivar ATV310HU40N4E untuk mengatur kecepatan motor induksi tiga fase. Secara khusus, artikel ini menganalisis metrik respons transien dan keadaan tunak pada sistem pengendali PID yang diimplementasikan pada perangkat keras FX5U, serta mengevaluasi kemampuan pengendali PID hasil penalaan Ziegler–Nichols dalam mempertahankan kinerja respons waktunya ketika sistem diberi torsi beban mekanis yang bervariasi.

a. Tinjauan Pustaka

Hukum kendali PID yang diimplementasikan pada PLC dinyatakan sebagai

$$u(t) = K \cdot [e(t) + (1/T_i) \cdot \int e(\tau) d\tau + T_d \cdot de(t)/dt] \quad (1)$$

dengan u adalah sinyal kendali, e adalah galat pelacakan, K adalah penguatan proporsional, T_i adalah waktu integral, dan T_d adalah waktu derivatif (Åström & Hägglund, 1995; Saputra dkk., 2023). Suku proporsional bereaksi terhadap galat sesaat, suku integral menghilangkan galat keadaan tunak, dan suku derivatif mengantisipasi kecenderungan galat untuk meningkatkan kestabilan *closed loop* (Hägglund & Guzmán, 2024). Pada perangkat keras PLC, ketiga suku tersebut biasanya didiskretisasi di dalam blok fungsi PID bawaan vendor. Mutu respons *closed loop* kemudian hampir sepenuhnya ditentukan oleh cara ketiga parameter tersebut dipilih (Al-Najari dkk., 2025; Rohadi dkk., 2025; Saputra dkk., 2023).

Ziegler dan Nichols (1942) mengusulkan dua pendekatan klasik untuk menala parameter PID. Metode respons langkah (kurva reaksi) mengidentifikasi titik kemiringan maksimum pada respons langkah satuan *open loop*, menarik garis singgung melalui titik tersebut, dan membaca perpotongan garis singgung dengan sumbu waktu serta dengan tingkat keluaran tunak untuk memperoleh waktu tunda (L) dan konstanta waktu (T) (Harahap dkk., 2025; Yefriani & Risfendra, 2023). Kedua parameter ini kemudian disubstitusikan ke dalam relasi penalaan yang diringkas pada Tabel 1 (Hägglund & Guzmán, 2024).

Tabel 1. Relasi Penalaan Respons Langkah Ziegler–Nichols

Kendali	Kp	Ti	Td
P	T / L	–	–
PI	$0,9 T / L$	$3,33 L$	–
PID	$1,2 T / L$	$2 L$	$L / 2$

PLC adalah pengendali digital berbasis mikroprosesor yang tahan banting, yang menyimpan logika kendali di dalam memori dan mengeksekusi instruksi logika, pewaktuan, penghitungan, serta aritmetika untuk mengoperasikan mesin dan proses (Bolton, 2015; Petruzella, 2023). Dibandingkan dengan penggerak *Variable Voltage Variable Frequency* (VVVF) yang berdiri sendiri, pengintegrasian VFD dengan pengendali PID berbasis PLC memungkinkan frekuensi acuan, sinyal umpan balik, dan parameter penalaan dikelola pada satu platform terprogram, yang menguntungkan untuk membangun sistem kendali kecepatan *closed loop* bagi motor induksi (Barnes, 2003).

Tabel 2 merangkum penelitian terkini tentang pengendalian kecepatan motor induksi berbasis PLC atau VFD. Indra dkk. (2020) mengembangkan modul pembelajaran PLC-PID-SCADA dan memperoleh respons tanpa *overshoot* dengan $K_p = 20$ dan $T_i = 1$ s. Yahya dkk. (2024) menggabungkan penalaan Ziegler–Nichols dengan lapisan *fuzzy* adaptif (AFPID) pada

PLC Omron untuk mempertahankan kecepatan 1400 rpm di bawah gangguan. Al-Najari dkk. (2025) mengusulkan algoritme hibrida PSO–MANFIS untuk menala ulang secara dinamis pengendali PID bawaan PLC melalui server OPC, yang mengungguli penalaan Ziegler–Nichols klasik dalam kecepatan konvergensi dan kestabilan. Haq & Rusimamto (2024) mensimulasikan motor kipas sentrifugal berpengendali PID di MATLAB/Simulink dan, dengan penalaan coba-coba, menurunkan galat keadaan tunak dari 4,7% menjadi 0,67% sambil membatasi *overshoot* sebesar 0,01%. Özbay (2023) melaporkan bahwa konfigurasi PLC-VFD-PID mampu mempertahankan kecepatan motor yang akurat meskipun kondisi operasi berubah-ubah.

Beberapa makalah jurnal tahun 2023–2025 memperkuat gambaran yang sama. Harahap dkk. (2025) menerapkan metode osilasi Ziegler–Nichols pada motor induksi tiga fase dengan pemantauan IoT dan memperoleh waktu naik rata-rata 2,2 s serta *overshoot* hanya 1,06% setelah uji sensitivitas batas, yang menggambarkan bahwa pilihan varian Z–N (osilasi versus kurva reaksi) dan penalaan lanjutan sesudahnya sangat memengaruhi *overshoot*. Yefriani & Risfendra (2023) mengimplementasikan Ziegler–Nichols I pada PLC Siemens S7-300 dan mencatat waktu naik 3 s serta waktu penetapan 7 s tanpa *overshoot* pada 3000 rpm, dengan waktu integral yang relatif panjang ($T_i = 2,667$ s). Heryadi dkk. (2025) menala PID berbasis PLC dengan Ziegler–Nichols pada rig uji roller kereta api berskala dan melaporkan waktu penetapan 12,42 s serta galat keadaan tunak 0,75%, dengan pemulihan yang berhasil setelah gangguan torsi. Rohadi dkk. (2025) memulai dari Ziegler–Nichols pada PLC Omron, kemudian mengaktifkan lapisan penalaan otomatis PID (PIDAT). Skema adaptif tersebut menurunkan galat keadaan tunak saat berbeban hingga di bawah 0,8% dan pulih dari perubahan beban mendadak dalam waktu kurang dari 4 s, yang jelas mengungguli penguatan Z–N yang dibiarkan tetap. Volta dkk. (2025) menunjukkan bahwa penambahan operasi VSD–HMI *closed loop* pada Omron CP1E menurunkan slip rata-rata dari 4,88% (manual) menjadi 2,08% (otomatis).

Tabel 2. Perbandingan Penelitian Terkait Pengendalian Kecepatan Motor Induksi Berbasis PLC/VFD

Studi	PLC / Penggerak	Metode penalaan	Hasil yang dilaporkan
Indra dkk., 2020	PLC–PID–SCADA / VSD	Manual ($K_p = 20$; $T_i = 1$ s)	<i>Overshoot</i> 0%; $t_s = 2,2$ s; tunda 0,1 s
Yahya dkk., 2024	Omron CP1H / VSD	Z–N + <i>fuzzy</i> adaptif (AFPID)	Stabil pada 1400 rpm di bawah gangguan
Al-Najari dkk., 2025	PLC Siemens melalui OPC	PSO–MANFIS (dinamis)	Konvergensi dan kestabilan lebih baik daripada Z–N

Studi	PLC / Penggerak	Metode penalaan	Hasil yang dilaporkan
Özbay, 2023	PLC + VFD	PID berbasis PLC	Kecepatan akurat pada berbagai kondisi operasi
Harahap dkk., 2025	Inverter + IoT (Blynk)	Metode osilasi Z-N	Tr $\approx$ 2,2 s; OS $\approx$ 1,06% saat berbeban
Yefriani & Risfendra, 2023	Siemens S7-300 / HMI	Z-N I (kurva reaksi)	Tanpa <i>overshoot</i> ; Tr = 3 s; ts = 7 s pada 3000 rpm
Heryadi dkk., 2025	PLC + inverter (rig roller)	PID Z-N	ts = 12,42 s; ess = 0,75%; gangguan teredam
Rohadi dkk., 2025	Omron CP1H + inverter	Z-N kemudian penalaan otomatis PID	ess berbeban < 0,8%; pemulihan < 4 s
Volta dkk., 2025	Omron CP1E + VSD + HMI	VSD <i>closed loop</i> (otomatis)	Slip turun dari 4,88% menjadi 2,08%
Prasetya & Ramadani, 2024	VFD + PID	PID eksperimental	Tr = 2,2 s; ts = 2,7 s pada motor induksi 3 fase

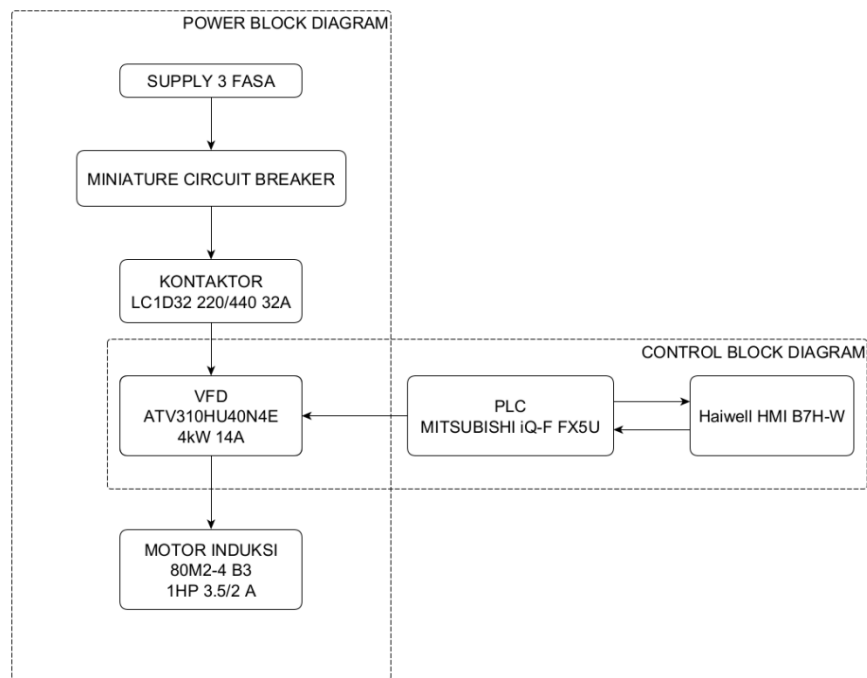
Berbeda dengan penelitian-penelitian tersebut, penelitian ini menerapkan penalaan respons langkah Ziegler–Nichols secara khusus pada PLC Mitsubishi FX5U yang dipasangkan dengan VFD ATV310HU40N4E dan motor induksi 1 HP, serta mengevaluasi lebih lanjut ketahanan pengendali hasil penalaan di bawah pembebanan mekanis dinamis pada seluruh rentang operasi 20–50 Hz, suatu kombinasi dan analisis ketahanan terhadap beban yang tidak dilaporkan pada penelitian-penelitian di atas.

B. METODE PENELITIAN

Penelitian ini berlangsung melalui lima tahap, yakni kajian pustaka, perancangan sistem, pengujian unit, pengujian sistem terintegrasi, dan analisis data. Pengujian unit memverifikasi bahwa setiap komponen perangkat keras berfungsi dengan benar sebelum dilanjutkan ke pengujian terintegrasi, yang dilakukan tanpa beban mekanis kemudian dengan beban dinamis, dan hasilnya selanjutnya dianalisis untuk menarik kesimpulan.

b. Perancangan Perangkat Keras dan Instrumentasi

Plant terdiri atas motor induksi tiga fase 1 HP yang digerakkan oleh VFD Altivar ATV310HU40N4E dan dikendalikan oleh PLC Mitsubishi MELSEC iQ-F FX5U, yang juga berkomunikasi dengan HMI Haiwell B7H-W. Daya disuplai melalui MCB tiga fase dan kontaktor magnetik LC1D32. Gambar 1 menunjukkan diagram blok perangkat keras yang dihasilkan.



Gambar 1. Diagram blok perangkat keras sistem kendali PLC-VFD-motor

Pengendali PID dirancang menggunakan metode kurva reaksi Ziegler–Nichols pada konfigurasi *open loop*. Sistem dijalankan dalam *open loop*, *input* diberikan pada frekuensi acuan, dan respons variabel proses yang dihasilkan direkam untuk memperoleh kurva reaksi berbentuk S. Garis singgung ditarik pada titik dengan kemiringan terbesar pada kurva ini untuk mengidentifikasi waktu tunda (L) dan konstanta waktu (T), yang kemudian disubstitusikan ke dalam relasi Ziegler–Nichols untuk memperoleh nilai awal Kp, Ti, dan Td. Parameter hasil penurunan analitis ini selanjutnya dimasukkan ke blok fungsi PID pada PLC.

c. Prosedur Pengujian Unit dan Sistem

Sebelum pengujian tingkat sistem, setiap unit perangkat keras diverifikasi fungsinya, terminal daya dan status siap VFD, putaran motor induksi pada uji langsung (*direct-on-line*) tanpa beban, kemampuan HMI mengunduh antarmukanya serta membaca dan menulis alamat memori PLC dengan benar melalui Ethernet, dan kemampuan PLC mengompilasi serta mengunduh program diagram tangga (*ladder logic*) tanpa galat.

Pengujian sistem tanpa beban dilakukan pada tujuh *setpoint* (20, 25, 30, 35, 40, 45, dan 50 Hz), masing-masing dievaluasi dalam mode *open loop* (Non-PID) kemudian dengan pengendali PID hasil penalaan diaktifkan, untuk memperoleh waktu naik (*rise time*, Tr), waktu penetapan (*settling time*, Ts), persentase *overshoot* (%OS), dan galat keadaan tunak (ess) dari respons frekuensi aktual. Pengujian sistem di bawah beban dinamis mengulangi urutan *setpoint* yang sama sementara motor servo MCA 13I41 - RS0B0 memberikan torsi pengereman

mekanis sebesar 0,5; 1; 1,5; dan 2 N·m pada poros motor untuk mengevaluasi ketahanan pengendali hasil penalaan terhadap gangguan beban.

Hubungan frekuensi–kecepatan diperiksa kelinearannya melalui regresi linear kuadrat terkecil untuk memastikan bahwa *setpoint* dan sinyal umpan balik dalam domain frekuensi secara sah merepresentasikan kecepatan putar motor pada seluruh rentang yang diuji. Metrik transien dan keadaan tunak yang diperoleh dari konfigurasi PID dan Non-PID kemudian dibandingkan secara deskriptif dan grafis pada berbagai *setpoint* dan tingkat beban untuk menggambarkan rentang kinerja pengendali hasil penalaan.

C. HASIL DAN PEMBAHASAN

a. Uji Fungsional Unit

Setiap unit perangkat keras diverifikasi sebelum diintegrasikan. VFD menyala dan mencapai status siap segera setelah terminal daya dialiri listrik, motor induksi berputar terus-menerus tanpa gangguan pada uji langsung, HMI berhasil mengunduh antarmukanya dan setiap alamat memori yang diperiksa (tombol tekan, lampu status, serta register *setpoint* dan umpan balik) terbaca dan tertulis dengan benar terhadap PLC melalui Ethernet, dan PLC mengompilasi serta mengunduh program diagram tangga tanpa galat dan masuk ke mode RUN tanpa kegagalan CPU. Tabel 4 merangkum hasil tersebut, yang menegaskan bahwa semua unit layak untuk pengujian tingkat sistem selanjutnya.

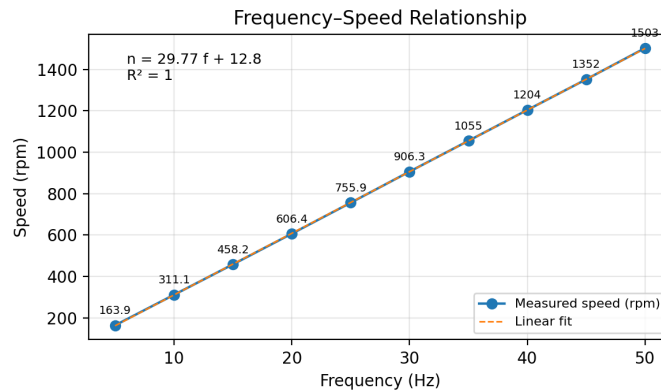
Tabel 4. Ringkasan Uji Fungsional Unit

Unit	Fungsi yang diverifikasi	Hasil
VFD (ATV310HU40N4E)	Terminal daya, pengaktifan, tampilan, status siap	Sesuai
Motor induksi	Terminal daya, pengaktifan, putaran kontinu, tanpa gangguan	Sesuai
HMI (Haiwell B7H-W)	Pengunduhan antarmuka, 12 alamat tombol tekan/lampu/ <i>setpoint</i> /umpan balik	Sesuai
PLC (Mitsubishi FX5U)	Kompilasi, pengunduhan, konektivitas, mode RUN, 12 alamat logika	Sesuai
VFD (ATV310HU40N4E)	Terminal daya, pengaktifan, tampilan, status siap	Sesuai

b. Kelinearan Frekuensi–Kecepatan

Karena PLC mengendalikan dan membaca balik frekuensi, sedangkan besaran fisik yang menjadi perhatian adalah kecepatan putar, hubungan frekuensi–kecepatan diverifikasi sebelum menganalisis pengujian respons. Frekuensi keluaran VFD dinaikkan dari 5 hingga 50

Hz dengan kenaikan 5 Hz tanpa beban, dan kecepatan motor yang dihasilkan dicatat pada setiap langkah (Gambar 3).



Gambar 3. Hubungan antara frekuensi keluaran VFD dan kecepatan motor terukur

Dari Gambar 3, diperoleh persamaan berikut:

$$n = 29,77f + 12,8 \quad (2)$$

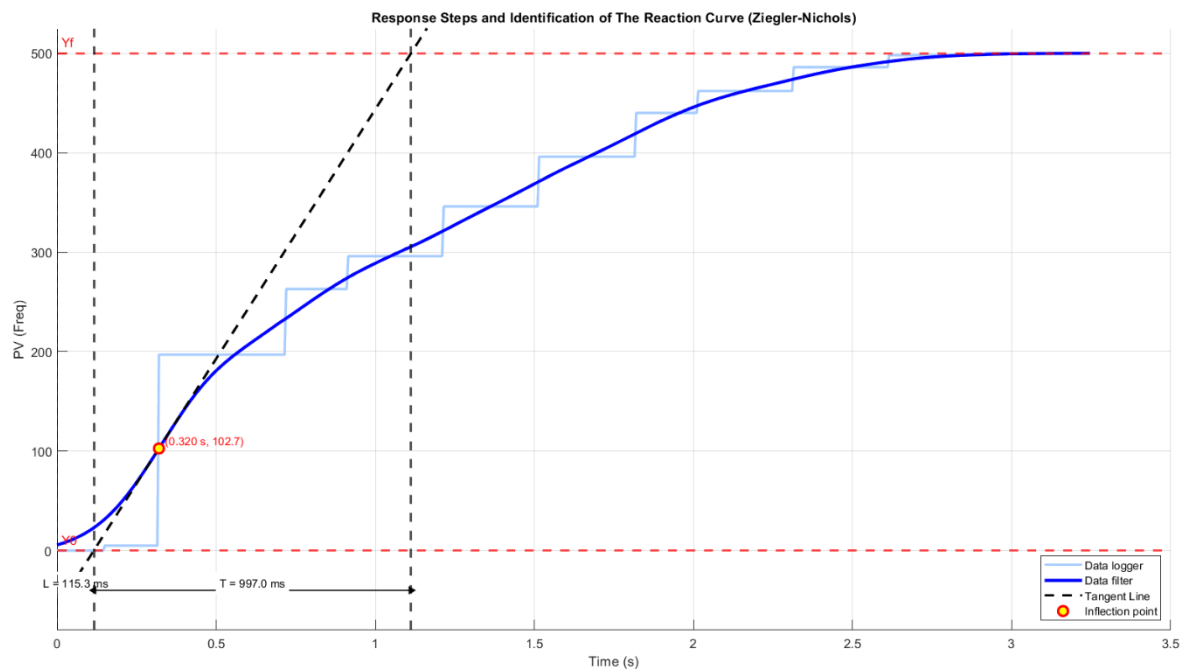
dengan n adalah kecepatan motor (rpm) dan f adalah frekuensi (Hz). Regresi kuadrat terkecil terhadap data terukur menghasilkan Persamaan (2) dengan koefisien determinasi $R^2 = 1$ dan galat akar rata-rata kuadrat sebesar 1,21 rpm, dengan deviasi terbesar antara titik terukur dan garis regresi adalah 2,23 rpm. Kemiringan regresi sebesar 29,77 rpm/Hz sangat mendekati sensitivitas kecepatan sinkron teoretis untuk motor empat kutub,

$$ns = 120f/P \quad (3)$$

yang bernilai 30 rpm/Hz (ns adalah kecepatan sinkron dan P adalah jumlah kutub). Deviasi antara kecepatan sinkron terukur dan teoretis menurun dari 13,9 rpm pada 5 Hz menjadi 3,0 rpm pada 50 Hz, kemungkinan karena resolusi alat ukur berpengaruh secara proporsional lebih besar pada kecepatan rendah. Hasil ini menegaskan bahwa hubungan frekuensi-kecepatan bersifat linear pada rentang 5–50 Hz, sehingga *setpoint* dan sinyal umpan balik berbasis frekuensi secara sah merepresentasikan pengendalian kecepatan motor pada pengujian berikutnya.

c. Identifikasi *Open loop* dan Penalaan PID

Uji langkah satuan *open loop* diterapkan untuk memperoleh kurva reaksi yang ditunjukkan pada Gambar 4, dari kurva tersebut diperoleh waktu tunda $L = 0,1153$ s dan konstanta waktu $T = 0,9970$ s pada titik kemiringan maksimum.



Gambar 4. Kurva reaksi respons langkah *open loop* yang digunakan untuk identifikasi parameter Ziegler–Nichols

Substitusi L dan T ke dalam relasi pada Tabel 1 menghasilkan parameter Ziegler–Nichols hasil perhitungan yang tercantum pada Tabel 5. Penerapan langsung parameter PID hasil perhitungan ($K_p = 10,37$; $T_i = 0,23$ s; $T_d = 0,057$ s) menghasilkan respons *closed loop* yang tidak stabil, yang sejalan dengan kecenderungan metode Ziegler–Nichols yang dikenal condong pada waktu naik yang agresif. Metode ini biasanya menghasilkan penguatan proporsional yang tinggi disertai waktu integral yang sangat singkat. Oleh karena itu, pengendali disempurnakan secara empiris—dengan menurunkan K_p dan memperpanjang T_i untuk meredam osilasi—guna memperoleh parameter operasi akhir yang stabil ($K_p = 20$; $T_i = 0,2$ s; $T_d = 0,03$ s) yang digunakan pada setiap pengujian sistem yang dilaporkan di bawah.

Tabel 5. Parameter PID Hasil Perhitungan Ziegler–Nichols dan Parameter Akhir Hasil Penalaan Lanjutan

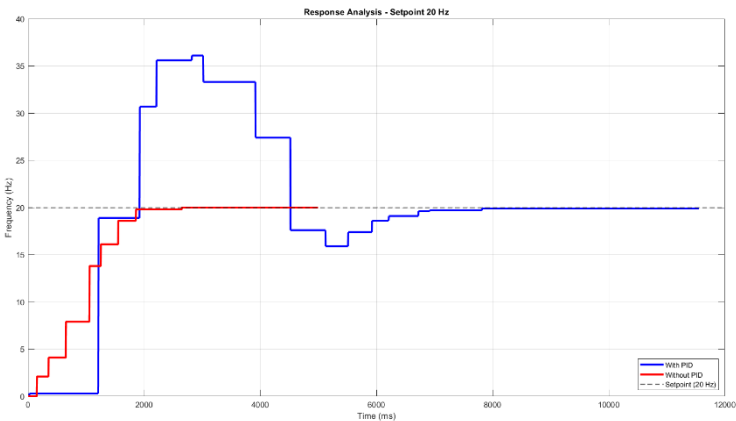
Pengendali	K_p	T_i	T_d
P	8,647	–	–
PI	7,782	0,38	–
PID	10,37	0,23	0,057
PID (penalaan lanjutan)	20	0,2	0,03

d. Respons Sistem tanpa Beban

Tabel 6 membandingkan respons tanpa beban pada sistem *open loop* (Non-PID) dan sistem berpengendali PID pada ketujuh *setpoint* uji, dan Gambar 5 menunjukkan pasangan respons representatif pada 20 Hz.

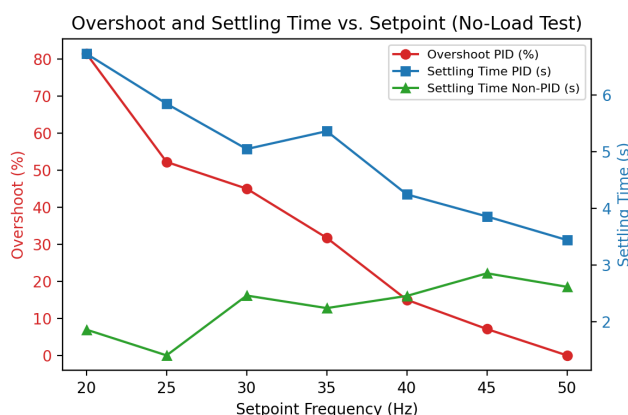
Tabel 6. Perbandingan Respons Tanpa Beban, Non-PID vs. PID

SP (Hz)	Tr (s)	Tr (s)	Ts (s)	Ts (s)	%OS	ess (Hz)
	Non-PID	PID	Non-PID	PID	PID	PID
20	1,399	0,004	1,86	6,725	81,407	0,1
25	1,251	1,404	1,406	5,844	52,209	0,1
30	1,704	1,889	2,461	5,045	45,00	0
35	1,484	1,799	2,24	5,360	31,714	0
40	1,901	2,199	2,455	4,245	15,000	0,1
45	2,593	2,205	2,854	3,856	7,111	0
50	1,696	2,401	2,615	3,440	0,000	0



Gambar 5. Respons frekuensi representatif tanpa beban, PID vs. *open loop*, *setpoint* 20 Hz

Pada *setpoint* rendah, pengendali PID mencapai acuan jauh lebih cepat daripada sistem *open loop* ($Tr = 0,004$ s dibandingkan dengan 1,399 s pada 20 Hz), tetapi menghasilkan *overshoot* yang cukup besar, hingga 81,4% pada 20 Hz, yang menurun hampir monoton seiring naiknya *setpoint* dan mencapai 0,0% pada 50 Hz. Sebaliknya, sistem *open loop* tidak pernah mengalami *overshoot* pada *setpoint* mana pun. Akibat osilasi transien ini, waktu penetapan pengendali PID (3,44–6,73 s) melebihi waktu penetapan sistem *open loop* (1,41–2,85 s) pada setiap *setpoint*. Meskipun demikian, kedua konfigurasi konvergen ke galat keadaan tunak paling besar 0,1 Hz, yang menunjukkan bahwa ketelitian keadaan tunak tetap terjaga terlepas dari perbedaan transien yang mencolok.



Gambar 6. Tren overshoot dan waktu penetapan terhadap setpoint, pengujian tanpa beban

Gambar 6 menegaskan bahwa *overshoot* PID turun hampir secara linear seiring naiknya *setpoint*. Penjelasan yang masuk akal adalah bahwa kurva reaksi Ziegler–Nichols diidentifikasi dari satu percobaan respons langkah, sehingga penguatan tetap yang dihasilkan disesuaikan dengan dinamika lokal *plant* pada satu kondisi operasi tertentu, karena *plant* motor induksi-VFD tidak sepenuhnya linear pada seluruh rentang kecepatannya, penguatan tetap yang sama menjadi relatif lebih agresif, dan karena itu menghasilkan *overshoot* lebih besar pada *setpoint* yang semakin jauh dari titik tempat kurva reaksi direkam. Perilaku ini sejalan dengan keterbatasan umum penalaan PID satu titik operasi yang dibahas oleh Hu (2025) dan Díaz-Rodríguez dkk. (2017).

e. Respons Sistem di Bawah Beban Dinamis

Pengendali hasil penalaan kemudian diuji pada masing-masing dari tujuh *setpoint* sementara rem servo memberikan torsi beban sebesar 0,5; 1; 1,5; dan 2 N·m pada poros motor. Karena penyajian data lengkap $Tr/Ts/\%OS/ess$ untuk seluruh 28 kombinasi *setpoint*–torsi pada kedua konfigurasi memerlukan tabel yang terlalu besar, Tabel 7 dan Tabel 8 merangkum hasil *overshoot* dan waktu penetapan PID sebagai matriks *setpoint*×torsi, pada setiap dari 28 titik uji berbeban, seperti pada pengujian tanpa beban, sistem *open loop* menunjukkan *overshoot* 0% dan kedua konfigurasi menjaga galat keadaan tunak sebesar 0,1 Hz atau kurang.

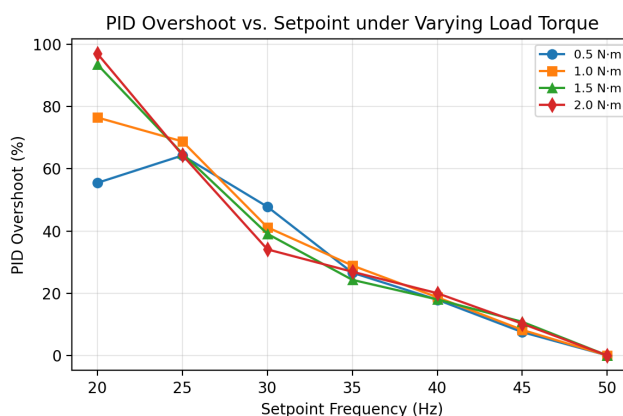
Tabel 7. Overshoot (%OS) PID di Bawah Beban Dinamis menurut Torsi dan Setpoint

Torsi (N·m)	20 Hz	25 Hz	30 Hz	35 Hz	40 Hz	45 Hz	50 Hz
0,5	55,5	64,3	47,8	26,6	17,9	7,5	0,0
1,0	76,5	68,8	41,2	28,9	18,7	8,2	0,0
1,5	93,5	64,9	39,1	24,3	18,0	10,8	0,0
2,0	97,0	64,4	34,1	26,9	20,0	10,2	0,0

Tabel 8. Waktu Penetapan (T_s , Detik) PID di Bawah Beban Dinamis menurut Torsi dan Setpoint

Torsi (N·m)	20 Hz	25 Hz	30 Hz	35 Hz	40 Hz	45 Hz	50 Hz
0,5	6,645	6,256	7,050	6,045	5,345	2,656	4,950
1,0	5,055	7,751	5,550	6,854	6,445	3,705	4,445
1,5	4,050	6,154	5,379	5,344	6,854	3,855	3,050
2,0	4,055	4,155	5,511	8,156	6,049	3,749	3,029

Seperti pada kondisi tanpa beban, *overshoot* PID di bawah beban dinamis lebih ditentukan oleh frekuensi *setpoint* daripada oleh torsi beban, dimana pada 50 Hz, *overshoot* tetap 0,0% berapa pun torsinya, sedangkan pada 20 Hz nilainya berkisar dari 55,5% pada 0,5 N·m hingga 97,0% pada 2 N·m. Pada *setpoint* rendah, torsi beban yang lebih berat berkaitan dengan *overshoot* yang lebih tinggi, kemungkinan karena inersia dan gesekan tambahan memperlambat respons awal motor, yang kemudian dikoreksi secara berlebihan oleh penguatan PID tetap yang relatif agresif (Gambar 7). Waktu penetapan kurang monoton (berkisar 3,0–8,2 s untuk PID pada seluruh kondisi berbeban), yang mencerminkan interaksi nonlinear antara gesekan mekanis unit pembebanan dan penguatan pengendali yang tetap, dengan waktu penetapan sistem *open loop* tetap konsisten lebih rendah dan lebih mudah diprediksi pada setiap pengujian berbeban, dengan konsekuensi waktu naik yang bertambah seiring beban. Bersama-sama dengan hasil tanpa beban, temuan ini menunjukkan bahwa pengendali PID hasil penalaan lanjutan menukar waktu naik yang lebih cepat dengan *overshoot* yang lebih tinggi dan bergantung pada beban serta *setpoint*, sementara kedua konfigurasi secara andal konvergen ke galat keadaan tunak 0,1 Hz atau lebih baik.



Gambar 7. Overshoot PID terhadap frekuensi *setpoint* pada variasi torsi beban

f. Pembahasan

Penguatan proporsional hasil penalaan lanjutan yang digunakan dalam penelitian ini ($K_p = 20$) secara numerik identik dengan yang dilaporkan oleh Indra dkk. (2020) untuk respons tanpa *overshoot*, tetapi sistem pada penelitian ini masih menunjukkan *overshoot* yang besar pada frekuensi rendah. Perbedaan utamanya terletak pada waktu integral. Indra dkk. (2020) menggunakan $T_i = 1$ s, lima kali lebih panjang daripada $T_i = 0,2$ s yang digunakan di sini, yang menyiratkan bahwa waktu integral merupakan faktor dominan yang menentukan besarnya *overshoot* pada kelas sistem ini, suatu wawasan yang dapat memandu penalaan perangkat keras ini di masa depan. Pembacaan yang sama didukung oleh Yefriani & Risfendra (2023), yang memperoleh respons PLC-PID tanpa *overshoot* dengan $T_i = 2,667$ s, dan oleh Harahap dkk. (2025), yang dengan menggunakan bentuk osilasi Ziegler–Nichols alih-alih bentuk kurva reaksi hanya melaporkan *overshoot* 1,06% pada motor induksi tiga fase. Dengan kata lain, *overshoot* frekuensi rendah yang besar yang terukur di sini bukan sifat bawaan pengendalian PID pada PLC, melainkan sifat dari waktu integral yang singkat yang diwarisi dari aturan PID Z–N klasik ($T_i = 2L$) setelah koreksi empiris yang hanya sedikit.

Sejalan dengan Yahya dkk. (2024) dan Al-Najari dkk. (2025), hasil penelitian ini memperkuat bahwa pengendali Ziegler–Nichols berpenguatan tetap tidak tangguh pada rentang operasi yang lebar atau di bawah beban yang bervariasi, dan bahwa pelengkapan dengan logika *fuzzy* atau skema penalaan ulang metaheuristik (PSO–MANFIS) kemungkinan besar akan menekan *overshoot* frekuensi rendah yang teramati di sini sambil mempertahankan keunggulan waktu naik yang cepat. Rohadi dkk. (2025) memberikan analogi perangkat keras yang sangat dekat, dimulai dari Z–N pada PLC Omron dan mengaktifkan penalaan otomatis PID setiap kali galat melebihi 5%, galat keadaan tunak berbeban turun di bawah 0,8% dan sistem pulih dari perubahan beban mendadak dalam waktu kurang dari 4 s. Maghfiroh dkk. (2023) juga menunjukkan bahwa membuat penguatan PI bersifat *fuzzy*-adaptif memangkas IAE pelacakan hampir setengahnya dibandingkan dengan PI yang dibekukan. Elhawati & Altinkaya (2025), yang membandingkan PID berbasis PLC sebagai acuan dengan PID PSO-*fuzzy* pada set motor-generator fisik, juga menemukan bahwa hukum adaptif lebih unggul di bawah gangguan.

D. KESIMPULAN

Penelitian ini menganalisis kinerja parametrik pengendali PID yang ditala melalui metode respons langkah Ziegler–Nichols dan diimplementasikan pada PLC Mitsubishi FX5U untuk mengatur kecepatan motor induksi tiga fase 1 HP melalui VFD ATV310HU40N4E. Dua temuan

secara langsung menjawab tujuan penelitian. Pertama, pada perangkat keras PLC fisik, pengendali PID hasil penalaan lanjutan ($K_p = 20$; $T_i = 0,2$ s; $T_d = 0,03$ s) mencapai waktu naik yang jauh lebih cepat daripada konfigurasi *open loop* pada *setpoint* rendah (misalnya 0,004 s dibandingkan dengan 1,399 s pada 20 Hz), tetapi menimbulkan *overshoot* hingga 81,4% tanpa beban, yang menurun hampir linear terhadap frekuensi *setpoint* dan menghilang pada 50 Hz. Akibatnya, waktu penetapannya (3,44–6,73 s) melebihi waktu penetapan sistem *open loop* (1,41–2,85 s) pada setiap pengujian tanpa beban. Kedua, di bawah pembebanan mekanis dinamis 0,5–2 N·m, penalaan yang sama menghasilkan *overshoot* setinggi 97,0% pada *setpoint* rendah, yang meningkat seiring torsi beban pada frekuensi tertentu tetapi kembali menghilang di dekat ujung atas rentang operasi (45–50 Hz) berapa pun bebannya. Meskipun demikian, galat keadaan tunak pada konfigurasi PID maupun *open loop* tetap berada dalam 0,1 Hz pada seluruh kondisi pengujian tanpa beban dan berbeban, yang menunjukkan bahwa ketelitian keadaan tunak tetap terjaga bahkan ketika kinerja transien menurun.

Hasil-hasil ini menegaskan bahwa pengendali Ziegler–Nichols yang ditala dari satu titik operasi *open loop* tidak dapat digeneralisasi dengan baik pada rentang *setpoint* yang lebar dan kondisi beban yang lazim pada motor induksi berpenggerak frekuensi variabel. Penelitian selanjutnya perlu mengeksplorasi pendekatan penjadwalan penguatan (*gain scheduling*), PID-fuzzy adaptif, atau penalaan ulang metaheuristik untuk menekan *overshoot* frekuensi rendah yang teramati di sini sambil mempertahankan keunggulan waktu naik cepat yang diberikan pengendalian PID pada platform perangkat keras ini.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Universitas Siliwangi atas fasilitas dan sumber daya yang diperlukan untuk melaksanakan penelitian ini. Ucapan terima kasih khusus disampaikan kepada Departemen Teknik Elektro atas dukungan teknis dan bimbingan selama pelaksanaan proyek ini.

Penulis juga menghargai masukan dan wawasan berharga dari rekan sejawat dan para penelaah, yang telah berkontribusi besar dalam meningkatkan mutu karya ini. Terakhir, penghargaan yang tulus disampaikan kepada semua pihak yang telah mendukung penelitian ini, baik secara langsung maupun tidak langsung.

E. DAFTAR PUSTAKA

Ahmed, A. H., Yahya, A. S., & Ali, A. J. (2024). Speed Control for Linear Induction Motor Based on Intelligent PI-Fuzzy Logic. *Journal of Robotics and Control (JRC)*, 5(5), 1470–1478.

- Al-Najari, B., Hen, C. K., Siaw Paw, J. K., & Marhoon, A. F. (2025). Dynamic Tuning of PLC-Based Built-In PID Controller Using PSO-MANFIS Hybrid Algorithm via OPC Server. *Automation*, 6(4), 83.
- Anaam, I. K., Hidayat, T., Pranata, R. Y., Abdillah, H., & Putra, A. Y. W. (2022). Pengaruh Trend Otomasi dalam Dunia Manufaktur dan Industri. *Vocational Education National Seminar (VENS)*, 1(1), 46–50.
- Åström, K. J. ., & Häggglund, Tore. (1995). *PID Controllers* (2 ed.). International Society for Measurement and Control.
- Barnes, Malcolm. (2003). *Practical Variable Speed Drives and Power Electronics* (1 ed.). Newnes.
- Bolton, William. (2015). *Programmable Logic Controllers*. Elsevier Science.
- Can, E. (2024). Torques and The Speed Vibrations Reducing and Optimization of Asynchronous Motor with ECCA-PID Controlling in Power System. *Sādhanā*, 49(2), 126. <https://doi.org/10.1007/s12046-024-02491-2>
- Damayanti, R., Syawaludin, B., & Gunawan, H. A. (2022). Design of PI and PID Control System for Induction Motor Control on Gamma Irradiator Characterization Prototype Using A Modified Ziegler-Nichols Method. *Journal of Electrical Technology UMY*, 6(2), 94–102.
- Díaz-Rodríguez, I. D., Han, S., Keel, L. H., & Bhattacharyya, S. P. (2017). Advanced Tuning for Ziegler-Nichols Plants. *IFAC-PapersOnLine*, 50(1), 1805–1810. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2017.08.168>
- Ekim, C. A., Onyema, A., Ubom, E., Ukommi, U., Obichere, J., & Kenekchukwu, J.-U. (2024). Design and Modeling of A Proportional Derivative Controller for A Three-Phase Induction Motor Speed. *Nigerian Journal of Technology*, 43(2).
- Elhawat, M., & Altinkaya, H. (2025). Frequency Regulation of Stand-Alone Synchronous Generator via Induction Motor Speed Control Using a PSO-Fuzzy PID Controller. *Applied Sciences*, 15(7), 3634. <https://doi.org/10.3390/app15073634>
- Häggglund, T., & Guzmán, J. L. (2024). Give us PID Controllers and We Can Control the World. *IFAC-PapersOnLine*, 58(7), 103–108. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2024.08.018>
- Haq, A. A., & Rusimamto, P. W. (2024). Simulasi Pengendalian Motor 3 Fasa Pada Kipas Sentrifugal Menggunakan Kontrol PID. *JURNAL TEKNIK ELEKTRO*, 14(1), 23–33. <https://doi.org/10.26740/jte.v14n1.p23-33>
- Harahap, C. R., Setyawan, F. X. A., & Salsabila, C. A. (2025). IOT Based Induction Motor PID Speed Control System Using Ziegler–Nichols Method. *Journal of Engineering Science and*

Technology, 20(4), 1069–1088.

- Herdiana, B., Setiawan, E. B., & Sartoyo, U. (2024). Tinjauan Komprehensif Evolusi, Aplikasi, dan Tren Masa Depan Programmable Logic Controllers (A Comprehensive Review of the Evolution, Applications, and Future Trends of Programmable Logic Controllers). *Telekontran : Jurnal Ilmiah Telekomunikasi, Kendali dan Elektronika Terapan*, 11(2), 173–193. <https://doi.org/10.34010/telekontran.v11i2.12896>
- Heryadi, B., Afrianto, A., Dewi, D. K., Wiranata, T., Rahman, H. A., Nurprasetyo, I. P., & Abidin, Z. (2025). Experimental Investigation of PID Control Strategy for Three-Phase Induction Motor Speed Control System Implemented on A Scaled Railway Vehicle Roller Test Rig Driver. *International Journal of Sustainable Transportation Technology*, 7(1), 1–6.
- Hu, N. (2025). The Limitations of Traditional PID Controllers and Modern Optimization Methods. *Applied and Computational Engineering*, 147(1), 238–244. <https://doi.org/10.54254/2755-2721/2025.22912>
- Indra, Akbar K, A., Hidayat, T., Wardono, S., & Dwiyaniti, M. (2020). Performansi Pengendalian Kecepatan Motor Induksi pada Modul Pembelajaran Berbasis PLC-PID. *ELECTRICES*, 2(2), 62–70. <https://doi.org/https://doi.org/10.32722/ees.v2i2.3066>
- Karupusamy, S., Mustafa, M. A., Jos, B. M., Dahiya, P., Bhardwaj, R., Kanani, P., & Kumar, A. (2023). Torque Control-Based Induction Motor Speed Control using Anticipating Power Impulse Technique. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. <https://doi.org/10.1007/s00170-023-10893-5>
- Maghfiroh, H., Iftadi, I., & Sujono, A. (2021). Speed Control of Induction Motor using LQG. *Journal of Robotics and Control (JRC)*, 2(6), 565–570. <https://doi.org/10.18196/jrc.26138>
- Maghfiroh, H., Slamet Saputro, J., Fahmizal, F., & Ahmad Baballe, M. (2023). Adaptive Fuzzy-PI for Induction Motor Speed Control. *Journal of Fuzzy Systems and Control*, 1(1), 1–5. <https://doi.org/10.59247/jfsc.v1i1.24>
- Rohadi, N., Men, L. K., & Hidayat, A. (2025). Adaptive PID Auto-Tuning Algorithm on Omron PLC for Speed Control and Stability. *Jurnal Nasional Teknik Elektro dan Teknologi Informasi*, 14(4), 317–325. <https://doi.org/10.22146/jnteti.v14i4.22693>
- Nosheen, T., Ali, A., Chaudhry, M. U., Nazarenko, D., Shaikh, I. ul H., Bolshev, V., Iqbal, M. M., Khalid, S., & Panchenko, V. (2023). A Fractional Order Controller for Sensorless Speed Control of an Induction Motor. *Energies*, 16(4), 1901. <https://doi.org/10.3390/en16041901>
- Okeke, C. A., & Okonkwo, I. I. (2023). Fuzzy Logic Aided PID Controller for Induction Motor

- Speed Control. *Int. J. Adv. Networking Appl*, 14, 5541–5548.
- Özbay, H. (2023). PLC Based PID Control for Induction Motor Drive Using VFD. *AINTELIA Science Notes Journal*, 2(1), 17–23.
<https://doi.org/https://doi.org/10.5281/zenodo.10396151>
- Permana, D. C., Ferdiansyah, R., Safira, F. P., Gumilang, Z. T. A., Pangestu, A. J., & Rozak, R. W. A. (2025). Revolusi Industri 4.0 dan Otomatisasi: Antara Produktivitas, Risiko, dan Etika Sosial. *KONTAN: Jurnal Ekonomi, Manajemen dan Bisnis*, 4(1), 30–35.
<https://doi.org/10.59818/kontan.v4i1.553>
- Petruzella, F. D. (2023). *Programmable Logic Controllers* (6 ed.). McGraw Hill Education.
- Prabhakaran, A., Ponnusamy, T., Thenmozhi, & Janarthanan, G. (2024). Optimized Fractional Order PID Controller With Sensorless Speed Estimation for Torque Control in Induction Motor. *Expert Systems with Applications*, 249, 1–19.
<https://doi.org/10.1016/j.eswa.2024.123574>
- Prasetia, A. M., & Ramadani, M. N. (2024). Implementation of Induction Motor Speed Control Using a PID Controller. *Fidelity: Jurnal Teknik Elektro*, 6(1), 12–20.
<https://doi.org/10.52005/fidelity.v6i1.195>
- Saputra, D., Ma'arif, A., Maghfiroh, H., Chotikunnan, P., & Rahmadhia, S. N. (2023). Design and Application of PLC-based Speed Control for DC Motor Using PID with Identification System and MATLAB Tuner. *International Journal of Robotics and Control Systems*, 3(2), 233–244. <https://doi.org/10.31763/ijrcs.v3i2.775>
- Shekher, V., Sisodiya, A., Sinha, A. K., Harsh, H., & Soren, N. (2024). Optimal Tuning of PID Controller for V/f Control of Linear Induction Motor using Artificial Biological Intelligence. *Franklin Open*, 9, 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.fraope.2024.100183>
- Utomo, A. P., Nugraha, A. T., & Zakariz, N. P. (2021). Speed Adjustment on Variable Frequency Induction Motor Using PLC for Automatic Polishing Machine. *Indonesian Journal of Electronics, Electromedical Engineering, and Medical Informatics*, 3(2), 70–75.
- Volta, Y. A., Suyadi, A., Firmansyah, A., & Fadly, I. (2025). Sistem Kendali Kecepatan Motor Induksi Tiga Fasa Menggunakan VSD Berbasis HMI PLC OMRON CP1E N40. *Transmisi: Jurnal Ilmiah Teknik Elektro*, 27(4), 209–215.
<https://doi.org/10.14710/transmisi.27.4.209-215>
- Yahya, S., Fauzi, A., Rafi Al Tahtawi, A., & Muhammad Ilman, S. (2024). Kendali Kecepatan Motor Induksi 3-Fasa Dengan Metode Adaptif Fuzzy-PID. *TELKA - Telekomunikasi Elektronika Komputasi dan Kontrol*, 10(1), 01–11. <https://doi.org/10.15575/telka.v10n1.01-11>

Yefriani, F., & Risfendra, R. (2023). Kendali PID Menggunakan Metode Tuning Ziegler-Nichols I untuk Mengendalikan Kecepatan Motor Berbasis PLC. JTEIN: Jurnal Teknik Elektro Indonesia, 4(2), 1023–1030.