# Evaluasi Kinerja Kendali PID-SCADA terhadap Variasi Setpoint dan Gangguan Beban pada Motor Induksi Tiga Fasa

*Ahmad Zacky Fauzan[1], Mohamad Nurcholis[1], Jumiyatun[1]*,*

*Martdiansyah[1],Baso Mukhlis[1],Yulius S.Pirade[1] dan Yusnaini Arifin[1]*

*[1] Jurusan Teknik Elektro,Universitas Tadulako, Palu, Indonesia*

*Correspondent Author : jum@untad.ac.id*

***Abstract* — This study evaluates the performance of PLC-SCADA-based PID control in maintaining the speed of a three-phase induction motor under setpoint changes and load disturbances. The system uses an Omron CP2E PLC, Omron MX2 inverter, encoder, and SCADA monitoring interface. Tests included PID tuning and comparisons of open-loop and closed-loop responses under no-load and 0.1 Nm load conditions. The best tuning was obtained at PB 2000, Ti 10 s, and Td 0 s, resulting in a 16 s settling time, 0.50% overshoot, and 0.10% steady-state error. Under load, the closed-loop system produced a maximum error of 0.57%, substantially lower than the 22.38% obtained in open-loop operation. These results demonstrate that PID control effectively compensates for load disturbances by adjusting the inverter frequency, thereby maintaining motor speed close to the setpoint.**

**Keyword — induction motor, inverter, load disturbance, PID, SCADA**

Abstrak — Penelitian ini mengevaluasi kinerja kendali PID berbasis PLC-SCADA dalam mempertahankan kecepatan motor induksi tiga fasa terhadap perubahan setpoint dan gangguan beban. Sistem menggunakan PLC Omron CP2E, inverter Omron MX2, encoder, dan SCADA sebagai antarmuka pemantauan. Pengujian dilakukan melalui penalaan parameter PID serta perbandingan respons open-loop dan closed-loop pada kondisi tanpa beban dan berbeban 0,1 Nm. Hasil penalaan terbaik diperoleh pada Proportional Band (PB) 2000, Ti 10 s, dan Td 0 s dengan settling time 16 s, overshoot 0,50%, dan steady-state error 0,10%. Pada kondisi berbeban, closed-loop menghasilkan error maksimum 0,57%, jauh lebih rendah dibandingkan open-loop sebesar 22,38%. Hasil tersebut menunjukkan bahwa kendali PID mampu mengompensasi gangguan beban melalui penyesuaian frekuensi inverter sehingga kecepatan motor tetap mendekati setpoint.

Kata kunci — gangguan beban, inverter, motor induksi tiga fasa, PID, SCADA

## I. Pendahuluan

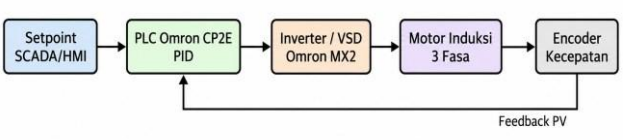
Motor induksi tiga fasa banyak digunakan sebagai penggerak pada proses industri karena konstruksinya kokoh, sederhana, dan sesuai untuk operasi kontinu. Pada aplikasi dengan kebutuhan kecepatan variabel, variable speed drive (VSD) mengubah frekuensi suplai motor, sedangkan programmable logic controller (PLC) menyediakan platform kendali yang dapat diintegrasikan dengan sensor, aktuator, dan supervisory control and data acquisition (SCADA). Pada operasi open-loop, perubahan beban mekanis dapat menyebabkan kecepatan aktual menyimpang dari setpoint karena perintah frekuensi tidak dikoreksi berdasarkan kondisi putaran aktual [1-2].

Penelitian terdahulu menunjukkan bahwa integrasi PLC, VSD, SCADA, dan kendali PID telah digunakan untuk pengaturan kecepatan motor induksi. Dorkas dan Yurika melaporkan kendali PID berbasis PLC-SCADA dengan respons yang stabil, tetapi juga menunjukkan keterbatasan pada frekuensi rendah [2]. Yahya dkk. mengembangkan adaptive Fuzzy-PID pada motor induksi tiga fasa dan menunjukkan kemampuan pemulihan terhadap gangguan pembebanan [3]. Setiana dkk. mengimplementasikan PID pada motor-generator set berbasis VSD dengan beban bervariasi dan memperoleh error keadaan tunak yang rendah [4,5]. Özbay juga menunjukkan implementasi PID berbasis PLC dan VFD pada penggerak motor induksi [6].

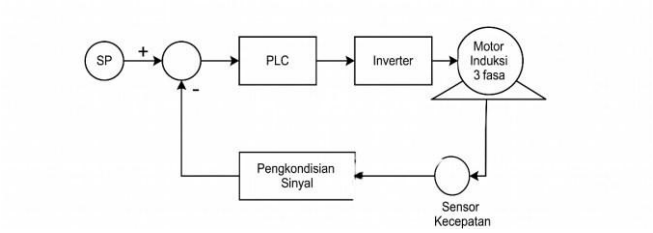
Berdasarkan perkembangan tersebut, kontribusi penelitian ini tidak diletakkan pada kebaruan algoritma PID, tetapi pada evaluasi eksperimental yang sistematis terhadap prototipe Omron CP2E-MX2-SCADA melalui perbandingan open-loop dan closed-loop pada variasi setpoint serta gangguan beban. Analisis menghubungkan error kecepatan dengan Manipulated Value (MV), yaitu keluaran pengendali berupa perintah frekuensi inverter. Mekanisme kompensasi diamati ketika PID menyesuaikan MV akibat adanya selisih antara Set Value (SV) dan Process Value (PV), sehingga kecepatan aktual kembali mendekati setpoint. Tujuan penelitian adalah mengevaluasi hasil penalaan PID dan kemampuan sistem closed-loop mempertahankan kecepatan motor ketika setpoint dan beban mekanis berubah.

## II. Metode

Penelitian dilakukan secara eksperimental menggunakan PLC Omron CP2E, inverter Omron MX2, motor induksi tiga fasa, encoder kecepatan, catu daya 24 VDC, perangkat proteksi, dan SCADA/HMI. Nilai kecepatan yang diinginkan ditetapkan melalui SCADA sebagai Set Value (SV) dalam rpm. PLC menghitung error antara SV dan Process Value (PV), yaitu kecepatan aktual yang dibaca encoder, kemudian menjalankan algoritma PID. Keluaran PID berupa Manipulated Value (MV) dikirim ke inverter sebagai perintah frekuensi (Hz). Encoder mengukur kecepatan aktual dan mengembalikan PV ke PLC sebagai sinyal umpan balik.




(a)




(b)

Gambar 1. Arsitektur sistem kendali PLC-PID-VSD-SCADA.

Pada arsitektur gambar 1(a), Set Value (SV) merupakan kecepatan yang diinginkan, Process Value (PV) adalah kecepatan aktual yang dibaca encoder, sedangkan Manipulated Value (MV) merupakan keluaran PID berupa perintah frekuensi inverter. Nilai PV dikembalikan ke PLC sebagai umpan balik untuk proses koreksi kecepatan.Komunikasi data PLC-SCADA menggunakan Modbus. Pengujian dilakukan dalam lima tahap: penalaan PID pada setpoint 2000 rpm; open-loop tanpa beban; open-loop dengan beban; closed-loop tanpa beban; dan closed-loop dengan beban mekanis 0,1 Nm. Parameter yang dicatat meliputi PV, error, MV/frekuensi inverter, arus motor, overshoot, dan settling time.

Persentase error dihitung dari selisih absolut antara PV dan SV terhadap SV. Penalaan PID dilakukan dengan metode trial-and-error menggunakan enam kombinasi PB, Ti, dan Td. Parameter dengan settling time dan error keadaan tunak terbaik dipilih untuk pengujian closed-loop berikutnya.

Gambar 1 (b) menunjukkan diagram blok sistem kontrol kecepatan motor induksi tiga fasa berbasis PLC, inverter, dan metode PID yang bekerja dalam sistem kendali lingkar tertutup (*close loop*). Sistem ini membandingkan nilai kecepatan aktual (*Process Variable / PV*) hasil pembacaan *rotary encoder* dengan nilai *setpoint* kecepatan (*SV*) secara *real-time* untuk menjaga kestabilan putaran motor saat terjadi perubahan beban mekanis.

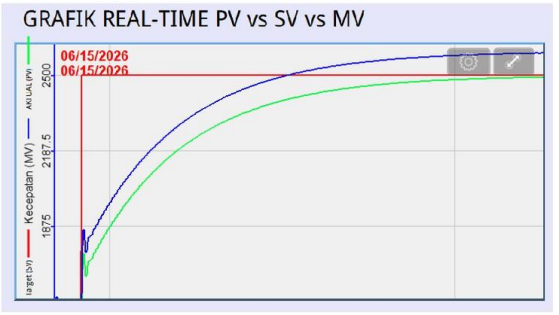
## III. Hasil dan Pembahasan

### *A. Penalaan PID*

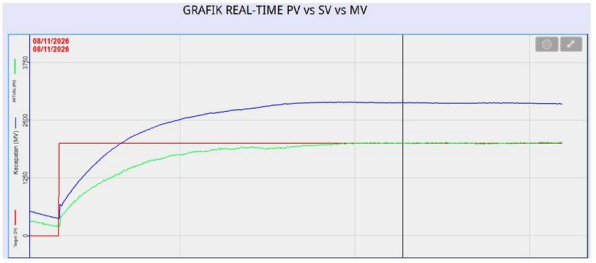
TABEL I
HASIL PENALAAN PARAMETER PID

| Uji | PB | Ti (s) | Td (s) | PV (rpm) | Error (%) | Ts (s) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 3000 | 99 | 0 | 2016 | 0,80 | 213 |
| 2 | 2000 | 99 | 0 | 2003 | 0,15 | 172 |
| 3 | 1000 | 99 | 0 | 2008 | 0,40 | 120 |
| 4 | 2000 | 50 | 0 | 2004 | 0,20 | 99 |
| 5 | 2000 | 50 | 1 | 2003 | 0,15 | 107 |
| 6 | 2000 | 10 | 0 | 2002 | 0,10 | 16 |

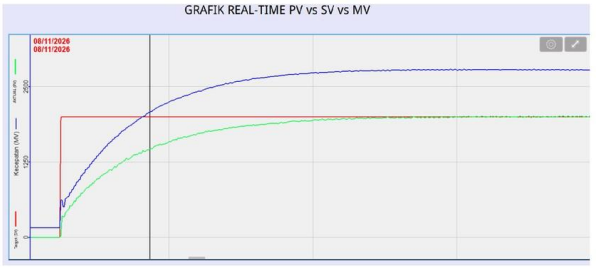
Tabel 1 merupakan enam kombinasi parameter menunjukkan bahwa perubahan PB dan Ti memengaruhi kecepatan respons serta error keadaan tunak. Kombinasi PB = 2000, Ti = 10 s, dan Td = 0 s memberikan hasil terbaik, dengan PV 2002 rpm, error 0,10%, dan settling time 16 s, sehingga digunakan pada pengujian closed-loop berikutnya.



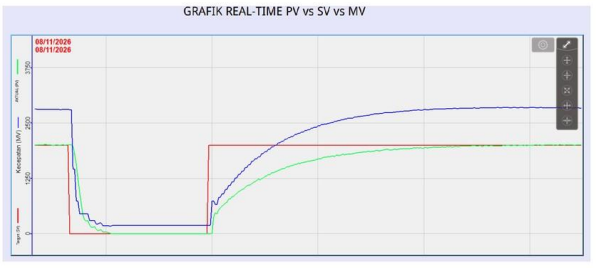

Gambar 2a. Pengujian Pada Saat Pengujian 1 yaitu PB = 3000, Ti = 99 s, Td = 0 s.



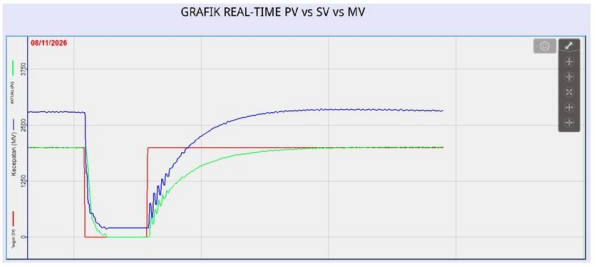

Gambar 2b. Pengujian 2 dimana PB = 2000, Ti = 99 s, Td = 0 s.




Gambar 2c. Pengujian 3 dimana PB = 1000, Ti = 99 s, Td = 0 s.

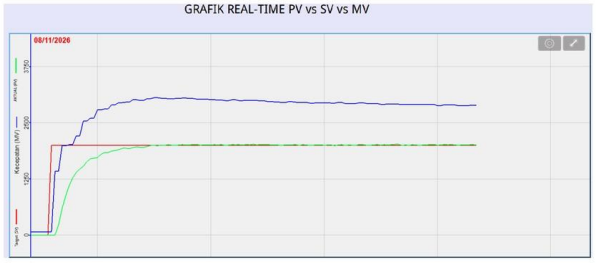



Gambar 2d. Pengujian 4 dimana PB = 2000, Ti = 50 s, Td = 0 s.




Gambar 2e. Pengujian 5 dimana PB = 2000, Ti = 50 s, Td = 1 s.

(f)




Gambar 2f. Pengujian Kontrol PID Pada Saat PB = 2000, Ti = 10 s, Td = 0 s.

Gambar 2a sd 2f merupakan respon enam pengujian parameter PID dimana pengujian 1 (2a) dengan PB 3000 dan Ti 99 s menghasilkan settling time 213 s dan error 0,80%. Penurunan PB menjadi 2000 pada pengujian 2 (2b) menurunkan error menjadi 0,15% dan mempercepat settling time menjadi 172 s. Pengujian 3(2c) dengan PB 1000 mempercepat respons menjadi 120 s, tetapi error meningkat menjadi 0,40%. Ketika Ti diturunkan menjadi 50 s pada Pengujian 4 (2d), settling time membaik menjadi 99 s. Penambahan Td 1 s pada pengujian 5 (2e) tidak memberikan perbaikan karena settling time menjadi 107 s. Hasil terbaik diperoleh pada Pengujian 6 (2f) dengan PB 2000, Ti 10 s, dan Td 0 s: settling time 16 s, overshoot 0,50%, dan error 0,10%. Pada plant ini, penguatan aksi integral memberi pengaruh lebih nyata dibanding penambahan derivatif.

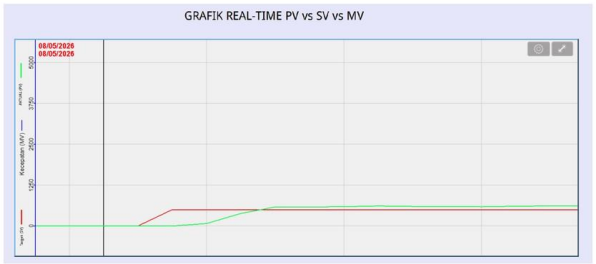
*B. Pengujian Open-Loop Tanpa Beban*

TABEL II
HASIL OPEN-LOOP TANPA BEBAN

| SV | PV | Error (%) | MV (Hz) | I (A) |
|---|---|---|---|---|
| 500 | 605 | 21,00 | 9,25 | 0,14 |
| 1000 | 1095 | 9,50 | 18,51 | 0,17 |
| 1500 | 1587 | 5,80 | 27,77 | 0,22 |
| 2000 | 2020 | 1,00 | 37,03 | 0,27 |
| 2500 | 2601 | 4,04 | 46,29 | 0,36 |

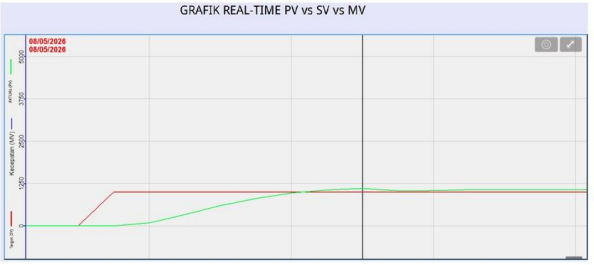
Pada pengujian open-loop tanpa beban, error cenderung mengecil ketika setpoint meningkat hingga 2000 rpm, dengan error minimum 1,00%. Namun pada 2500 rpm error kembali meningkat menjadi 4,04%, menunjukkan bahwa tanpa umpan balik sistem tidak dapat mengoreksi deviasi PV terhadap SV secara otomatis.

(a)




Pada SV 500 rpm diperoleh PV 605 rpm dengan error 21,00%. Error yang besar menunjukkan bahwa pada putaran rendah sistem open-loop tidak dapat mengoreksi perbedaan antara kecepatan aktual dan setpoint.

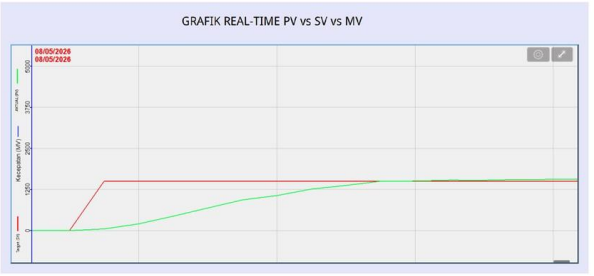
(b)




Gambar 3b. Open-loop tanpa beban, SV = 1000 rpm.

Pada SV 1000 rpm, PV mencapai 1095 rpm dengan error 9,50%. Error mulai menurun dibandingkan pengujian 500 rpm, tetapi PV masih berada di atas setpoint karena tidak terdapat umpan balik.

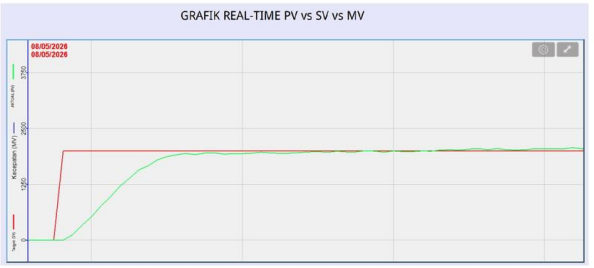
(c)




Gambar 3c. Open-loop tanpa beban, SV = 1500 rpm.

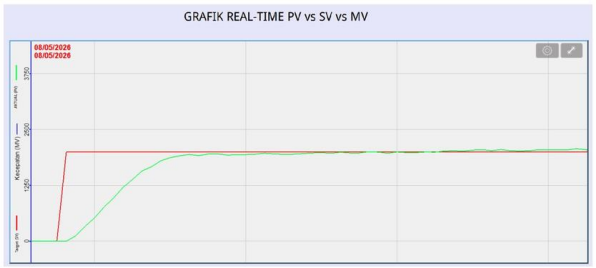
Pada SV 1500 rpm diperoleh PV 1587 rpm dan error 5,80%. Kenaikan setpoint memperkecil deviasi relatif, meskipun inverter tetap bekerja tanpa koreksi berdasarkan PV.

(d)




Gambar 3d. Open-loop tanpa beban, SV = 2000 rpm.

Pada SV 2000 rpm, PV sebesar 2020 rpm menghasilkan error 1,00%, yaitu nilai terkecil pada pengujian open-loop tanpa beban. Kecepatan aktual sudah mendekati setpoint meskipun tanpa aksi koreksi.




Gambar 3e. Open-loop tanpa beban, SV = 2500 rpm.

Pada SV 2500 rpm diperoleh PV 2601 rpm dengan error 4,04%. Error kembali meningkat, menunjukkan bahwa hubungan antara perintah frekuensi dan kecepatan aktual tidak sepenuhnya linear pada seluruh rentang operasi.

Gambar 3. Respons open-loop tanpa beban.

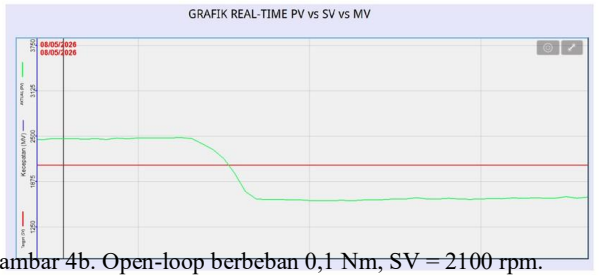
Pada gambar 3 keseluruhan respon open-loop tanpa beban, error berubah dari 21,00% pada 500 rpm menjadi 1,00% pada 2000 rpm dan 4,04% pada 2500 rpm. Karena tidak ada umpan balik, inverter mempertahankan perintah frekuensi tanpa koreksi terhadap selisih SV-PV. Error yang besar pada putaran rendah juga sejalan dengan laporan Dorkas dan Yurika [4] bahwa kinerja pengukuran/kendali dapat menurun pada daerah frekuensi rendah.

*C. Open-Loop dengan Beban*

TABEL III
HASIL OPEN-LOOP DENGAN BEBAN MEKANIS

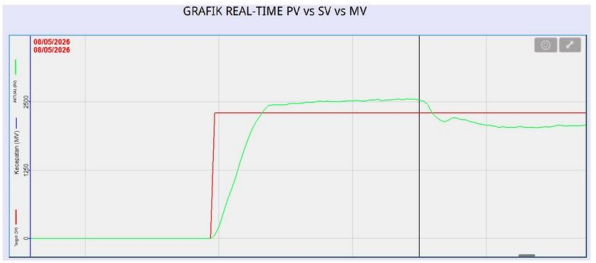
| SV | PV | Error (%) | MV (Hz) | I0 (A) | Ib (A) |
|---|---|---|---|---|---|
| 2000 | 1600 | 20,00 | 37,03 | 0,30 | 0,60 |
| 2100 | 1630 | 22,38 | 38,88 | 0,30 | 0,60 |
| 2300 | 2008 | 12,70 | 42,59 | 0,35 | 0,70 |
| 2500 | 2343 | 6,28 | 46,59 | 0,40 | 0,70 |
| 2700 | 2413 | 10,63 | 50,00 | 0,45 | 0,80 |

Pemberian beban 0,1 Nm pada sistem open-loop menyebabkan PV turun terhadap SV pada seluruh titik pengujian, dengan error 6,28–22,38%. Arus motor juga meningkat dari kondisi tanpa beban (I0) ke kondisi berbeban (Ib), sedangkan MV tidak melakukan kompensasi berdasarkan perubahan PV.



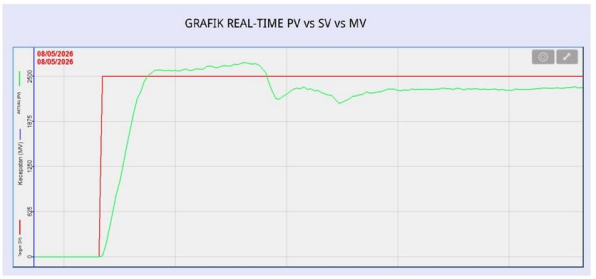

Gambar 4b. Open-loop berbeban 0,1 Nm, SV = 2100 rpm.

Pada SV 2100 rpm, PV hanya mencapai 1630 rpm dengan error 22,38%, yaitu error terbesar pada pengujian open-loop berbeban. Kondisi ini memperlihatkan kelemahan open-loop ketika terjadi gangguan torsi mekanis.




Gambar 4c. Open-loop berbeban 0,1 Nm, SV = 2300 rpm.

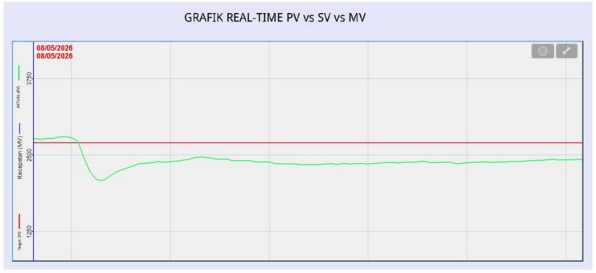
Pada SV 2300 rpm diperoleh PV 2008 rpm dengan error 12,70%. Arus berbeban meningkat menjadi 0,70 A, sedangkan MV tetap mengikuti perintah 42,59 Hz tanpa koreksi terhadap penurunan PV.




Gambar 4d. Open-loop berbeban 0,1 Nm, SV = 2500 rpm.

Pada SV 2500 rpm, PV mencapai 2343 rpm dengan error 6,28%. Deviasi lebih kecil dibandingkan setpoint

(e)




Gambar 4e. Open-loop berbeban 0,1 Nm, SV = 2700 rpm.

Pada SV 2700 rpm diperoleh PV 2413 rpm dengan error 10,63%. MV telah mencapai 50 Hz dan arus berbeban 0,80 A, sehingga kemampuan menaikkan kecepatan menjadi terbatas pada kondisi operasi ini.

Gambar 4. Respons open-loop dengan gangguan beban 0,1 Nm.

Gambar 4 menunjukkan respons open-loop dengan gangguan beban 0,1 Nm memperbesar deviasi kecepatan pada open-loop. Error maksimum 22,38% terjadi pada setpoint 2100 rpm, ketika PV turun menjadi 1630 rpm. Arus meningkat saat beban diberikan, tetapi frekuensi perintah tidak disesuaikan berdasarkan penurunan PV. Kondisi ini memperlihatkan kelemahan mendasar open-loop terhadap perubahan torsi mekanis.

*D. Closed-Loop PID Tanpa Beban*

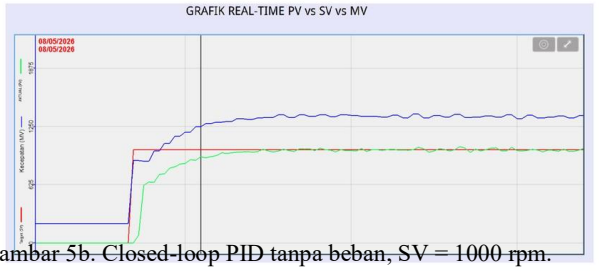
TABEL IV
HASIL CLOSED-LOOP PID TANPA BEBAN

| SV | PV | Error (%) | MV (Hz) | I (A) |
|---|---|---|---|---|
| 500 | 523 | 4,60 | 6,98 | 0,13 |
| 1000 | 1088 | 8,80 | 13,51 | 0,15 |
| 1500 | 1516 | 1,07 | 20,84 | 0,18 |
| 2000 | 2009 | 0,45 | 29,16 | 0,20 |
| 2500 | 2506 | 0,24 | 39,09 | 0,26 |

Pada kondisi closed-loop tanpa beban, PID mampu menjaga PV lebih dekat terhadap SV, terutama pada setpoint 1500–2500 rpm dengan error 0,24–1,07%. Hasil ini menunjukkan bahwa umpan balik encoder dan aksi PID mampu memperkecil deviasi kecepatan dibandingkan sistem open-loop.

Pada SV 500 rpm, kendali PID menghasilkan PV 523 rpm dengan error 4,60%. Dibandingkan open-loop pada setpoint yang sama, error berkurang dari 21,00%, menunjukkan adanya koreksi oleh PID.

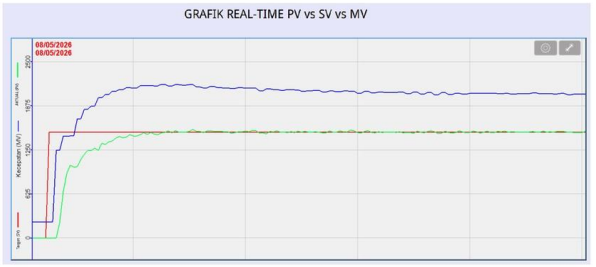
(b)




Gambar 5b. Closed-loop PID tanpa beban, SV = 1000 rpm.

Pada SV 1000 rpm diperoleh PV 1088 rpm dengan error 8,80%. Koreksi PID sudah bekerja, tetapi performa pada daerah putaran rendah masih belum sebaik pada putaran menengah dan tinggi.

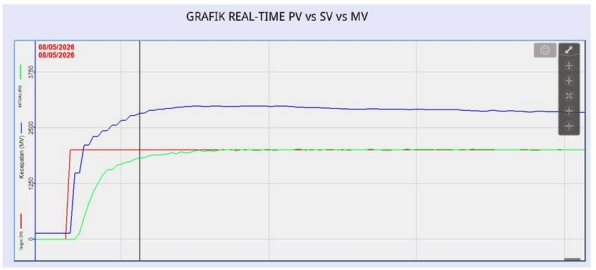
(c)




Gambar 5c. Closed-loop PID tanpa beban, SV = 1500 rpm.

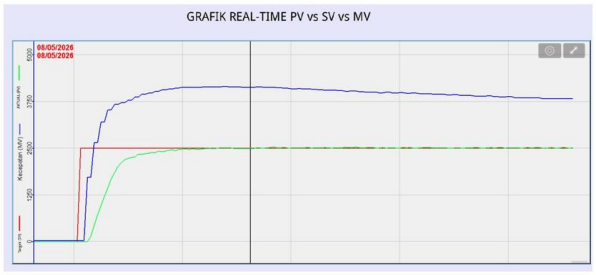
Pada SV 1500 rpm, PV mencapai 1516 rpm dengan error 1,07%. PID menyesuaikan MV hingga 20,84 Hz sehingga kecepatan aktual dapat diarahkan lebih dekat ke setpoint.

(d)




Gambar 5d. Closed-loop PID tanpa beban, SV = 2000 rpm.

Pada SV 2000 rpm diperoleh PV 2009 rpm dengan error hanya 0,45%. Respons ini menunjukkan kemampuan closed-loop mempertahankan kecepatan dengan deviasi yang kecil.




Gambar 5e. Closed-loop PID tanpa beban, SV = 2500 rpm.

Pada SV 2500 rpm, PV mencapai 2506 rpm dengan error 0,24%, yaitu error terkecil pada pengujian closed-loop tanpa beban. Sistem mampu mempertahankan PV sangat dekat dengan setpoint.

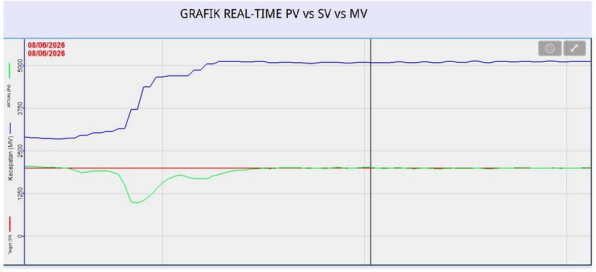
Gambar 5a sd 5e menunjukkan respon closed-loop menurunkan error terutama pada rentang 1500-2500 rpm, yaitu dari 1,07% menjadi 0,24%. Pada 500 dan 1000 rpm error masih 4,60% dan 8,80%, sehingga daerah putaran rendah tetap menjadi keterbatasan sistem. Perbaikan pada putaran menengah-tinggi terjadi karena PLC terus mengubah MV berdasarkan error sehingga PV diarahkan kembali ke setpoint.

*E.* Pengujian *Closed-Loop* Menggunakan Kendali PID *dengan Gangguan Beban*

TABEL V
HASIL CLOSED-LOOP PID DENGAN BEBAN MEKANIS 0,1 NM

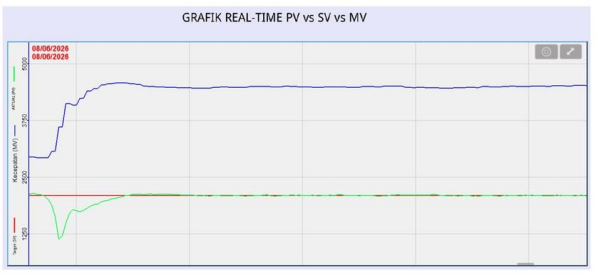
| SV | PV | Error (%) | MV (Hz) | I0 (A) | Ib (A) |
|---|---|---|---|---|---|
| 2000 | 2003 | 0,15 | 43,82 | 0,20 | 0,60 |
| 2100 | 2106 | 0,29 | 44,92 | 0,20 | 0,60 |
| 2200 | 2206 | 0,27 | 48,93 | 0,21 | 0,65 |
| 2250 | 2246 | 0,18 | 49,26 | 0,21 | 0,70 |
| 2300 | 2313 | 0,57 | 50,19 | 0,22 | 0,70 |

Pada pengujian closed-loop dengan beban 0,1 Nm, seluruh error berada pada rentang 0,15–0,57%. Ketika arus meningkat akibat beban, pengendali menyesuaikan MV sehingga PV tetap mendekati SV; hal ini menunjukkan kemampuan PID dalam mengompensasi gangguan beban.



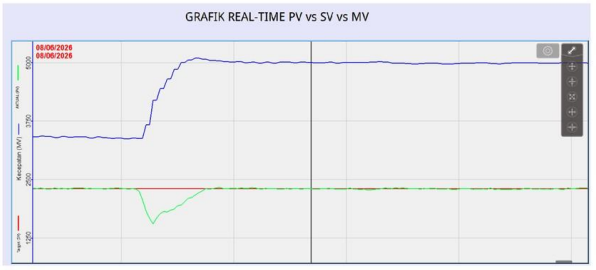

Gambar 6a. Closed-loop PID berbeban 0,1 Nm, SV = 2000 rpm.

Pada SV 2000 rpm dan beban 0,1 Nm, PV dipertahankan pada 2003 rpm dengan error 0,15%. PID meningkatkan MV menjadi 43,82 Hz dan arus naik dari 0,20 A menjadi 0,60 A untuk mengompensasi beban.



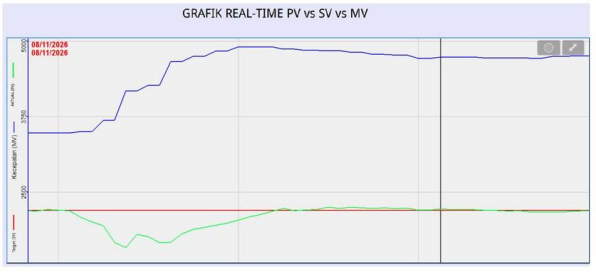

Gambar 6b. Closed-loop PID berbeban 0,1 Nm, SV = 2100 rpm.

Pada SV 2100 rpm, PV mencapai 2106 rpm dengan error 0,29%. Kenaikan MV menjadi 44,92 Hz menunjukkan aksi pengendali dalam mempertahankan kecepatan ketika beban diberikan.



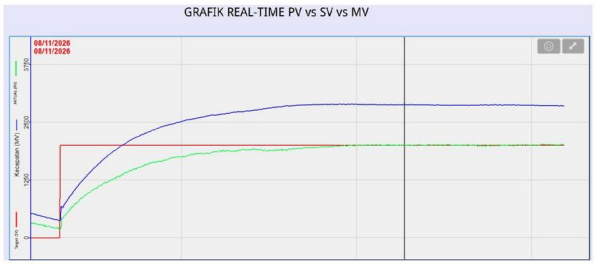

Gambar 6c. Closed-loop PID berbeban 0,1 Nm, SV = 2200 rpm.

Pada SV 2200 rpm diperoleh PV 2206 rpm dengan error 0,27%. Arus meningkat dari 0,21 A menjadi 0,65 A dan MV menjadi 48,93 Hz, sementara kecepatan tetap berada dekat setpoint.




Gambar 6d. Closed-loop PID berbeban 0,1 Nm, SV = 2250 rpm.

Pada SV 2250 rpm, PV sebesar 2246 rpm menghasilkan error 0,18%. Walaupun arus berbeban meningkat menjadi 0,70 A, PID mampu menjaga penyimpangan kecepatan tetap sangat kecil.




Gambar 6e. Closed-loop PID berbeban 0,1 Nm, SV = 2300 rpm.

Pada SV 2300 rpm diperoleh PV 2313 rpm dengan error 0,57%. MV meningkat hingga 50,19 Hz dan arus menjadi 0,70 A; meskipun error ini terbesar pada kelompok closed-loop berbeban, nilainya masih jauh lebih kecil daripada open-loop berbeban.

Gambar 6. Respons closed-loop PID dengan gangguan beban 0,1 Nm. Pada kondisi berbeban, seluruh error closed-loop berada pada 0,15-0,57%. Ketika beban diberikan, arus meningkat dari sekitar 0,20-0,22 A menjadi 0,60-0,70 A dan MV meningkat hingga mendekati 50 Hz. Perubahan ini menunjukkan mekanisme kompensasi: PID menaikkan perintah inverter untuk menghasilkan usaha elektromagnetik yang lebih besar sehingga kecepatan kembali mendekati setpoint.

*F. Perbandingan Kinerja*

TABEL VI
RINGKASAN PERBANDINGAN KONDISI PENGUJIAN

| Kondisi | Rentang error (%) | Error maksimum (%) | Karakteristik |
|---|---|---|---|
| Open-loop tanpa beban | 1,00-21,00 | 21,00 | Tidak ada koreksi PV |
| Open-loop berbeban | 6,28-22,38 | 22,38 | Kecepatan turun saat beban |
| Closed-loop tanpa beban | 0,24-8,80 | 8,80 | Koreksi PID aktif |
| Closed-loop berbeban | 0,15-0,57 | 0,57 | Gangguan dikompensasi |

Perbandingan seluruh kondisi memperlihatkan perbedaan paling jelas saat sistem diberi beban. Error maksimum open-loop berbeban mencapai 22,38%, sedangkan closed-loop berbeban hanya 0,57%. Dengan demikian, penggunaan PID berbasis umpan balik meningkatkan kemampuan sistem mempertahankan kecepatan motor ketika terjadi gangguan beban.

Perbandingan menunjukkan manfaat PID paling jelas pada kondisi berbeban. Error maksimum turun dari 22,38% pada open-loop menjadi 0,57% pada closed-loop. Jika kedua nilai maksimum tersebut digunakan sebagai indikator praktis, deviasi maksimum berkurang sekitar 97,5%. Namun angka ini merupakan perbandingan antar-kondisi pengujian, bukan ukuran statistik dari pengulangan eksperimen. Dibanding adaptive Fuzzy-PID [5], pengendali pada penelitian ini masih menggunakan parameter tetap. Karena itu, hasil penelitian tidak dimaksudkan untuk menyatakan PID konvensional lebih unggul daripada pengendali adaptif.

Nilai tambah penelitian terletak pada bukti eksperimental hubungan antara error, MV, dan arus pada sistem Omron CP2E-MX2-SCADA. Keterbatasan penelitian adalah pengujian closed-loop berbeban hanya menggunakan satu tingkat torsi 0,1 Nm dan belum dilakukan pengulangan untuk memperoleh simpangan baku atau interval kepercayaan.

## IV. Kesimpulan

Implementasi PID pada PLC Omron CP2E yang terintegrasi dengan inverter Omron MX2, encoder, Modbus, dan SCADA mampu meningkatkan akurasi pengaturan kecepatan motor induksi tiga fasa pada prototipe yang diuji. Penalaan terbaik diperoleh pada PB 2000, Ti 10 s, dan Td 0 s dengan settling time 16 s, overshoot 0,50%, dan error keadaan tunak 0,10% pada setpoint 2000 rpm. Pada pengujian closed-loop berbeban 0,1 Nm, error maksimum hanya 0,57%, sedangkan open-loop berbeban mencapai 22,38%. Peningkatan MV dan arus saat beban diberikan menunjukkan bahwa pengendali secara aktif menambah usaha kendali untuk memulihkan kecepatan. Penelitian selanjutnya perlu menggunakan beberapa tingkat torsi dan pengulangan eksperimen agar robustness dapat dinilai secara statistik serta dibandingkan dengan metode tuning atau pengendali adaptif.

## Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Laboratorium Elektronika Daya dan Sistem Kendali, Program Studi D4 Teknologi Rekayasa Instalasi Listrik, Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Tadulako atas dukungan fasilitas dalam pelaksanaan penelitian.

## Daftar Acuan

[1] H. Setiana, S. Raihan Hanif, M. Dwiyaniti, H. Hariyanto, and H. Jalaludin Alkindi, "Implementasi PID pada Kendali Motor-Generator Set Berbasis VSD dengan Beban Bervariasi," *Electrices*, vol. 7, no. 2, pp. 121–131, 2025, doi: 10.32722/ees.v7i2.8062.

[2] M. A. Azzuhri, N. A. Tholud, U. S. Lubis, M. Dwiyaniti, and I. Halimi, "Penerapan PLC dan VSD untuk Mengontrol Kecepatan Motor Induksi dengan Pemantauan SCADA," *Prosiding Seminar Nasional Teknik Elektro*, vol. 10, 2024.

[3] S. Yahya, A. Fauzi, A. R. Al Tahtawi, and S. M. Ilman, "Kendali Kecepatan Motor Induksi 3-Fasa Dengan Metode Adaptif Fuzzy-PID," *TELKA - Telekomunikasi Elektronika Komputasi dan Kontrol*, vol. 10, no. 1, pp. 01–11, 2024, doi: 10.15575/telka.v10n1.01-11.

[4] S. Yahya, K. Wijayanto, M. N. Azrina, and K. Kunci, "Pengendalian Kecepatan Motor Induksi Tiga Fasa dengan Metode Logika Fuzzy

Berbasis PLC," *Industrial Research Workshop and National Seminar*, vol. 11, no. 11, pp. 26–27, 2020, [Online]. Available: https://jurnal.polban.ac.id/proceeding/article/view/1965%0Ahttps://jurnal.polban.ac.id/proceeding/article/view/1965/1535

[5] H. Ozbay, "PLC based PID control for induction motor drive using VFD," *Aintelia Science Notes*, vol. 2, pp. 0–3, 2023, [Online]. Available: https://sciencenotes.aintelia.com/wp-content/uploads/2023/12/AinteliaScienceNotes_Vol2_Issue1_4.pdf

[6] R. Dorkas, "Sistem Kendali Pid Pada Pengaturan Kecepatan Motor Induksi Tiga Fasa Berbasis Plc Scada," *Jurnal Mahasiswa Terapan*, vol. 01, no. 1, pp. 165–175, 2024, [Online]. Available: https://ejournal.poltektedc.ac.id/index.php/juma/article/view/1333%0Ahttps://ejournal.poltektedc.ac.id/index.php/juma/article/download/1333/772