

Kendali Kecepatan Motor Induksi 3-Fasa Dengan Metode Adaptif Fuzzy-PID

Speed Control of 3-Phase Induction Motor Using Adaptive Fuzzy-PID Method

Sofian Yahya¹, Azhar Fauzi², Adnan Rafi Al Tahtawi^{3*}, Sofyan Muhammad Ilman⁴

^{1, 2, 3, 4}Jurusan Teknik Elektro, Politeknik Negeri Bandung

Jl. Gegerkalong Hilir, Bandung Barat, Jawa Barat 40559, Indonesia

sofianyahya@polban.ac.id¹, azhar.fauzi.toi19@polban.ac.id², adnan.raf@polban.ac.id^{3*},
sofyan.muhammad@polban.ac.id⁴

Abstrak – Motor induksi 3-fasa merupakan salah satu aktuator penggerak yang paling banyak digunakan di industri. Motor ini dapat digunakan dalam proses produksi di industry, contohnya untuk menggerakkan konveyor. Walaupun memiliki banyak keunggulan, pengendalian kecepatan motor ini perlu dilakukan agar dapat dicapai stabilitas kecepatannya. Penelitian ini bertujuan untuk merancang sistem pengendalian kecepatan motor induksi 3-fasa 1,5 kW 220/380 V pada kecepatan konstan sebesar 1400 rpm berbasis PLC Omron CP1H. Pengendalian dilakukan menggunakan Variable Speed Drive (VSD) untuk mengatur frekuensi motor dan tachogenerator sebagai umpan balik untuk membaca kecepatan aktual pada motor. Metode pengendalian yang digunakan adalah kendali adaptif Fuzzy-PID (AFPID) yang memiliki kemampuan adaptasi terhadap perubahan parameter akibat adanya gangguan. Konstanta PID dirancang menggunakan pendekatan Ziegler-Nichols 1, kemudian konstanta tersebut akan diinterferensi oleh konstanta tambahan dari logika fuzzy bila mendapatkan gangguan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kendali AFPID mampu menjaga kecepatan motor pada setpoint 1400 rpm dengan berbagai skenario gangguan. Dengan menggunakan pengendali AF-PID, kecepatan motor induksi 3-fasa dapat dikendalikan dan tahan terhadap gangguan karena kemampuannya dalam melakukan penalaan gain secara adaptif.

Kata Kunci: Motor Induksi 3-Fasa, PLC, Adaptif Fuzzy-PID, Variable Speed Drive.

Abstract – The 3-phase induction motor is one of the most widely used drive actuators in the industry. This motor can be used in industrial production processes, for example to drive conveyors. Although it has many advantages, controlling the speed of this motor needs to be done in order to achieve speed stability. This study aims to design a 1.5 kW 220/380 V 3-phase induction motor speed control system at a constant speed of 1400 rpm based on PLC Omron CP1H. Control is carried out using a Variable Speed Drive (VSD) to adjust the motor frequency and a tachogenerator as feedback to read the actual speed of the motor. The control method used is adaptive Fuzzy-PID control (AFPID) which has the ability to adapt to changes in parameters due to disturbances. PID constants are designed using the Ziegler-Nichols 1 approach, then these constants will be interfered with by additional constants from fuzzy logic when they get disturbed. The results showed that the AFPID control was able to maintain the motor speed at a setpoint of 1400 rpm with various disturbance scenarios. By using an AF-PID controller, the speed of a 3-phase induction motor can be controlled and is robust against disturbances due to its ability to adjust gain adaptively.

Keywords: 3-Phase Induction Motor, PLC, Adaptive Fuzzy-PID, Variable Speed Drive.

1. Pendahuluan

Motor induksi sangat berperan penting dalam dunia industri maupun domestik karena dapat digunakan sebagai penggerak elektrik berbagai proses produksi, diantaranya kompresor, konveyor, pompa, blower, dan aktuator penggerak lainnya. Motor induksi memiliki banyak keunggulan diantaranya dapat beroperasi dalam kondisi lingkungan apapun, biaya lebih murah, konstruksi sederhana, efisiensi tinggi, dan perawatan yang rendah dibandingkan motor lain. Namun, motor induksi memiliki kelemahan dalam hal stabilitas dan pengaturan kecepatan. Terdapat dua metode untuk kendali kecepatan motor induksi, pertama adalah kontrol skalar dimana merupakan analisis kecepatan motor induksi dengan mengubah besaran yaitu tahanan rotor, induktansi rotor, tegangan terminal, dan kontrol tegangan/frekuensi (v/f). Kedua adalah kontrol vektor atau disebut dengan *Field Oriented Control* (FOC) dimana metode ini menggunakan lup kontrol untuk mengontrol torsi dan fluks [1].

Teknologi dalam bidang elektronika daya dan pengembangan inverter relatif mudah digunakan untuk *driver* motor induksi. Oleh karena itu, untuk mengatasi kelemahan dalam pengaturan kecepatan motor induksi maka sebuah *Variable Speed Drive* (VSD) digunakan untuk mengatur frekuensi yang masuk menuju motor induksi sehingga kecepatan motor induksi dapat terjaga konstan meskipun beban bervariasi dan juga dapat meningkatkan efisiensi penggunaan energi listrik pada motor di industri [2].

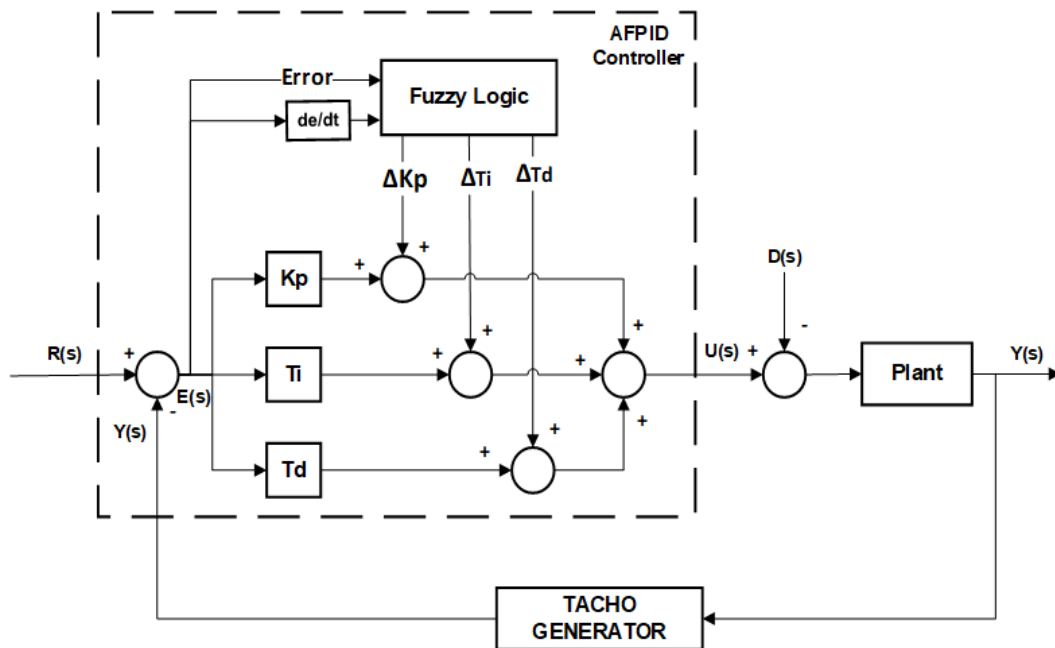
Dalam sistem kendali terdapat banyak metode pengendalian, salah satunya kontrol PID yang menggabungkan kontrol proporsional, integral, dan derivatif. Kontrol ini memiliki keunggulan yaitu dapat mempercepat respon tanggapan, memperbaiki kesalahan kondisi tunak, dan memprediksi kesalahan yang akan terjadi. Kecepatan motor induksi merupakan sistem non-linier yang parameternya berubah-ubah terus menerus dengan posisi rotornya. Kendali PID bekerja dengan baik hanya pada titik-titik tertentu di seluruh rentang operasi. Performa ini tidak cocok untuk aplikasi kontrol kecepatan sehingga dibutuhkan teknik kontrol tingkat lanjut seperti *Fuzzy Logic Controller* (FLC). Kontrol fuzzy menyediakan pengontrol non-linier yang dapat melakukan tindakan kontrol non-linier yang kompleks bahkan untuk jumlah sistem non-linier yang tidak terbatas. Hal ini memungkinkan FLC digunakan untuk menyetel parameter pengontrol PID untuk mencapai kondisi optimal [3]-[4]. Selain teknik kontrol FLC yang diterapkan pada kendali kecepatan motor induksi, ada beberapa teknik kendali yang digunakan diantaranya metode pengontrol *Fuzzy Logic Controller-Proportional Integral* (FLC-PI) hibrida untuk meningkatkan kontrol sistem penggerak *Multi-Induction Motor* dan *Direct Torque Control* (DTC) yang merupakan strategi kontrol non-linier langsung dengan dinamika tinggi [5]-[7]. Metode Cohen-Coon juga dapat diterapkan sebagai media *tuning* mencari parameter PID digunakan juga dapat digunakan untuk meminimalisir *overshoot* dan *settling time* yang lebih cepat [8]. Untuk perangkat keras (komputer) yang digunakan sebagai pengendalian kecepatan motor dapat menggunakan PLC atau mikrokontroler yang di dalamnya tertanam metode kontrol proporsional [9], [10]. Kontrol FLC cukup unggul dalam mengendalikan kecepatan motor induksi 3-fasa dengan hasil *error steady state* kecil [11] dan juga metode kontrol kombinasi antara FLC dan PID, Adaptif Fuzzy-PID (AFPID) dapat diterapkan untuk memperbaiki respon gangguan, waktu konvergensi, *overshoot/undershoot*, kecepatan respon dan kesalahan keadaan tunak [12]-[14], namun pada pengendalian kecepatan dengan metode AFPID hanya dalam bentuk simulasi menggunakan *software* [15].

Pada penelitian ini dipaparkan rancangan dan implementasi pengendalian kecepatan motor induksi 3-fasa dengan menggunakan metode Adaptif Fuzzy-PID (AFPID). Metode pengendalian PID digunakan sebagai kendali utama, sedangkan kendali logika fuzzy digunakan untuk menginterfensi parameter PID saat terjadi gangguan. Pencarian parameter PID yang digunakan adalah Ziegler Nichols 1. Pengendali AFPID diimplementasikan pada PLC Omron CP1H. Untuk inverter motor yang digunakan adalah tipe VSD LS SV015iG5A-2 untuk mengendalikan frekuensi motor yang kecepatannya dijaga konstan pada kecepatan 1400 rpm.

2. Metode Penelitian

2.1. Perancangan Kendali AFPID

Pada AFPID, kendali PID merupakan kendali utama dalam proses pengendalian kecepatan motor yang mana pengendali logika fuzzy berfungsi sebagai penambah atau pengurang saat terjadi gangguan. Parameter keluaran logika fuzzy yaitu ΔK_p , ΔT_i , dan ΔT_d dengan *rules* fuzzy yang telah ditentukan. Masukan dari kendali logika fuzzy yaitu *error* kecepatan dan $\Delta error$ kecepatan. *Error* sendiri merupakan selisih antara nilai *setpoint* dengan nilai kecepatan aktual yang dibaca oleh *tacho* generator dan $\Delta error$ merupakan selisih *error* sebelumnya dengan *error* saat ini. Hasil dari proses pengendalian AFPID berupa tegangan dengan *range* 0-10 VDC yang selanjutnya dikirim sebagai *input* kendali ke VSD.

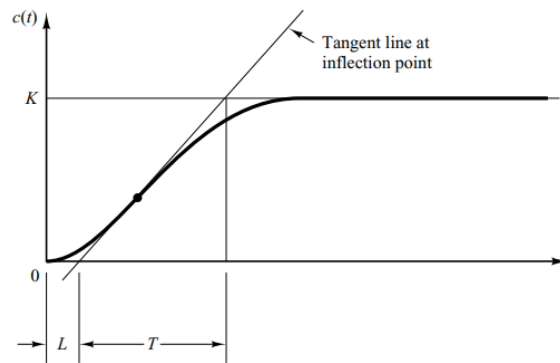


Gambar 1. Diagram blok kendali kecepatan motor induksi 3-fasa.

Gambar 1 menunjukkan secara detail pengendalian kecepatan motor AFPID. Secara umum $R(s)$ merupakan nilai *set point* yang diinginkan, $Y(s)$ merupakan nilai data kecepatan, $U(s)$ adalah besarnya nilai keluaran sinyal kontrol dari kendali AFPID, dan $D(s)$ adalah gangguan. Dalam pengendalian AFPID, hasil keluaran sinyal fuzzy berupa ΔK_p , ΔT_i , dan ΔT_d akan melalui proses *summing* dengan nilai parameter PID. Hasil sinyal keluaran kedua kontroler tersebut akan digunakan untuk mengendalikan *plant* sistem berupa inverter 3-fasa dan akan berpengaruh dengan kecepatan motor induksi 3-fasa.

2.2. Perancangan Kendali PID

Proses menentukan parameter PID, seperti nilai K_p , T_i , dan T_d , dilakukan menggunakan metode Ziegler Nichols 1. Metode ini melibatkan analisis respons *plant* yang menghasilkan sebuah kurva berbentuk S. Untuk mendapatkan grafik respons kecepatan motor, data kecepatan diambil menggunakan PLC dengan menggunakan komunikasi Modbus RTU. Kemudian, data tersebut diterima oleh OPC IO Server dan selanjutnya dikirimkan ke Ms. Excel. Data kecepatan kemudian disajikan dalam bentuk tabel dan digunakan untuk membuat grafik respon kecepatan.



Gambar 2. Kurva respon bentuk S.

Tabel 1. Aturan tuning Ziegler–Nichols 1.

Jenis Pengendalian	K_p	T_i	T_d
P	$\frac{T}{L}$	∞	0
PI	$0.9 \frac{T}{L}$	$\frac{T}{0.3}$	0
PID	$1.2 \frac{T}{L}$	$2L$	$0.5L$

Gambar 2 dan Tabel 1 merupakan metode yang digunakan untuk mendapatkan parameter PID dengan melihat sistem dalam keadaan lup terbuka yang membentuk kurva S. Kurva berbentuk S dapat dicirikan oleh dua konstanta, yaitu waktu tunda (L) dan waktu konstan (T). Waktu tunda dan waktu konstan ditentukan dengan menggambar garis singgung pada titik infleksi kurva berbentuk S dan menentukan potongan garis singgung dengan sumbu waktu dan garis $C(t) = K$. Persamaan (1) yang diberikan aturan Ziegler–Nichols satu sebagai berikut.

$$G_c(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) \quad (1)$$

Dari persamaan (1), maka jika disubstitusikan variabel yang ada pada Tabel 1 dapat diperoleh sebagai berikut.

$$G_c(s) = 1.2 \frac{T}{L} \left(1 + \frac{1}{2Ls} + 0.5Ls \right) \quad (2)$$

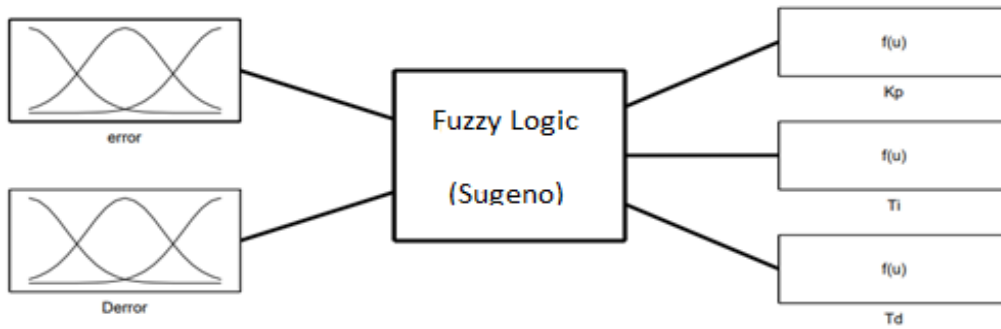
Maka jika persamaan (2) disederhanakan akan diperoleh

$$G_c(s) = 0.6T \frac{\left(s + \frac{1}{L} \right)^2}{s} \quad (3)$$

Pengendali $G_c(s)$ memiliki *pole* pada titik $s = 0$ dan *double zero* pada $s = -1/L$. Dalam pengambilan respons kecepatan dari *plant* dilakukan dalam 10 percobaan. Setelah itu, dilakukan penyetelan dan optimasi menggunakan aturan Ziegler Nichols 1, yang menghasilkan 10 set parameter K_p , T_i , dan T_d . Untuk menentukan parameter terbaik, semua set parameter tersebut diuji langsung dalam pengendalian PID.

2.3. Perancangan Kendali Logika Fuzzy

Kontribusi utama dari pengendali logika fuzzy adalah untuk melakukan proses *adaptive tuning* pada parameter pengendali PID dengan menggunakan *error* (e) dan *Derror* (Δe) sebagai *input* dan menghasilkan parameter ΔK_p , ΔT_i , dan ΔT_d sebagai keluaran seperti ditunjukkan pada Gambar 3. Penelitian ini menggunakan metode inferensi Sugeno karena relatif lebih mudah dalam hal implementasi.



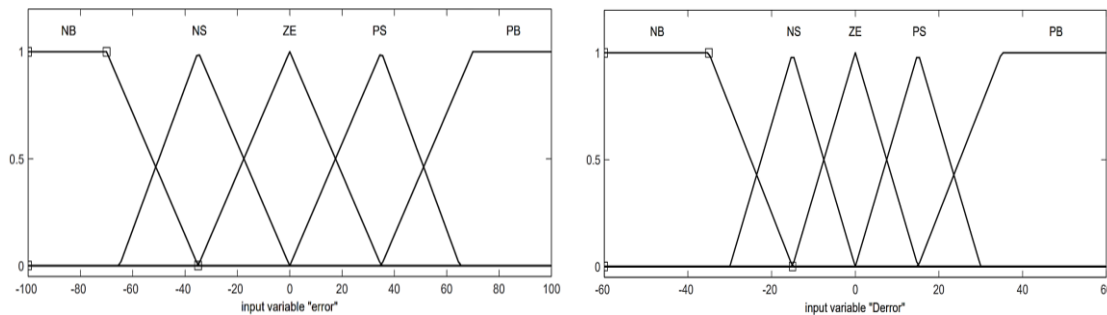
Gambar 3. Rancangan logika fuzzy.

Untuk mendapatkan *input* fuzzy ini, hasil pembacaan sensor yang masuk ke PLC akan diolah dengan men-skalakan data ADC ke dalam nilai kecepatan dan kemudian diolah lagi untuk menghasilkan *error* (*e*) dan *Derror* (Δe) dengan menggunakan persamaan berikut.

$$Error = Setpoint - Output \tag{4}$$

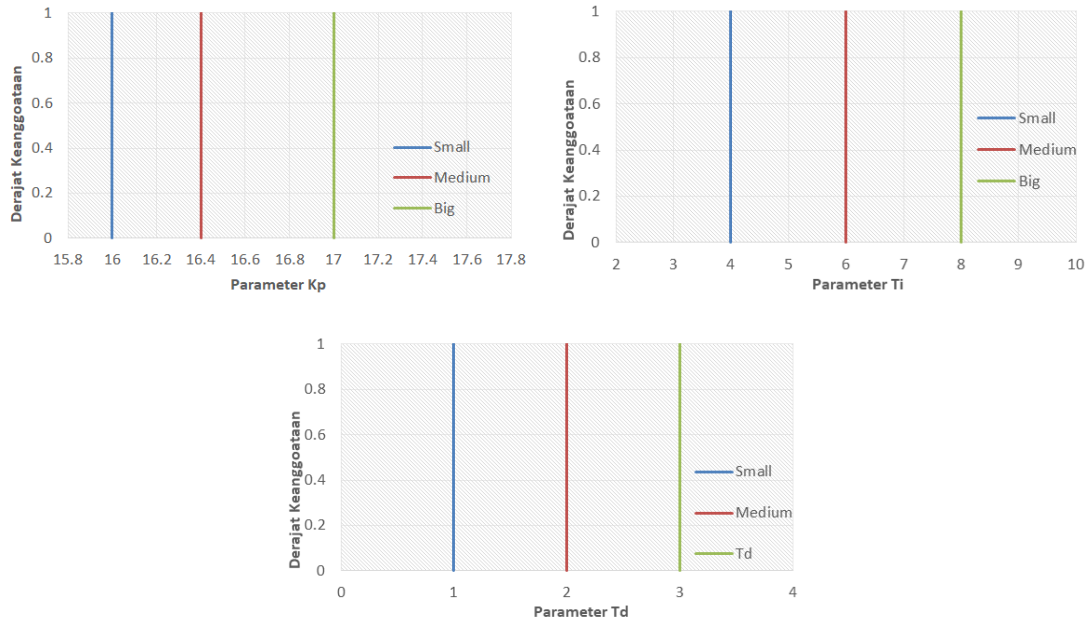
$$Derror = Error(t) - Error(t - 1) \tag{5}$$

Fungsi keanggotaan untuk masukan *error* dan *Derror* terdiri dari lima *set* himpunan fuzzy, yaitu *Negative Big* (NB), *Negative Small* (NS), *Zero* (ZE), *Positive Small* (PS), dan *Positive Big* (PB). Rentang untuk masukan *Error* adalah antara -100 hingga 100 dalam rpm, sedangkan untuk masukan *Derror* adalah antara -60 hingga 60 dalam rpm.



Gambar 4. Fungsi keanggotaan masukan *Error* (kiri) dan *Derror* (kanan).

Untuk keluaran dari fuzzy ΔKp , ΔTi , dan ΔTd , terdapat tiga *set* himpunan fuzzy yang digunakan, yaitu *Small*, *Medium*, dan *Big* seperti ditunjukkan pada Gambar 5. Pada Tabel 2 ditunjukkan basis aturan logika yang digunakan sebagai dasar pengendalian AFPID. Sebagai contoh aturan pertama menyatakan jika *input Error* adalah NB (*Negative Big*) dan *input Derror* adalah NB (*Negative Big*), maka *output1* (ΔKp) adalah S (*small*), *output2* (ΔTi) adalah S (*small*), dan *output3* (ΔTd) adalah S (*small*). Terdapat 25 basis aturan jika-maka dimana jumlah aturan ini didasarkan sesuai dengan jumlah fungsi keanggotaan pada masing-masing *input*.



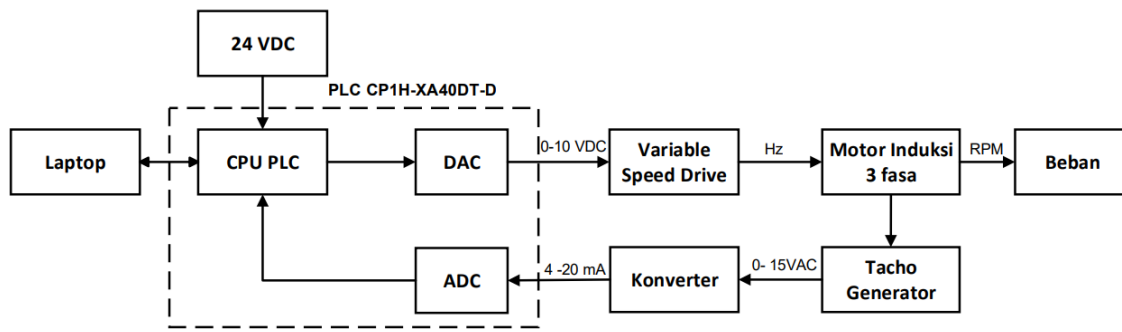
Gambar 5. Fungsi keanggotaan keluaran ΔKp , ΔTi , dan ΔTd .

Tabel 2. Basis aturan fuzzy pada pengendali AFPID.

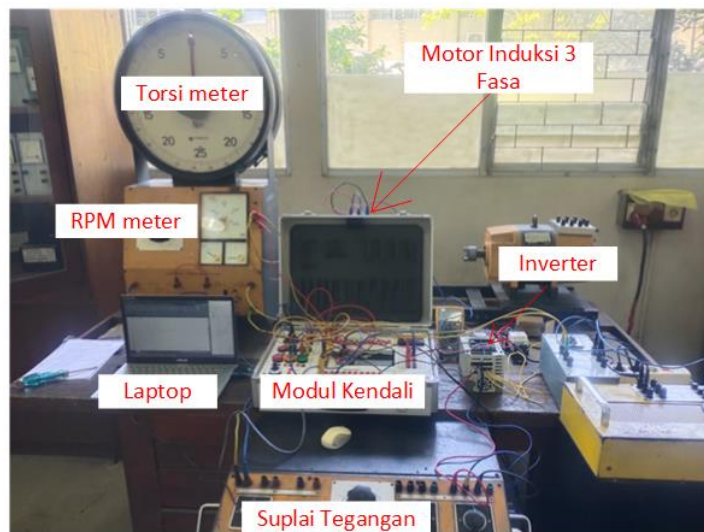
ΔKp ΔTi ΔTd	$\Delta Error$					
	NB	NS	ZE	PS	PB	
<i>Error</i>	NB	S	S	M	B	B
		S	S	S	B	B
		S	M	M	M	B
	NS	S	S	M	B	B
		S	M	M	S	S
		S	M	M	S	S
	ZE	B	M	M	M	S
		B	M	M	M	S
		M	M	M	M	M
	PS	S	S	M	M	S
		S	S	M	M	B
		S	S	M	M	M
	PB	B	M	M	B	B
		B	M	S	B	B
		B	S	M	M	B

2.4. Perangkat Keras

Rancangan perangkat keras pada penelitian ini ditunjukkan pada Gambar 6. Sistem pengendalian kecepatan motor induksi 3-fasa menggunakan kontroler PLC Omron CP1H-XA40DT-D. PLC CP1H akan diprogram dengan pengendali AFPID pada *software* CX-Programmer. CP1H dilengkapi dengan modul ADC dan DAC untuk mengubah sinyal analog ke digital dan digital ke analog. VSD sebagai *driver* motor induksi 3-fasa yang mengatur frekuensi yang masuk ke motor. Motor induksi 3-fasa akan dikopel dengan generator sebagai pembebanan motor. *Tacho* generator berfungsi untuk membaca kecepatan motor dan keluaran *tacho* generator berupa tegangan AC sehingga digunakan konverter Autonics MT4Y-AV-43 untuk mengubah tegangan 0-15 VAC menjadi 4-20 mA dan dihubungkan ke PLC sebagai input analog PLC. Adapun realisasi dari rancangan tersebut ditunjukkan pada Gambar 7 dimana terdapat motor induksi 3-fasa sebagai *plant*. Unit pengendalian terdiri dari modul pengendalian motor listrik, motor induksi, inverter, *Tacho* generator, dan Torsi meter.



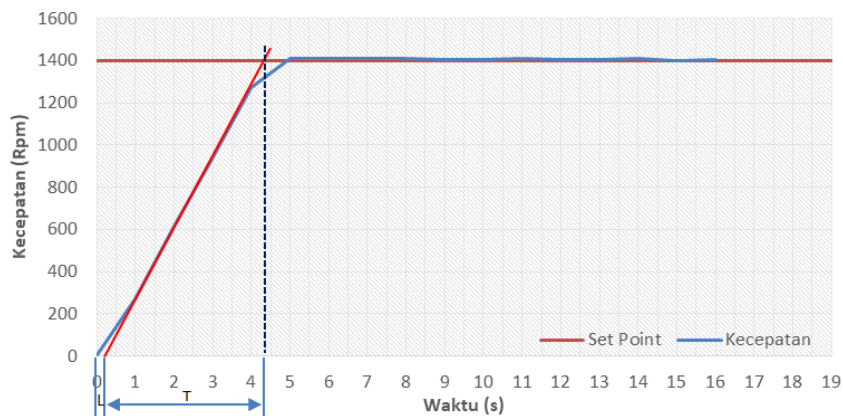
Gambar 6. Rancangan perangkat keras pengendalian kecepatan motor induksi 3-fasa.



Gambar 7. Realisasi perangkat keras pengendalian kecepatan motor induksi 3-fasa.

3. Hasil dan Pembahasan

Setelah melakukan tahap perancangan, selanjutnya dilakukan pengujian terhadap pengendalian sistem. Pengujian yang dilakukan melalui dua skenario, yaitu pengujian pengendali AFPID tanpa gangguan dan pengujian pengendali AFPID dengan gangguan. Sebelum dilakukan pengujian sistem, terlebih dahulu dilakukan penentuan konstanta PID sesuai dengan metode Ziegler-Nichols 1. Tahapan pengujian awal adalah dengan mendapatkan kurva respon lup terbuka berbentuk S seperti pada Gambar 8.



Gambar 8. Respon kecepatan lup terbuka.

Berdasarkan respon lup terbuka dari kecepatan, didapat nilai $L = 0,3$ s dan $T = 4,1$ s. Setelah mendapatkan nilai L dan T maka, nilai tersebut disubstitusikan kedalam persamaan yang tertera pada Tabel 1 sehingga menghasilkan nilai seperti pada Tabel 3.

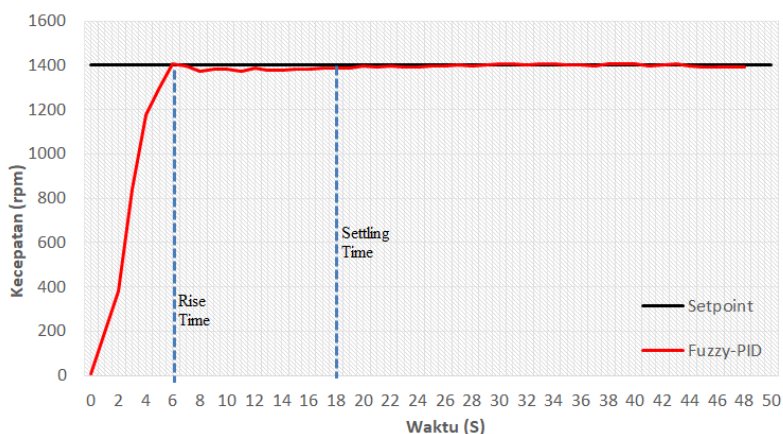
Tabel 3. Hasil tuning Ziegler–Nichols 1.

Jenis Pengendalian	Kp	Ti	Td
PID	16,4	0,6	0,15

Pada aplikasi Cx-Programmer, nilai parameter yang diperoleh perlu disesuaikan dengan sintaks pemrograman PID, nilai T_i dan T_d perlu dikalikan dengan 10. Dengan demikian, nilai parameter yang dimasukkan ke dalam program adalah $K_p = 16,4$, $T_i = 6$, dan $T_d = 1,5$. Nilai parameter ini akan menjadi dasar dalam menentukan konsekuensi pada pengendalian AFPID.

3.1. Pengujian Pengendali AFPID Tanpa Gangguan

Pengujian pengendalian kecepatan tanpa gangguan dilakukan untuk melihat kinerja transien dari respon kecepatan motor induksi 3-fasa. Hasil pengujian pada skenario pertama ini dapat dilihat pada Gambar 9.



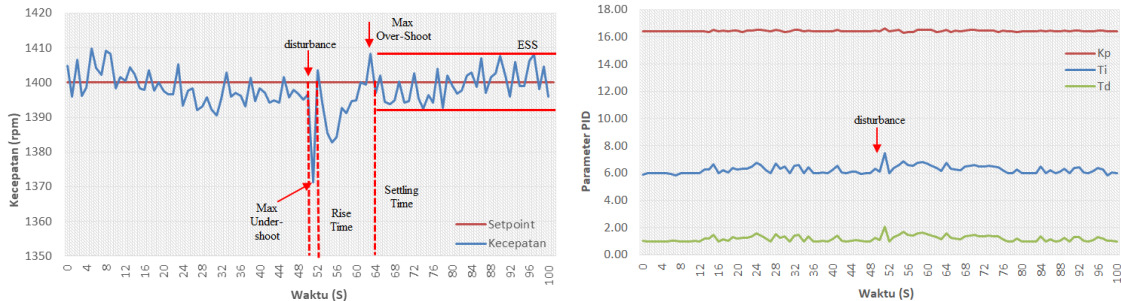
Gambar 9. Respon kecepatan motor induksi 3-fasa dengan pengendali AFPID tanpa gangguan.

Berdasarkan hasil pengujian terlihat bahwa kecepatan motor telah mencapai nilai *setpoint* yang diinginkan yaitu 1400 rpm. Pada kendali AFPID *rise time* yang dibutuhkan adalah sekitar 6 detik, terdapat *overshoot* sebesar 0,41%, dan *settling time* yang dibutuhkan adalah sekitar 18 detik. Setelah melalui periode *transient*, pengendali AFPID berhasil menjaga kecepatan sistem tetap pada nilai yang diinginkan 1400 rpm dengan *error steady state* sebesar 0,64%.

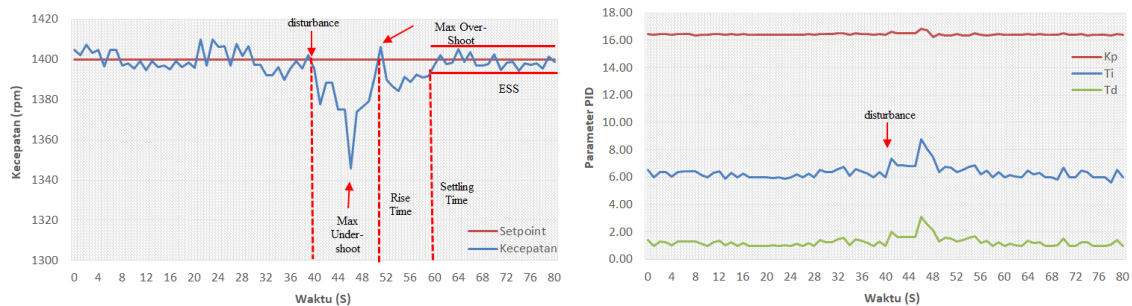
3.2. Pengujian Pengendali AFPID Dengan Gangguan

Selanjutnya adalah pengujian dengan gangguan yang dilakukan untuk mengetahui kinerja dan efektivitas dari kendali AFPID saat diberi kondisi gangguan berupa pembebanan yang bervariasi. Pengujian dilakukan dengan cara memberikan beban sebesar 5 Nm dan 9 Nm pada saat kecepatan berada pada kondisi *steady state*. Hasil pengujian respon kecepatan dan perubahan konstanta PID saat beban 5 Nm dapat dilihat pada Gambar 10, sedangkan hasil pengujian respon kecepatan dan perubahan konstanta PID saat beban 9 Nm dapat dilihat pada Gambar 11. Berdasarkan hasil pengujian terlihat bahwa kecepatan mengalami penurunan sebesar 2,05% ketika diberi beban 5 Nm pada detik ke-50. Namun kecepatan dapat kembali ke *set point* dalam waktu 14 detik dengan *error steady state* sebesar 0,57%. Parameter PID juga mampu merespon gangguan yang diberikan. Parameter PID naik saat diberi gangguan dan menurun kembali hingga respon kecepatan kembali ke nilai *set point*. Hasil pengujian pada gangguan beban 9 Nm menunjukkan pada detik ke-40 terlihat bahwa kecepatan menurun

sebesar 3,88%. Namun, pengendali AFPID dapat mengembalikan kecepatan pada *set point* dalam waktu 20 detik dengan *error steady state* sebesar 0,39%. Parameter PID juga dapat merespon gangguan dengan menaikkan nilai parameter selama proses *settling time* dan dapat kembali turun saat kecepatan sudah mencapai nilai *steady state*.



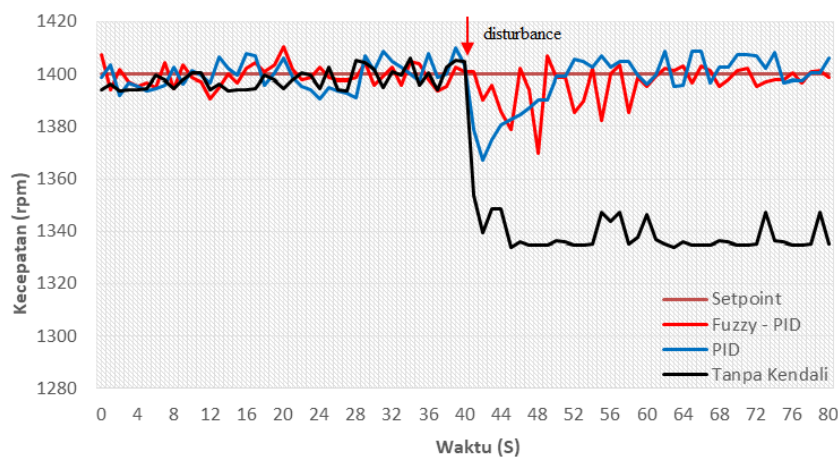
Gambar 10. Respon kecepatan saat diberi gangguan beban 5 Nm (kiri) dan perubahan konstanta PID-nya (kanan).



Gambar 11. Respon kecepatan saat diberi gangguan beban 9 Nm (kiri) dan perubahan konstanta PID-nya (kanan).

3.2. Perbandingan Pengujian Pengendali AFPID Dengan Gangguan Terhadap Pengendali PID dan Tanpa Pengendali

Selanjutnya adalah perbandingan terhadap kinerja sistem dengan tiga jenis pengendalian: tanpa kendali, kendali PID, dan kendali AFPID. Dalam ketiga pengujian tersebut, lima parameter dibandingkan, *rise time*, *settling time*, *over-shoot*, *under-shoot*, dan *error steady state*. Pengujian dilakukan dengan memberikan gangguan pembebanan sebesar 6 Nm. Hasil pengujian dapat ditunjukkan seperti pada Gambar 12.



Gambar 12. Perbandingan respon pengendalian dengan beban 6 Nm terhadap pengendali PID dan tanpa kendali.

Berdasarkan hasil perbandingan pengujian, dapat dilihat bahwa pengendalian AFPID memiliki keunggulan dibandingkan dengan pengendali PID dan tanpa kendali dimana respon kecepatan dengan pengendali AFPID mampu mengembalikan kondisi *steady state* lebih cepat. Hal ini dibuktikan dengan pengukuran kinerja respon seperti pada Tabel 4.

Tabel 4. Perbandingan kriteria unjuk kerja pengendali.

<i>Time Characteristics</i>	<i>Rise time (s)</i>	<i>Settling time (s)</i>	<i>Maximum Over-shoot (%)</i>	<i>Maximum Under-shoot (%)</i>	<i>Steady state error (%)</i>
<i>Controller</i>					
Tanpa Kendali	N/A	N/A	0,35	3,90	3,90
PID	9,67	23,11	0,70	2,25	0,59
AFPID	6,78	21,00	0,55	2,43	0,51

Hasil perbandingan unjuk kerja menunjukkan bahwa pengendalian AFPID lebih unggul dibandingkan pengendalian PID karena mengungguli empat parameter, yaitu *rise time*, *settling time*, *max over-shoot* dan *error steady state* pada skenario pembebanan 6 Nm.

4. Kesimpulan

Pengendalian kecepatan motor induksi 3-fasa dengan metode adaptif Fuzzy-PID telah berhasil dirancang dan diimplementasikan. Hasil pengujian menunjukkan bahwa kendali AFPID dapat menjaga kecepatan motor pada *set point* 1400 rpm untuk berbagai skenario gangguan pembebanan. Perbandingan dengan pengendalian lain secara keseluruhan menunjukkan bahwa pengendalian AFPID lebih unggul dibandingkan dengan pengendalian tanpa kendali maupun pengendalian PID. Dari lima parameter yang dibandingkan, pengendalian AFPID unggul dalam hal waktu pemulihan saat diberi gangguan sebesar 6 Nm. Penelitian selanjutnya dapat dikembangkan metode lainnya agar dihasilkan kinerja pengendalian yang lebih optimal.

Ucapan Terima Kasih

Tim peneliti mengucapkan terima kasih kepada P3M Politeknik Negeri Bandung atas pendanaan penelitian melalui skema Penelitian Peningkatan Kapasitas Laboratorium dengan Nomor Kontrak B/94.35/PL1.R7/PG.00.03/2023.

Referensi

- [1] A. F. Abouzeid, J. M. Guerrero, A. Endemaño, I. Muniategui, D. Ortega, I. Larrazabal, and F. Briz, "Control Strategies for Induction Motors in Railway Traction Applications," *Energies*, vol. 13, no. 3, pp. 1–22, 2020.
- [2] I. Roza, F. I. Pasaribu, A. Yanie, A. Almi, and T. Sinaga, "Analisa Pengaruh Penggunaan VSD (*Variable Speed Drive*) Pada Konsumsi Energi Di PT. Lestari Alam Segar," *RELE (Rekayasa Elektrikal dan Energi)*, vol. 4, no. 1, pp. 27–34, 2021.
- [3] A. A. Al-Manfi, "Implementation of Remote Self-Tuning Fuzzy PID Controller for Induction Motor Through Ethernet," *Journal of Electrical System*, vol. 15, no. 1, pp. 17–29, 2019.
- [4] A. Supardi, U. Umar, I. Setiyoko, and M. Saifurrohman, "Rancang Bangun Sistem Kendali Dan Monitoring Kecepatan Motor Induksi Berbasis Programmable Logic Controller (PLC) Dilengkapi Layar Sentuh," *Emitor Jurnal Teknik Elektro*, vol. 22, no. 1, pp. 65–72, 2022, doi: 10.23917/emitor.v22i1.15784.
- [5] M. A. Hannan, J. A. Ali, A. Mohamed, and A. Hussain, "Optimization techniques to enhance the performance of induction motor drives: A review," *Renewable Sustainable Energy Review*, vol. 81, no. 2, pp. 1611–1626, 2018, doi: 10.1016/j.rser.2017.05.240.
- [6] F. Wang, Z. Zhang, X. Mei, J. Rodríguez, and R. Kennel, "Advanced control strategies of induction machine: Field oriented control, direct torque control and model predictive control," *Energies*, vol. 11, no. 1, pp. 1–13, 2018, doi: 10.3390/en11010120.

- [7] A. N. Abdullah and M. H. Ali, "Direct torque control of im using PID controller," *International Journal of Electrical and Computer Engineering*, vol. 10, no. 1, pp. 617–625, 2020, doi: 10.11591/ijece.v10i1.pp617-625.
- [8] M. S. A. Sari, H. Suyono, and A. Lomi, "Analysis of 3 Phase Induction Motor Speed Control with Direct Torque Control (DTC) Method Based on PID Control," *Jurnal Ecotipe (Electronic, Control, Telecommunication, Information, Power Engineering)*, vol. 7, no. 2, pp. 70–77, 2020, doi: 10.33019/jurnalecotipe.v7i2.1476.
- [9] M. Yusuf and A. Rohman, "Pengendalian Kecepatan Motor Induksi 3 Fasa menggunakan PLC Omron CP1E dengan Kontrol Proposional," *Jurnal Ecotipe (Electronic, Control, Telecommunication, Information, Power Engineering)*, vol. 7, no. 2, pp. 92–98, 2020, doi: 10.33019/jurnalecotipe.v7i2.1465.
- [10] M. Yusuf and A. Rohman, "Implementation of communication system between Siemens PLC S7-1200 with Omron PLC CP1L-EL20DT1-D for induction motor speed controller," in *International Conference on Applied Science and Technology*, pp. 24–25, 2019.
- [11] 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, <https://doi.org/10.35313/irwns.v11i1.1965>.
- [12] T. Wang, H. Wang, H. Hu, X. Lu, and S. Zhao, "An adaptive fuzzy PID controller for speed control of brushless direct current motor," *SN Applied Science*, vol. 4, no. 3, pp. 1–16, 2022, doi: 10.1007/s42452-022-04957-6.
- [13] X. Wu, J. Wu, and D. Li, "Designation and Simulation of Environment Laboratory Temperature Control System Based on Adaptive Fuzzy PID," in *Proceedings of 2018 IEEE 3rd Advanced Information Technology, Electronic and Automation Control Conference, IAEAC, 2018*, no. 3, pp. 583–587. doi: 10.1109/IAEAC.2018.8577618.
- [14] K. S. Devi, R. Dhanasekaran, and S. Muthulakshmi, "Improvement of speed control performance in BLDC motor using fuzzy PID controller," *Proc. 2016 International Conference on Advanced Communication Control and Computing Technology (ICACCCT) 2016*, no. 1, pp. 380–384, 2017, doi: 10.1109/ICACCCT.2016.7831666.
- [15] S. V. K. Arun, U. Subramaniam, S. Padmanaban, M. S. Bhaskar, and D. Almakhlis, "Investigation for performances comparison PI, adaptive PI, fuzzy speed control induction motor for centrifugal pumping application," *International Conference on Compability, Power Electronics and Power Engineering (CPE-POWERENG)*, vol. 13, no. 1, pp. 1–6, 2019, doi: 10.1109/CPE.2019.8862351.