

Desain *Variable Frequency Drive* untuk Peningkatan Efisiensi Motor Kompresor dengan Metode PID PT INKA Multi Solusi

Inkha Dartanti¹, Gatut Budiono², Puji Slamet³,
Reza Sarwo Widagdo⁴, Aris Heri Andriawan⁵
^{1,2,3,4,5}Jurusan Teknik Elektro, Universitas 17 Agustus 1945 Surabaya
Jl. Semolowaru 45 Surabaya 60118
Telp. (031)5931800, Fax.(031)5927871
E-mail: idartanti@gmail.com

ABSTRAKS

Dengan semakin majunya dunia industri, penggunaan motor sebagai penggerak utama menjadi semakin penting mengikuti kebutuhan yang beragam. Dalam pengujian AC PNR (Air Conditioning Philippine National Railway), *Variable Frequency Drive* (VFD) digunakan sebagai *catu daya*. Namun, penggunaan VFD juga menghadapi beberapa permasalahan, seperti *trip akibat arus berlebih* dan *pemborosan energi*. Untuk itu, pengujian VFD dilakukan dengan metode *open loop* (tanpa kontrol PID) dan *close loop* (dengan kontrol PID) menggunakan program Simulink MATLAB untuk mengukur efisiensi. Hasil penelitian menunjukkan bahwa pada pengujian *open loop* dengan input frekuensi 60Hz, didapatkan daya motor induksi tiga phase sebesar 683,4 kW dengan output frekuensi 14,93Hz. Sementara pada pengujian *close loop* dengan input frekuensi 60 Hz diperoleh daya sebesar 5.181 kW dengan output frekuensi 58,63Hz. Perbandingan efisiensi antara model *open loop* VFD dan *close loop* VFD dengan kontrol PID adalah sekitar 7,56% dan 64,41% masing-masing. Hal ini menunjukkan bahwa penggunaan kontrol PID pada model *close loop* VFD memungkinkan sistem untuk lebih efisien dalam menghasilkan daya output yang sesuai dengan kebutuhan, jika dibandingkan dengan model *open loop* VFD yang tidak menggunakan umpan balik atau kontrol PID.

Kata Kunci: Close Loop, Efisiensi, Open Loop, PID, Variable Frequency Drive

1. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Kemajuan teknologi transportasi semakin pesat dengan berbagai jenis transportasi yang tersedia, termasuk transportasi darat, laut, dan udara, yang semuanya mempermudah pergerakan manusia. Persaingan antara penyedia jasa transportasi mendorong pengembangan kendaraan yang dapat menampung penumpang dengan kapasitas yang semakin meningkat, tanpa mengabaikan aspek keamanan dan kenyamanan. Di Indonesia, kereta api adalah salah satu bentuk transportasi umum yang paling banyak digunakan, seperti yang terlihat dari peningkatan jumlah penumpang sebesar 86,87% antara Januari hingga November 2022 dibandingkan dengan periode yang sama tahun sebelumnya [1]. PT INKA Multi Solusi, anak perusahaan dari PT INKA, memproduksi komponen atau suku cadang kereta api dan produk transportasi darat untuk mendukung industri perkeretaapian Indonesia. Perusahaan ini telah membuat terobosan dengan memproduksi 15 unit AC PNR melalui *Strategic Business Unit Air-Conditioning* (SBU AC), yang diekspor ke Filipina. Namun, produk ini membutuhkan tegangan dan frekuensi yang berbeda dengan standar PLN di Indonesia [2]. Produk AC PNR diekspor ke Filipina

oleh PT INKA Multi Solusi dan membutuhkan tegangan 440 VAC dan frekuensi 60 Hz. Di dunia industri, VFD digunakan untuk mengubah tegangan dan frekuensi peralatan listrik, dengan fungsi utama dalam aplikasi untuk penghematan energi, kecepatan pengurangan 20% dapat menghemat energi hingga 50% [3]. VFD memainkan peran penting sebagai sumber daya dalam pengujian AC PNR dengan mengonversi arus dari sumber menjadi tegangan, arus, dan frekuensi yang tepat untuk memberikan daya pada beban. Namun, dalam pengoperasiannya, ada beberapa masalah yang muncul dalam penggunaan VFD, seperti *trip akibat arus yang terlalu tinggi* dan perubahan temperatur.

2. TINJAUAN PUSTAKA

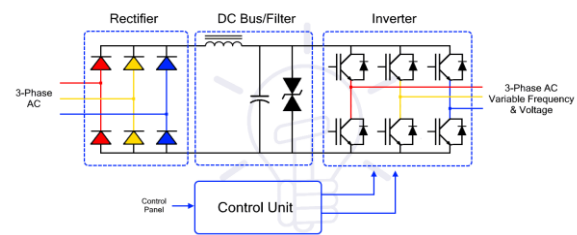
2.1 *State of The Art*

Motor induksi merupakan jenis mesin yang secara luas digunakan dalam berbagai aplikasi industri, otomasi proses, dan sistem HVAC. Namun, motor induksi memiliki kecepatan tetap saat terhubung langsung ke suplai listrik AC. Oleh karena itu, penting untuk merancang sistem penggerak yang mampu menghasilkan kecepatan variabel sesuai dengan kebutuhan aplikasi. Untuk memenuhi kebutuhan ini, Ghulam Akbar, Mahnoor Mughal dan

S.S.H. Bukhari [4], merancang *Variable Frequency Drive* yang memungkinkan pengaturan kecepatan sesuai dengan perubahan beban. VFD tidak hanya mengendalikan kecepatan motor induksi, tetapi juga meningkatkan efisiensi dengan mengurangi lonjakan arus awal dan meningkatkan faktor daya. Akibatnya, konsumsi energi juga berkurang. Dalam penelitian ini, telah dirancang dan dianalisis model MATLAB/Simulink dari sistem penggerak dalam mode loop terbuka, dan kemudian desain perangkat keras eksperimental di implementasikan. Kesimpulannya, desain VFD dengan menggunakan teknik SPWM terbukti hemat energi dan merupakan pendekatan yang paling dapat diandalkan untuk mengendalikan kecepatan motor induksi tiga fasa bersama dengan *startup* yang lancar dan manfaat penghematan energi. VFD telah terbukti menjadi sistem yang efektif, seperti pada sistem konveyor di industri manufaktur, pabrik semen, kompresor di industri minyak dan gas, dan sistem traksi, dll. Selain desain perangkat keras, simulasi perangkat lunak juga dilakukan untuk memverifikasi hasil proyek dengan menggunakan MATLAB/Simulink 2018, terutama dalam pembuatan sirkuit SPWM dan inverter dari simulasi perangkat lunak. VFD dapat mengontrol kecepatan motor sesuai dengan beban yang diperlukan sehingga konsumsi energi dapat dikurangi. Dan juga memberikan kontrol dalam proses *start* dan *stop* motor. Penelitian ini memberikan rekomendasi model *close-loop* PID atau PI *Controller*. Penggunaan model *close-loop* dapat meningkatkan efisiensi dan kinerja motor induksi tiga *phase*.

2.2 Variable Frequency Drive (VFD)

Di sektor industri, kemajuan yang pesat terjadi dalam penggunaan *frequency converter* atau *Variable Frequency Drive* (VFD). *Variable Frequency Drive* (VFD) adalah sebuah perangkat pengendali yang mengatur kecepatan motor dengan mengubah frekuensi dan tegangan motor induksi. Pengendalian kecepatan ini juga dikenal dengan berbagai nama lain seperti *Variable Speed Drive* (VSD), *Adjustable Speed Drive* (ASD), dan *Variable Voltage Variable Frequency Drive* (VVVF) [5]. Secara prinsip, konsepnya cukup sederhana, yaitu mengubah frekuensi stabil dari sumber listrik AC menjadi frekuensi yang dapat bervariasi dengan mengubahnya menjadi tegangan DC terlebih dahulu. Setelah itu, tegangan DC tersebut diubah kembali menjadi tegangan AC dengan frekuensi yang diinginkan [6].



Gambar 1. Skema umum rangkaian VFD.

Gambar 1. menjelaskan prinsip dasar yang mendasari operasi VFD. Prinsip-prinsip tersebut meliputi Rectifier, DC Bus, dan Inverter. Rectifier digunakan untuk mengubah tegangan AC tiga fasa menjadi tegangan DC. Tegangan AC tiga fasa dikirimkan ke rectifier yang terdiri dari sekelompok dioda. Penyearah *solid-state* gelombang penuh mengubah daya 50 Hz dari tegangan standar 380, 460, 575 Volt atau suplai dengan kebutuhan yang lebih tinggi menjadi tegangan DC tetap atau dapat disesuaikan. *DC Bus* atau *DC Link* digunakan untuk menyaring dan menyimpan daya DC yang diambil oleh inverter. Fungsi utama dari filter ini adalah untuk menghilangkan riak dari output DC penyearah yang berdenyut. Inverter mengambil tegangan dari bus DC dan menggunakan teknik *Pulse Width Modulation* (PWM) untuk menghasilkan sinyal yang menghasilkan gelombang AC untuk motor. Bagian inverter terdiri dari enam IGBT yang berperan sebagai komponen inti dari inverter. Biasanya, inverter menggunakan perangkat semikonduktor *switching* berkecepatan tinggi seperti IGBT.

2.3 Motor Induksi

Motor induksi tiga fasa sering digunakan sebagai penggerak dalam peralatan yang membutuhkan kecepatan yang konstan. Namun, motor dengan kecepatan konstan tersebut cenderung memiliki konsumsi daya yang lebih tinggi dan dapat menyia-nyaiakan energi listrik secara tidak efisien [7]. Salah satu kekurangan utama motor induksi tiga fasa adalah arus *starting* yang tinggi dan torsi awal yang rendah [8]. Terdapat dua jenis motor induksi, yaitu motor induksi satu fasa dan tiga fasa, keduanya memiliki prinsip kerja yang serupa, yaitu melalui induksi medan putar pada kumparan utama (stator) yang memotong rotor dan menghasilkan induksi pada rotor [9].

2.4 PID (Proportional, Integral dan Derivative)

PID adalah sebuah kontroler yang terdiri dari tiga komponen utama, yaitu Proporsional, Integral, dan Derivatif [10]. Ketiga komponen ini bekerja bersama-sama untuk mencapai respons luaran yang optimal. Proporsional memberikan tanggapan yang cepat terhadap sinyal kesalahan (*error*) dan berperan penting dalam fase transisi. Integral berperan dalam menjaga stabilitas sinyal pada fase *steady state*. Sementara itu, Derivatif berfungsi untuk meratakan tugas proporsional. PID efektif digunakan dalam

sistem yang linear, tetapi efektivitasnya menurun ketika dihadapkan pada sistem yang non-linear.

2. 4. 1 Sistem Kontrol Open-Loop

Sistem kontrol loop terbuka adalah sistem yang tidak melibatkan umpan balik. Sinyal masukan diberikan kepada kontroler yang menghasilkan sinyal penggerak, yang kemudian mengendalikan proses yang ingin dikendalikan, dengan tujuan menghasilkan output yang diinginkan [11]. Metode *open loop* tanpa kontrol PID adalah suatu teknik pengendalian yang dilakukan tanpa adanya umpan balik dari sistem yang diatur. Teknik ini hanya mengandalkan perhitungan matematis atau pengaturan manual untuk menghasilkan sinyal kendali yang sesuai dengan kondisi yang diinginkan.

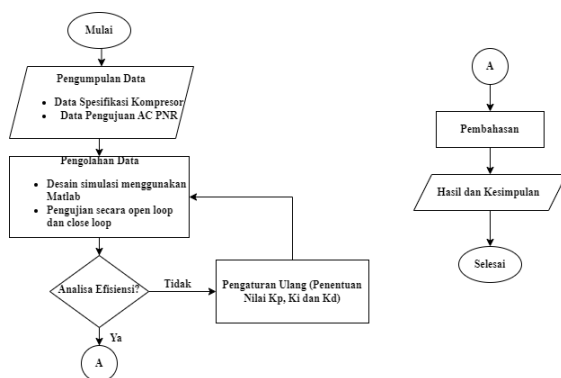
2. 4. 2 Sistem Kontrol Close-Loop

Sistem kontrol tertutup melibatkan penggunaan umpan balik (*feedback*), di mana output yang dihasilkan diukur dan dibandingkan dengan input yang dimasukkan ke dalam sistem. Perbedaan antara output dan input tersebut disebut sebagai umpan balik. Untuk mengurangi kesalahan, sinyal umpan balik akan dikirim ke komponen pengendali (*controller*) sehingga nilai output sistem semakin mendekati nilai yang diinginkan. Salah satu metode umpan balik yang umum digunakan dalam kontrol sistem adalah kontrol PID (*Proportional Integral Derivative*). Metode ini melibatkan tiga parameter yang perlu ditentukan, yaitu K_p (konstanta proporsional), K_i (konstanta integral), dan K_d (konstanta diferensial), yang dapat diatur dengan metode tuning.

3. METODE PENELITIAN

3. 1 Diagram Alir Penelitian

Tahapan penelitian ditampilkan pada diagram alir. Diagram alir digunakan untuk analisis, desain, dokumentasi, dan manajemen selama proses penelitian.



Gambar 2. Diagram Alir Penelitian

Gambar 2. menggambarkan langkah-langkah dan proses penelitian yang dilakukan untuk mencapai kesimpulan akhir. Sebelumnya, peneliti telah melakukan studi literatur dengan melakukan

tinjauan pustaka terhadap sumber-sumber bacaan yang relevan. Hal ini dilakukan untuk mempelajari dan memahami tentang frekuensi dan efisiensi konverter frekuensi (VFD), perhitungan, dan teori yang mendukung.

3. 2 Data Pengukuran

Pengukuran data yang relevan dilakukan untuk pembahasan penelitian tugas akhir.

Tabel 1. Data Pengujian AC PNR.

Component	Item	Voltage (V)	Item	Current (A)
Compresor	U-V	435	U	15.5
	V-W	435	V	15.3
	U-W	436	W	14.3

Tabel 1. menjelaskan hasil pengujian yang dilakukan pada AC PNR (ACI-4501). Pengumpulan data dilakukan pada bulan Agustus saat mesin-mesin mulai dioperasikan. Data tegangan diukur menggunakan *multimeter*, sedangkan data arus diukur menggunakan *clamp meter*.

Tabel 2. Data Kompressor.

Model	ZRH100KTE-TFD
Maker	Emerson
Voltage (V)	460 V, 3-Phase
Frequency (Hz)	60 Hz
Cooling Capacity (kW)	29.60 kW
Current (A)	13.93 A
Maximum Operating Current (A)	17.7 A
Power (kW)	9.11 kW
Capacity (Watts)	29600 Watts
COP	3.25
RPM	3500
Pole	2

Tabel 2. menjelaskan mengenai spesifikasi kompressor yang digunakan dalam komponen AC PNR (ACI-4501). Data tersebut menunjukkan kinerja titik operasi yang ditentukan pada 60Hz. Pengambilan data dilakukan di PT INKA Multi Solusi yang berada di Kabupaten Madiun, Jawa Timur. Data ini akan digunakan untuk penentuan parameter simulasi menggunakan Matlab Simulink.

3.3 Persamaan

Dalam penelitian ini digunakan persamaan sebagai berikut:

- Daya Listrik
Daya sendiri dapat didefinisikan sebagai gaya atau jumlah pekerjaan yang dapat dilakukan dalam suatu interval waktu tertentu, dan dapat dihitung menggunakan persamaan berikut:

$$P = V \times I \quad (1)$$

Dimana P merupakan daya (Watt), V adalah tegangan (Volt), dan I adalah arus (Amper). Untuk perhitungan daya pada motor induksi tiga fasa, rumus yang digunakan adalah sebagai berikut:

$$P = \sqrt{3} \times V \times I \times \text{Cos } \varphi \quad (2)$$

Dimana P adalah Daya (Watt), $\sqrt{3}$ adalah konstanta, V adalah tegangan, I adalah Arus dan $\text{Cos } \varphi$ adalah 20actor daya.

- Efisiensi Motor
Efisiensi motor bisa dijelaskan sebagai rasio daya keluaran motor yang dihasilkan terhadap daya masukan di terminalnya. Rumusnya sebagai berikut [11].

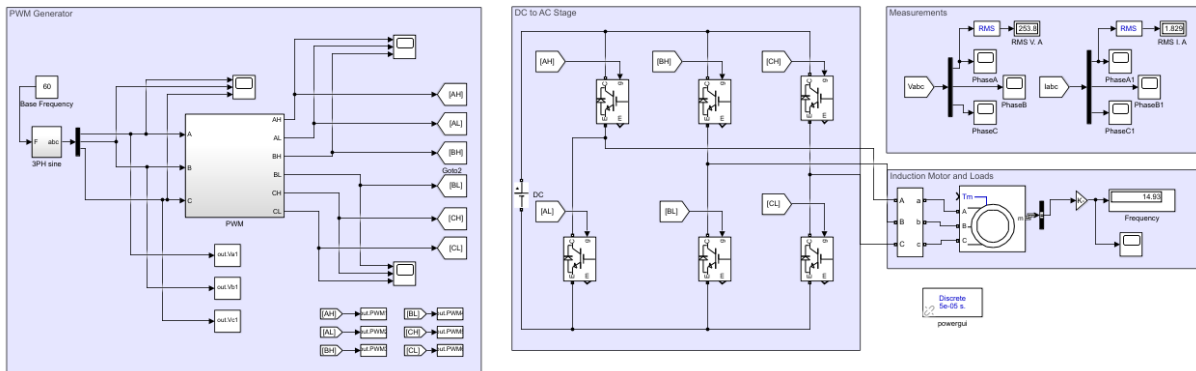
$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100\% \quad (3)$$

Dimana η adalah efisiensi motor (%), P_{out} adalah daya keluaran motor (Watt), dan P_{in} adalah daya masukan motor (Watt).

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Pengujian VFD Secara Open Loop

Pengujian open loop pada VFD berguna sebagai langkah awal untuk mengamati respons dasar motor terhadap perubahan frekuensi input dan mendapatkan pemahaman awal tentang karakteristik VFD dalam pengaturan operasi tertentu.



Gambar 3. Hasil Pengujian Open Loop.

Gambar 3. merupakan hasil simulasi dengan frekuensi input 60Hz, menunjukkan hasil pengukuran tegangan diketahui sebesar 253,8 V dan arus sebesar 1,829A yang diperoleh melalui simulasi tanpa menggunakan kontrol PID (open loop).

$$\begin{aligned} P_{out} &= \sqrt{3} \times V \times I \times \text{Cos } \varphi \quad (1) \\ (\text{without PID}) &= \\ &= \sqrt{3} \times 253,8 \times 1,829 \times 0,85 \\ &= 683,4 \text{ kW} \end{aligned}$$

Data hasil pengujian AC PNR menunjukkan bahwa tegangan untuk motor kompresor sebesar 435 Volt dengan arus sebesar 15 Ampere seperti yang ditunjukkan pada tabel 1. Untuk itu dapat diperoleh daya input dari motor kompresor.

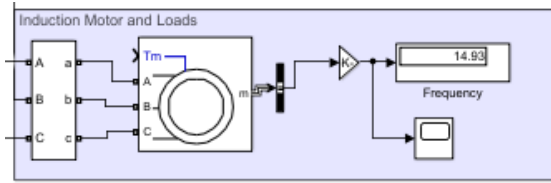
$$\begin{aligned} P_{in} &= \sqrt{3} \times V \times I \times \text{Cos } \varphi \quad (2) \\ &= \sqrt{3} \times 303,1 \times 13,04 \times 0,85 \\ &= 9.041 \text{ kW} \end{aligned}$$

Pada model Open Loop (tanpa kontrol) VFD, daya output adalah 683,4 kW dan daya input adalah

9.041 kW. Untuk itu dapat dihitung efisiensi model open loop.

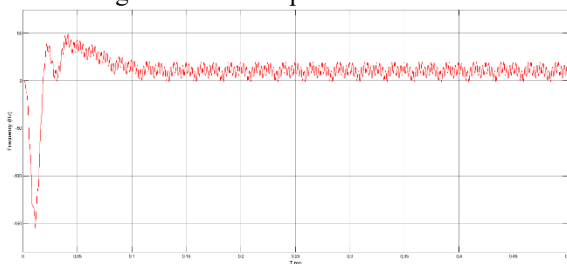
$$\begin{aligned} \eta_{\text{without PID}} &= \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100\% \quad (3) \\ &= \frac{683,4 \text{ kW}}{9.041 \text{ kW}} \times 100\% \\ &= 7,56\% \end{aligned}$$

Efisiensi model Open Loop VFD sebesar 7,56% mengindikasikan bahwa perbandingan antara daya output (683,4 kW) dengan daya input (9.041 kW) adalah relatif rendah. Hal ini menunjukkan bahwa dalam model Open Loop VFD, sebagian besar daya input tidak diubah menjadi daya output yang berguna, melainkan hilang dalam bentuk energi (drop tegangan) yang tidak termanfaatkan secara efisien.

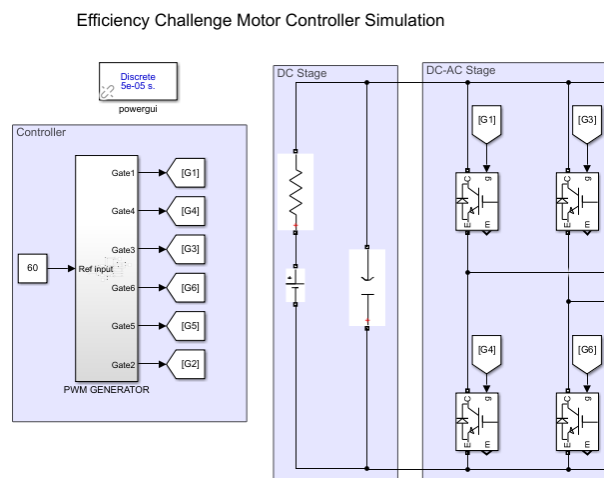


Gambar 4. Hasil Keluaran Frekuensi Open Loop.

Gambar 4. menunjukkan bahwa keluaran frekuensi sebesar 14,93Hz. Hal ini menunjukkan bahwa ada frekuensi yang terjadi dalam proses konversi sinyal oleh inverter. Dalam konteks *Variable Frequency Drive* (VFD), input frekuensi yang diberikan adalah frekuensi sinyal kontrol yang digunakan untuk mengendalikan kecepatan putar motor. Input frekuensi adalah 60 Hz, itu berarti sinyal kontrol diberikan dengan frekuensi 60 Hz. Dalam sistem open loop VFD, keluaran frekuensi yang dihasilkan oleh inverter dapat berbeda dari input frekuensi. Ini bisa terjadi karena adanya proses konversi frekuensi yang dilakukan oleh inverter untuk mengubah tegangan dan frekuensi input menjadi tegangan dan frekuensi keluaran yang sesuai untuk motor. Jika output frekuensi yang dihasilkan adalah 14,93 Hz, ini menunjukkan bahwa inverter mengubah frekuensi input 60 Hz menjadi frekuensi keluaran yang lebih rendah. Hal ini dapat digunakan untuk mengendalikan kecepatan motor sesuai dengan kebutuhan aplikasi.



Gambar 5. Gelombang keluaran frekuensi open loop.



Gambar 5. Hasil Pengujian Close Loop.

Gambar 6. menunjukkan hasil simulasi dengan frekuensi input 60Hz, menunjukkan hasil

Gambar 5. menunjukkan hasil simulasi tanpa menggunakan kontrol PID diperoleh respon yaitu nilai *steady state error* sebesar 66,7%. Respon sistem tidak mengalami *overshoot*. Dalam kondisi underdamped, respon sistem menunjukkan kecenderungan untuk berayun-ayun sebelum mencapai keadaan mantap. Waktu penyelesaian (*settling time*) sebesar 0,24 detik menggambarkan waktu yang diperlukan oleh sistem untuk mencapai keadaan mantap dengan toleransi yang telah ditentukan.

4.2 Pengujian Close Loop

Ada dua pilihan umum untuk mengubah tegangan AC menjadi DC, yaitu menggunakan *rectifier* (penyearah tak terkendali) atau *converter* (penyearah terkendali). Biasanya, dioda *rectifier* digunakan sebagai penyearah tak terkendali, tetapi ada juga yang menggunakan penyearah terkendali seperti *thyristor rectifier*. Setelah tegangan diubah menjadi DC, diperlukan perbaikan kualitas tegangan DC dengan menggunakan tapis kapasitor sebagai penstabil tegangan. Selanjutnya, tegangan DC dapat dikonversi kembali menjadi tegangan AC menggunakan inverter dengan menggunakan teknik *Pulse Width Modulation* (PWM). Penyesuaian parameter kontrol PID dilakukan melalui metode penyetelan manual. Proses penyetelan dimulai dengan memodifikasi nilai parameter P (Proporsional) sehingga respons sistem mendekati nilai set point yang diinginkan. Setelah melalui tahap penyetelan, didapatkan nilai parameter P sebesar 15. Selanjutnya, dilakukan penyetelan parameter I (Integral) agar sistem mencapai kondisi kesalahan mantap yang mendekati nol. Hasil dari penyetelan tersebut menunjukkan nilai parameter I sebesar 2. Nilai parameter D (Derivatif) sebesar 0,5. Penyetelan parameter kontrol PID membutuhkan waktu yang relatif lama guna mencapai respons sistem yang sesuai dengan kriteria.

pengukuran tegangan diketahui sebesar 303,1 V dan arus sebesar 13,04 A yang diperoleh melalui simulasi dengan menggunakan kontrol PID (close loop).

$$\begin{aligned} P_{\text{out}} &= \sqrt{3} \times V \times I \times \cos \varphi & (4) \\ \text{(with control)} &= \sqrt{3} \times 303,1 \times 13,04 \times 0,85 \\ &= 5.818 \text{ kW} \end{aligned}$$

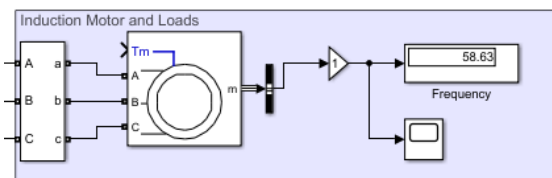
Data hasil pengujian AC PNR menunjukkan bahwa tegangan untuk motor kompresor sebesar 435 Volt dengan arus sebesar 15 Ampere seperti yang ditunjukkan pada tabel 1. Untuk itu dapat diperoleh daya input dari motor kompresor.

$$\begin{aligned} P_{\text{in}} &= \sqrt{3} \times V \times I \times \cos \varphi & (5) \\ &= \sqrt{3} \times 303,1 \times 13,04 \times 0,85 \\ &= 9.041 \text{ kW} \end{aligned}$$

Pada model Close Loop VFD dengan kontrol PID, daya output adalah 5.818 kW dan daya input adalah 9.041 kW. Untuk itu dapat dihitung nilai efisiensi close loop.

$$\begin{aligned} \eta \text{ with PID} &= \frac{P_{\text{out}}}{P_{\text{in}}} \times 100\% & (6) \\ &= \frac{5.818 \text{ kW}}{9.041 \text{ kW}} \times 100\% \\ &= 64,3 \% \end{aligned}$$

Efisiensi model Close Loop VFD dengan kontrol PID sebesar 64,41% menunjukkan bahwa sebagian besar daya input (9.041 kW) digunakan dengan lebih efisien untuk menghasilkan daya output yang diinginkan (5.818 kW). Dalam model ini, penggunaan kontrol PID memungkinkan sistem untuk melakukan penyesuaian yang tepat berdasarkan umpan balik dari sensor atau perangkat lainnya.

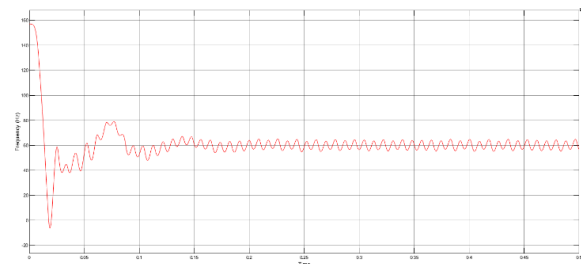


Gambar 7. Hasil keluaran frekuensi close loop.

Gambar 7. menunjukkan hasil simulasi secara close loop, keluaran frekuensi yang diperoleh adalah 58,63Hz. Hal ini menunjukkan bahwa sistem telah mendekati target frekuensi 60Hz, dengan selisih atau error yang relatif kecil antara *setpoint* dan keluaran yang dicapai. Penggunaan kontrol PID digunakan untuk mengoreksi perbedaan antara *setpoint* dan nilai aktual keluaran. Kontrol PID akan menghasilkan sinyal kontrol yang tepat berdasarkan

perbedaan tersebut untuk mengatur keluaran sistem dan mendekati frekuensi yang diinginkan.

Hasil simulasi dapat bervariasi tergantung pada parameter kontrol PID yang diatur, tuning yang dilakukan, karakteristik sistem, dan faktor lainnya. Jika output frekuensi yang diperoleh sudah mendekati *setpoint* dengan tingkat akurasi yang memadai, maka ini menunjukkan bahwa kontrol PID yang diterapkan berhasil dalam mencapai tujuan mengatur frekuensi motor kompresor menjadi 60Hz.



Gambar 8. Gelombang keluaran frekuensi close loop.

Gambar 8. menunjukkan hasil dari simulasi menggunakan kontrol PID pada VFD, diperoleh beberapa parameter respons yang menggambarkan kinerja sistem, diperoleh nilai *steady state error* sebesar 6,7%. Hal ini menunjukkan bahwa sistem memiliki sedikit perbedaan atau *error* antara *setpoint* (60Hz) dan nilai frekuensi aktual (58,63Hz) saat mencapai kestabilan. Semakin kecil nilai *steady state error*, semakin akurat sistem mencapai *setpoint* yang diinginkan. *Overshoot* sebesar 161%, nilai *overshoot* yang tinggi dapat mengindikasikan adanya kelebihan respons atau perbedaan yang signifikan pada awal respons yang kemudian diikuti oleh penurunan dan konvergensi ke *setpoint* yang diinginkan. Dalam simulasi ini, diperoleh *settling time* sebesar 0.25s. Angka ini menunjukkan bahwa sistem mencapai nilai frekuensi yang stabil atau berada dalam toleransi tertentu dari *setpoint* (60 Hz) dalam waktu 0.25 detik setelah respons awal. *Rise time* adalah waktu yang diperlukan oleh sistem untuk mencapai nilai antara 10% hingga 90% dari *setpoint*. Dalam hasil simulasi, diperoleh *rise time* sebesar 0. Hal ini menunjukkan bahwa sistem mencapai 90% dari *setpoint* (54Hz).

5. KESIMPULAN

Dari hasil pengujian simulasi VFD pada motor kompresor dengan metode open loop dan close loop menghasilkan beberapa kesimpulan, di antaranya:

1. Hasil simulasi menunjukkan perbandingan kinerja antara sistem open loop dan close loop saat frekuensi input adalah 60Hz. Pada sistem open loop, frekuensi keluaran yang tercapai adalah 14,93Hz, sementara pada sistem close loop, frekuensi keluaran mencapai 58,63Hz. Hal ini menunjukkan bahwa sistem close loop dapat lebih efektif dalam mengikuti frekuensi input yang diinginkan dibandingkan dengan sistem

open loop. Secara keseluruhan, hasil simulasi menunjukkan bahwa sistem close loop memiliki keunggulan dalam frekuensi keluaran yang lebih dekat dengan frekuensi input, daya keluaran yang lebih tinggi, *steady state error* yang lebih rendah, serta dan respons yang lebih stabil.

2. Efisiensi sistem close loop jauh lebih tinggi daripada sistem open loop. Efisiensi open loop mencapai 7,56%, sedangkan efisiensi close loop mencapai 64,3%. Perbedaan ini menunjukkan bahwa sistem close loop lebih efisien dalam mengubah input menjadi output yang diinginkan. Ini menandakan bahwa penggunaan sistem close loop dapat memberikan keuntungan dalam hal penggunaan energi yang lebih efisien dan peningkatan kinerja sistem secara keseluruhan.

(AUTOMATIC RUBBER TYRE GANTRY) CRANE,”
2021.

PUSTAKA

- [1] “Badan Pusat Statistik.”
<https://www.bps.go.id/indicator/17/72/1/jumlah-penumpang-kereta-api.html> (accessed May 14, 2023).
- [2] O. S. Yude, “RANCANG BANGUN PERALATAN KONVERTER AC-AC TIGA FASA BERBASIS ATMEGA8535,” *Tek. Elektro Ind.*, vol. 1, no. 3, Art. no. 3, Nov. 2013, Accessed: May 14, 2023. [Online]. Available: <https://ejournal.unp.ac.id/students/index.php/tei/article/view/886>
- [3] P. Shinde, R. Burungale, P. Kale, and P. Jain, “Speed Control of Induction Motor by Using Variable Frequency Drive,” vol. 4, no. 4, 2014.
- [4] faculty of Electrical (Power) Engineering at Sukkur IBA University, Sindh Pakistan *et al.*, “MATLAB /Simulink Modelings and Experimental Design of Variable Frequency Drive for Speed Control of Three-Phase Induction Motor,” *Int. J. Recent Technol. Eng. IJRTE*, vol. 8, no. 2, pp. 3046–3052, Jul. 2019, doi: 10.35940/ijrte.B3068.078219.
- [5] N. John, R. Mohandas, and S. C. Rajappan, “Energy Saving Mechanism Using Variable Frequency Drives,” *Int. J. Emerg. Technol. Adv. Eng.*, vol. 3, no. 3, 2013.
- [6] D. A. Suwenda and P. Slamet, “PENERAPAN VARIABLE FREQUENCY DRIVE PADA MOTOR FAN COOLING TOWER UNTUK EFISIENSI TENAGA LISTRIK DI PT JAPFA COMFEED INDONESIA,” vol. 4, 2022.
- [7] Atmam, A. Tanjung, and Zulfahri, “Analisis Penggunaan Energi Listrik Motor Induksi Tiga Fasa Menggunakan Variable Speed Drive (VSD),” *SainETIn*, vol. 2, no. 2, pp. 52–59, Nov. 2018, doi: 10.31849/sainetin.v2i2.1218.
- [8] Sofyar, E. Firmansyah, and Suharyanto, “Smart Control Distribusi Air Menggunakan Variable Frequency Drive,” 2016. [Online]. Available: <https://www.semanticscholar.org/paper/Smart-Control-Distribusi-Air-Menggunakan-Variable-Sofyar-Firmansyah/e2482717824d582bed57a49779b247e2771b12c4>
- [9] Y. Badruzzaman, “Pengasutan Konvensional Motor Induksi Tiga Fasa Rotor Sangkar Tupai,” vol. 1, no. 1, 2012.
- [10] H. Toar, E. Purwanto, H. Oktavianto, R. Ridwan, and M. R. Rusli, “PENALA PARAMETER PID OTOMATIS PADA PENGATUR KECEPATAN MOTOR INDUKSI TIGA FASA,” *J. INTEGRASI*, vol. 12, no. 1, pp. 1–12, Apr. 2020, doi: 10.30871/ji.v12i1.1372.
- [11] F. Fatqurrohman, “ANALISA PENGATURAN KECEPATAN MOTOR INDUKSI 3 FASA DENGAN VARIABLE SPEED DRIVE MENGGUNAKAN KONTROL PI PADA PENGGERAK HOIST ARTG

Halaman ini sengaja dikosongkan