

ANALISA PENGATURAN KECEPATAN MOTOR INDUKSI 3 PHASA DENGAN VARIABLE FREQUENCY DRIVE MENGGUNAKAN KONTROL PID PADA POMPA BOOSTER

Djanu Widyantoro, Wahyu Setyo Pambudi*, Yuliyanto Agung Prabowo, Misbahul Munir, Novian Patria Uman Putra.

Program Studi Teknik Elektro; Institut Teknologi Adhi Tama Surabaya; Jln. Arief Rachman Hakim No 100 Surabaya, 60117, Telp. (031) 5991101.

Keywords:

Motor Induksi, VFD, PID, Speed, Pompa Booster, Flow Air.

Corespondent Email:

wahyusp@itats.ac.id

Abstrak. Pada penelitian ini akan dibahas mengenai VFD sebagai pengendali motor induksi 3 phasa sebagai penggerak pompa sentrifugal dalam mendistribusikan air kedalam kolam dan juga mengatur level air agar tetap konstan. Dengan kondisi kolam yang membutuhkan air masuk dan juga air yang keluar, maka VFD akan menjaga putaran rotor untuk menggerakkan pompa sentrifugal sesuai dengan debit air yang dibutuhkan. Dan hal ini dilakukan dan dikontrol secara automatic dengan VFD yang dikendalikan dengan kontrol PID. Kontrol ini sangat berguna sekali dalam pengaturan kecepatan (speed regulation) dan mempertahankan kecepatan sesuai yang diinginkan operator (set point) meskipun terjadi perubahan beban pada motor. Perbedaan antara menggunakan kontrol PID dan yang tidak menggunakan kontrol PID terlihat dari pencapaian target set point yang direncanakan, dan hal ini juga berpengaruh terhadap planning kebutuhan flow air yang direncanakan. Disamping itu penggunaan kontrol PID juga menghemat kebutuhan daya motor sebagai penggerak pompa Booster.



Copyright © [JITET](#) (Jurnal Informatika dan Teknik Elektro Terapan). This article is an open access article distributed under terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY NC)

Abstract. In this study, a VFD will serve as the controller for a 3-phase induction motor, driving the centrifugal pump to distribute air into the pool and maintain a constant air level. With pool conditions requiring air in and out, the VFD will maintain rotor rotation to drive the centrifugal pump at the required airflow. And this is done and controlled automatically using a VFD with PID control. This control is beneficial for speed regulation and maintaining the desired operator-set speed (set point) even when the motor load changes. The difference between using PID control and not using it can be seen in the achievement of the set-point target, and this also affects the planning of the required airflow. In addition, PID control eliminates the need for a motor as a booster pump driver.

1. PENDAHULUAN

Motor induksi merupakan salah satu jenis motor listrik yang paling banyak digunakan baik dalam rumah tangga maupun industri skala kecil maupun besar [1]. Untuk mencapai efisiensi yang optimal, diperlukan pengaturan kecepatan motor yang presisi. VFD (*Variable Frequency Drive*) merupakan perangkat yang efektif untuk mengatur kecepatan motor

induksi. Dengan mengubah frekuensi tegangan yang diberikan ke motor, VFD mampu mengatur kecepatan putaran motor [2].

Dengan VFD, kecepatan putaran motor pompa booster dapat diatur secara presisi sesuai dengan kebutuhan aliran dan tekanan yang diinginkan. Ketika kebutuhan air rendah, VFD akan menurunkan kecepatan pompa booster, yang secara eksponensial mengurangi konsumsi

daya. Hubungan antara kecepatan dan daya bersifat kubik, artinya sedikit penurunan kecepatan akan menghasilkan penghematan energi yang sangat besar. VFD memungkinkan kontrol tekanan presisi dalam sistem perpipaan. Dengan sensor tekanan yang terhubung ke VFD, kecepatan pompa akan disesuaikan secara otomatis untuk menjaga tekanan pada titik setel yang konstan, terlepas dari fluktuasi permintaan air. Ini mencegah tekanan berlebih atau kurang, yang dapat menyebabkan ketidaknyamanan bagi pengguna atau bahkan kerusakan pada sistem. [3]

Pengendali *Proporsional-Integral-Derivative* (PID) sering digunakan untuk mengontrol kecepatan motor yang digerakkan oleh VFD (*Variable Frequency Drive*). Pengendali PID mampu memberikan respon yang cepat dan akurat dalam mengatasi kesalahan antara kecepatan yang diinginkan dan kecepatan aktual. Pompa air booster merupakan salah satu aplikasi yang sangat cocok untuk penerapan VFD dan pengendali PID. Dengan mengatur kecepatan pompa, dapat diperoleh debit air yang sesuai dengan kebutuhan, serta menjaga tekanan air dalam sistem [4].

Motor induksi tiga phasa banyak digunakan sebagai penggerak peralatan-peralatan seperti pompa di bidang industri manufaktur, dikarenakan memiliki banyak keuntungan. Penggunaan motor induksi tiga phasa dengan sistem direct on-line memiliki arus starting yang tinggi dan kecepatan putar konstan, tentu sangat tidak efektif dalam melakukan proses produksi. Salah satu cara untuk mengendalikan kecepatan putar motor induksi tiga fasa adalah dengan menggunakan VFD (*Variable Frequency Drive*). Sinkronisasi antara motor induksi dengan VFD dapat dilakukan dengan mengatur setting parameter VFD sesuai dengan nameplate motor tersebut. Dari data pengukuran yang dilakukan kecepatan putar motor induksi berbanding lurus dengan pemakaian energi listrik. Hal ini menunjukkan bahwa kecepatan putar motor induksi yang tidak selalu maksimum dapat menghemat pemakaian energi listrik yang berkelanjutan. Pemakaian energi listrik motor induksi tiga phasa ketika running dengan kecepatan putar pada set point 10% akan lebih hemat 9 kali dibandingkan dengan kecepatan putar pada set point 100% atau putaran maksimum [5].

VFD (*Variable Frequency Drive*) adalah sebuah alat yang terdiri dari rectifier, filter, inverter, dan panel kontrol untuk mengontrol nilai output yang dihasilkan. Nilai yang dapat dikontrol oleh VFD adalah nilai frekuensi dari tegangan output yang akan masuk ke motor induksi. Sistem kontrol kecepatan motor induksi dengan menggunakan VFD sama dengan sistem kontrol motor induksi menggunakan inverter, hal ini dikarenakan tegangan output dari VFD merupakan sinyal PWM (*Pulse Width Modulation*) yang dibangkitkan oleh inverter di dalam VFD. Keuntungan operasi inverter PWM sebagai teknik konversi dibanding jenis-jenis inverter lainnya adalah rendahnya distorsi harmonik pada tegangan keluaran dibanding dengan jenis inverter lainnya. Selain itu teknik PWM sangat praktis dan ekonomis untuk diterapkan berkat semakin pesatnya perkembangan semikonduktor (terutama komponen daya yang mempunyai waktu pensaklaran sangat cepat). Pada pengendalian kecepatan motor induksi, teknik PWM mempunyai kelebihan yang mampu menggerakkan motor induksi dengan putaran halus dan rentang yang lebar [6].

Berdasarkan hal ini maka penelitian akan menganalisa sistem kerja VFD (*Variable Frequency Drive*) yang mengatur kecepatan motor induksi tiga phasa yang dikontrol dengan kontrol PID. VFD disini mengubah kecepatan motor induksi tiga phasa dengan cara mengatur frekuensi keluarannya. Kemudian keluaran VFD ini di drive ke motor sehingga putaran motor dapat berubah ketika frekuensi yang diatur melalui PID kontroler.

2. TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Motor Induksi 3 Phasa

Motor induksi atau asynchronous machine adalah jenis mesin listrik arus bolak-balik (AC) yang paling umum dan banyak digunakan dalam aplikasi industri karena konstruksinya yang sederhana, biaya yang relative rendah dan keandalannya. Kinerja motor induksi sangat dipengaruhi oleh parameter kelistrikan terutama frekuensi dan tegangan [7]. Dengan menggunakan VFD maka frekuensi motor dapat diatur dan dikendalikan sesuai dengan kebutuhan. Dalam hal ini motor induksi digunakan sebagai penggerak pompa setrifugal

dalam mensuplay dan mensirkulasi air untuk kolam renang.

Spesifikasi motor Induksi sebagai berikut :

- Voltage	380 △
- Frekuensi	50 Hz
- Kapasitas	11 kW
- Arus max	21,5 A
- Motor 4 pole	1470 rpm
- Cos φ	0,85

2.1.1. Prinsip kerja Motor Induksi

Kumparan stator yang dihubungkan dengan suatu sumber tegangan tiga fasa akan menghasilkan medan magnet yang berotasi dengan kecepatan rotasi sinkron sebesar [8] :

$$n_s = \frac{120 \times f}{p} \quad (1)$$

Dimana :

n_s = Kecepatan sinkron motor (rpm)

f = Frekuensi motor (Hz)

p = Jumlah kutub

Medan magnet pada stator tersebut akan memotong pengantar-pengantar pada rotor, sehingga pada kumparan rotor timbul tegangan induksi (ggl). Kumparan rotor merupakan rangkaian tertutup, sehingga ggl (E) akan menimbulkan arus. Adanya arus akan menghasilkan medan magnet yang menimbulkan gaya (F) pada rotor. Bila kopel awal yang dihasilkan oleh gaya (F) pada rotor cukup besar untuk memikul kopel beban, maka rotor akan berputar searah dengan medan putar stator[9].

2.2. Pompa Sentrifugal

Ini adalah jenis pompa kinetic yang paling umum digunakan dilingkungan industri. Pompa ini bekerja dengan mengubah energi mekanik dari putaran motor menjadi energi kinetic dalam fluida, yang selanjutnya diubah menjadi tekanan untuk memindahkan fluida dari tempat satu ke tempat lain [10].

Prinsip Kerja Gaya Sentrifugal

Prinsip kerja pompa sentrifugal didasarkan pada **gaya sentrifugal**, yang merupakan gaya inersia yang bekerja menjauhi pusat putaran. Proses kerjanya melalui langkah-langkah berikut [11]:

- Impeler: Sebuah roda berputar (impeler) dengan sudu-sudu berbentuk khusus.
- Fluida: Fluida masuk ke pusat impeler dengan kecepatan rendah.

- Rotasi: Saat impeler berputar, sudu-sudu mendorong fluida keluar dengan kecepatan tinggi.
- Energi Kinetik: Energi kinetik yang dihasilkan oleh fluida kemudian diubah menjadi energi tekanan saat fluida memasuki saluran keluar (volute).

Pompa sentrifugal dan motor induksi 3 fasa merupakan kombinasi yang sangat umum digunakan dalam berbagai aplikasi industri. Keduanya saling melengkapi dan bekerja sama untuk menghasilkan aliran fluida yang diinginkan.

Motor induksi 3 fasa memberikan tenaga mekanik untuk memutar impeler pompa sentrifugal. Dengan mengubah frekuensi listrik yang diberikan ke motor (menggunakan VFD), kecepatan putaran impeler dapat diatur, sehingga mengatur debit dan head (ketinggian) yang dihasilkan oleh pompa.

Pompa sentrifugal ini tersusun atas sebuah impeler dan saluran inlet ditengah-tengahnya, dengan desain ini maka pada saat impeler berputar fluida mengalir menuju casing disekitar impeler sebagai akibat dari gaya sentrifugal, artinya bahwa terdapat ruang vakum sehingga fluida akan tertarik kedalam casing. Casing tersebut berguna untuk menurunkan Kecepatan aliran fluida sementara. Kecepatan fluida diturunkan, tetapi kecepatan putar impeller tetap tinggi. Kecepatan fluida dikonversi menjadi tekanan oleh casing sehingga fluida dapat menuju titik outletnya [12].

2.3. VFD (Variable Frequency Drive)

VFD adalah alat kontrol yang digunakan untuk mengatur kecepatan putar dari sebuah motor AC agar dapat berputar dengan kecepatan yang diinginkan, sehingga meningkatkan efektifitas dan efisiensi daya listrik yang dipakai untuk menggerakan sebuah motor AC. Adapun hasil yang didapatkan berupa tegangan atau frekuensi yang bisa diatur, maka inverter dapat digunakan sebagai pengatur kecepatan putaran sebuah motor listrik AC.

Variable Frequency Drive terdiri dari rectifier, filter, inverter, dan panel kontrol untuk mengontrol nilai output yang dihasilkan. Nilai yang dapat dikontrol oleh VFD adalah nilai frekuensi dari tegangan output yang akan

masuk ke motor AC 3 phasa. Sistem kontrol kecepatan motor AC 3 phasa dengan menggunakan VFD hampir sama dengan sistem kontrol motor AC 3 phasa menggunakan PWM, hal ini dikarenakan tegangan output dari VFD merupakan sinyal PWM yang dibangkitkan oleh inverter di dalam VFD. Keuntungan operasi inverter PWM sebagai teknik konversi dibanding jenis jenis inverter lainnya adalah rendahnya distorsi harmonik pada tegangan keluaran dibanding dengan jenis inverter lainnya. Selain itu teknik PWM sangat praktis dan ekonomis untuk diterapkan berkat semakin pesatnya perkembangan semikonduktor (terutama komponen daya yang mempunyai waktu pensaklaran sangat cepat). Pada kontrol kecepatan motor AC, inverter PWM mempunyai kelebihan yang mampu menggerakkan motor induksi dengan putaran halus dan rentang yang lebar [13].

2.4. Kendali Proporsional Integral Derivatif (PID)

Sistem kontrol PID terdiri atas tiga buah cara pengaturan yaitu kontrol P (Proportional), I (Integral), D (Derivative) dengan masing-masing memiliki kelebihan dan kekurangan. Dalam merencanakan sistem kontrol PID yang perlu dilakukan adalah mengatur parameter PID agar tanggapan sinyal keluaran system terhadap masukan tertentu sebagaimana yang diinginkan.

Dalam konteks pompa booster, kontrol PID pada VFD digunakan untuk menjaga tekanan atau aliran air pada setpoint yang diinginkan secara otomatis. Mengimplementasikan kontrol PID ke dalam VFD untuk pompa booster melibatkan beberapa langkah kunci, baik dari segi perangkat keras (hardware) maupun pengaturan perangkat lunak (software) pada VFD itu sendiri.

3. METODE PENELITIAN

3.1. Pengambilan Data

Penelitian ini dilakukan dengan mengambil data pada display keypad Variable Frequency Drive yang ada dipanel kontrol Pompa, data yang bisa diakses meliputi : kecepatan motor induksi, tegangan, daya, frekuensi dan Flow air. Adapun lokasi penelitian ada di Wahana Wisata Waterbom Kuta Bali-Indonesia. Lokasi

ini dipilih karena ada beberapa ruang pompa yang mempunyai kapasitas motor induksi yang besar dan kontrol VFD yang sudah modern, hal ini sesuai untuk kebutuhan penelitian eksperimental industri.

Metode yang digunakan adalah kuantitatif, dengan pendekatan penelitian yang berfokus pada pengumpulan data performa motor induksi pada variasi frekuensi tertentu. Objek utama penelitian adalah **motor induksi tiga fasa tipe squirrel cage** sebagai penggerak pompa sentrifugal. Data nameplate pada motor induksi adalah 11kW, tegangan nominal 380 V, dan kecepatan sinkron 1500 rpm (4 kutub), yang telah sesuai dengan standar pengujian SNI dan IEC. Penelitian difokuskan pada bagaimana frekuensi mempengaruhi kecepatan motor dan kecepatan motor juga akan berpengaruh terhadap flow air pada pompa sentrifugal.

Berikut ini hasil dari pengambilan data di lapangan :

Tabel 3. 1. Data Pompa 1 saat running

No	Speed	Freq (Hz)	V	A	Flow (m ³ /h)
1	1.036,52	35	513	11,21	187,33
2	1.036,43	35	520	11,20	179,96
3	1.036,19	35	519	11,02	190,53
4	1.036,48	35	518	11,29	181,77
Rata rata	1.036,41	35	517	11,18	184,90

Tabel 3. 2. Data Pompa 2 saat running

No	Speed	Freq (Hz)	V	A	Flow (m ³ /h)
1	1.280,87	43	524	15,53	250,95
2	1.280,93	43	519	15,58	250,96
3	1.281,55	43	517	15,03	250,96
4	1.282,67	43	516	15,73	250,95
Rata rata	1.281,51	43	519	15,47	250,96

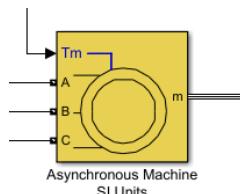
3.2. Perancangan Software Matlab

Penulis melakukan perancangan software yaitu dengan menggunakan program Simulink MATLAB sebagai bahan simulasi yang dibuat guna mengetahui bagaimana respon pengaturan kecepatan motor induksi 3 fasa seperti yang terpasang pada penggerak Pompa Booster model sentrifugal. MATLAB merupakan suatu software yang sangat baik digunakan untuk

menganalisa berbagai kebutuhan dalam bidang teknik. Perancangan yang dilakukan yaitu dengan membuat dan menjalankan simulasi rangkaian pengaturan kecepatan motor 3 phasa [14].

3.2.1. Pemodelan Asynchronous Machine

Dengan data motor induksi yang digunakan, maka untuk pemodelan system dalam Matlab akan dilakukan perhitungan secara manual dalam mengisi parameter motor dalam program. Berikut ini perhitungan parameter dalam block asynchronous machine Simulink Matlab [15].



Gambar 3. 1. Block Asynchronous machine

Parameter Dasar dan Mekanik

a. Jumlah Pasangan kutub (Pole Pairs, p)

Motor induksi berputar mendekati kecepatan sinkron (N_s). Dari $N_r = 1470$ rpm, kita tahu bahwa kecepatan sinkron terdekat pada 50 Hz adalah 1500 rpm.

- Kecepatan Sinkron (N_s) :

$$N_s = \frac{120 \times f}{Poles}$$

$$1500 \text{ rpm} = \frac{120 \times 50 \text{ Hz}}{Poles} \Rightarrow Poles = \frac{6000}{1500} = 4 \text{ kutub}$$

- Pole pairs (p) :

$$p = \frac{Poles}{2} = \frac{4}{2} = 2 \text{ (pasang)}$$

b. Slip nominal (s) :

- Kecepatan sinkron dalam rad/s (ω_s) :

$$\omega_s = \frac{2\pi N_s}{60} = \frac{2\pi \times 1500}{60} \approx 157.08 \text{ rad/s}$$

- Slip nominal (s) :

$$s = \frac{N_s - N_r}{N_s} = \frac{1500 - 1470}{1500} = \frac{30}{1500} = 0.02$$

c. Torsi Nominal (T_n) :

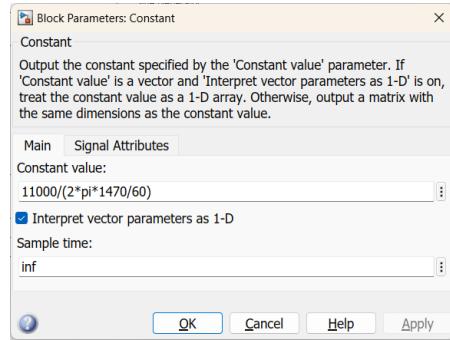
Diasumsikan P_n adalah daya mekanik keluaran (P_{out})

- Kecepatan rotor dalam rad/s (ω_r) :

$$\omega_r = \frac{2\pi N_r}{60} = \frac{2\pi \times 1470}{60} \approx 153.94 \text{ rad/s}$$

- Torsi nominal (T_n) :

$$T_n = \frac{P_{out}}{\omega_r} = \frac{11000 \text{ W}}{153.94 \text{ rad/s}} \approx 71.45 \text{ Nm}$$



Gambar 3. 2. Block input Torsi Motor

• Perhitungan Torsi beban pompa pada kecepatan motor 1036 rpm

Kita hitung torsi beban baru (T_{L2}) saat kecepatan motor $N_2 = 1036$ rpm.

Parameter :

- $N_1 = 1470 \text{ rpm}$
- $T_{L1} = 71.45 \text{ N.m}$
- $N_2 = 1036 \text{ rpm}$

$$T_{L2} = T_{L1} \times \left(\frac{N_2}{N_1} \right)^2$$

$$\left(\frac{1036}{1470} \right)^2 \approx (0.7047)^2 \approx 0.4966$$

Torsi beban (T_{L2}) :

$$T_{L2} = 71.45 \text{ N.m} \times 0.4966$$

$$T_{L2} \approx 35.47 \text{ N.m}$$

• Perhitungan Torsi beban pompa pada kecepatan motor 1280 rpm

Kita hitung torsi beban baru (T_{L3}) saat kecepatan motor $N_3 = 1280$ rpm.

Parameter :

- $N_1 = 1470 \text{ rpm}$
- $T_{L1} = 71.45 \text{ N.m}$
- $N_3 = 1280 \text{ rpm}$

$$T_{L3} = T_{L1} \times \left(\frac{N_3}{N_1} \right)^2$$

$$\left(\frac{1280}{1470} \right)^2 \approx (0.8707)^2 \approx 0.7581$$

Torsi beban (T_{L3}) :

$$T_{L3} = 71.45 \text{ N.m} \times 0.7581$$

$$T_{L3} \approx 54.16 \text{ N.m}$$

Parameter Listrik ($R_s, L_{ls}, R'_r, L'_{ls}, L_m$)

a. Stator Resistansi (R_s)

R_s sering diasumsikan sebagai persentase kecil dari impedansi nominal (Z_n).

- Hitung Daya Input Nominal (P_{in}) : Diasumsikan efisiensi (η) motor 11 kW adalah $\eta \approx 90\%$ dan faktor daya ($\cos \theta$) adalah ≈ 0.85 .

$$P_{in} = \frac{P_{out}}{\eta} = \frac{11000}{0.90} \approx 12222 \text{ W}$$

- Arus Nominal (I_n) :

$$I_n = \frac{P_{in}}{\sqrt{3} \times V_L \times \cos \theta} = \frac{12222}{\sqrt{3} \times 380 \times 0.85} \approx 21.82 \text{ A}$$

- Impedansi nominal (Z_n) per Fasa :

$$Z_n = \frac{V_L / \sqrt{3}}{I_n} = \frac{380 / \sqrt{3}}{21.82} \approx 10.04 \text{ Ohm}$$

- R_s motor besar biasanya berkisar 1% - 4% dari Z_n . Ambil $R_s \approx 4\%$ dari Z_n

$$R_s \approx 0.04 \times Z_n = 0.04 \times 10.04 \approx 0.402 \text{ Ohm}$$

b. Rotor Resistansi (R'_r)

Untuk 11 kW, R'_r , biasanya sekitar R_s , atau dapat dihitung menggunakan slip :

$$R'_r \approx R_s \approx 0.402 \text{ Ohm}$$

c. Mutual Induktansi (L_m) dan Leakage Induktansi (L_{ls}, L'_{lr})

Reaktansi kebocoran (X_l) total biasanya berkisar 5% - 20% dari Z_n . Ambil $X_l \approx 15\%$ dari Z_n .

$$X_l = X_{ls} + X'_{lr} \approx 0.15 \times Z_n = 0.15 \times 10.04 \approx 1.51 \text{ Ohm}$$

- Asumsi pembagian reaktansi bocor :

$$X_{ls} \approx X'_{ls} \approx \frac{1.51}{2} \approx 0.755 \text{ Ohm}$$

- Induktansi bocor (L_{ls}, L'_{lr}) :

$$L_{ls} = L'_{lr} = \frac{X}{2\pi f} = \frac{0.755}{2\pi \times 50} \approx 0.0024 \text{ H (atau 2.4 mH)}$$

Reaktansi magnetisasi (X_m) biasanya jauh lebih besar, berkisar 150% - 300% dari Z_n .

Ambil $X_m \approx 300\%$ dari Z_n .

$$X_m \approx 3.0 \times Z_n = 3.0 \times 10.04 \approx 30.12 \text{ Ohm}$$

- Mutual Induktansi (L_m) :

$$L_m = \frac{X_m}{2\pi f} = \frac{30.12}{2\pi \times 50} \approx 0.0959 \text{ H (atau } 95.9 \text{ mH)}$$

Parameter Inersia dan Gesekan

a. Inersia (J)

Inersia rotor dan beban harus diketahui atau diukur. Sebagai perkiraan awal yang sangat kasar untuk motor tanpa beban yang dihubungkan :

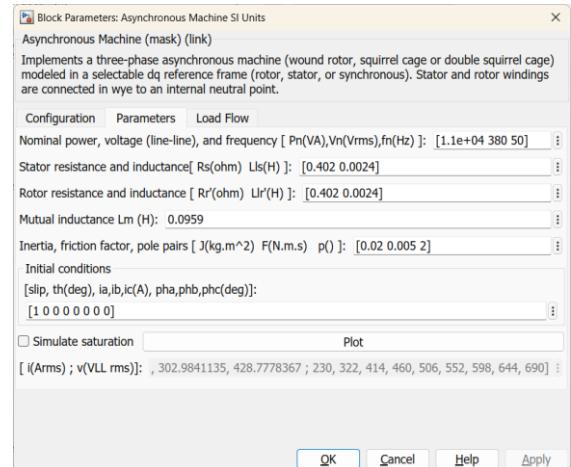
- Estimasi J : untuk motor 11 kW pada 1500 rpm, nilai J motor kosong (tanpa beban) biasanya berkisar antara 0.01 hingga 0.15 $\text{kg} \cdot \text{m}^2$. Ambil perkiraan :

$$J \approx 0.01 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$$

b. Faktor Gesekan (F)

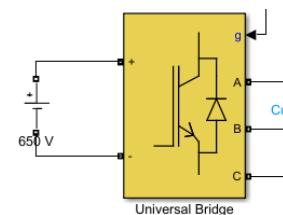
Faktor gesekan viskos mewakili kerugian mekanik. Nilainya sangat kecil dan sering diabaikan (diasumsikan nol) dalam mofel dasar, atau diestimasi dari no-load test.

$$F \approx 0.005 \text{ N} \cdot \text{m} \cdot \text{s}$$



Gambar 3. 3. Block Parameter Asynchronous Machine

3.2.2. Pemodelan Block Universal Bridge



Gambar 3. 4. Block Universal Bridge

Blok Universal Bridge bertindak sebagai antarmuka fisik antara Sumber DC (yang

disimulasikan sebagai V_{DC} pada nameplate inverter) dan motor induksi.

- Masukan : Menerima enam sinyal pulsa gerbang (G1 hingga G6) dari blok PWM Generator (2-level)
- Keluaran : menghasilkan tiga fasa tegangan AC (A, B, C) dengan frekuensi dan amplitudo variable ke blok Asynchronous Machine untuk mengontrol kecepatan motor.

Prinsip Dasar Perhitungan V_{DC}

Tegangan V_{DC} dihitung berdasarkan tegangan RMS line-to-line nominal motor ($V_{L,nom}$) dan rasio modulasi yang diinginkan.

1. Tegangan AC Puncak yang diperlukan ($V_{p,AC}$)

Tegangan RMS line-to-line motor (380 V) harus diubah menjadi tegangan AC puncak line-to-line netral yang diperlukan oleh inverter.

$$V_{p,AC} = \frac{V_{L,nom}}{\sqrt{3}} \times \sqrt{2}$$

$$V_{p,AC} = \frac{380}{\sqrt{3}} \times \sqrt{2}$$

$$V_{p,AC} \approx 219.4 \text{ V}$$

$$V_{p,AC} \approx 310.2 \text{ V}$$

Ini adalah tegangan AC puncak tertinggi yang harus mampu dihasilkan oleh Inverter.

2. Hubungan V_{DC} dengan $V_{p,AC}$

Tegangan DC Bus (V_{DC}) dan tegangan AC puncak ($V_{p,AC}$) dihubungkan melalui rasio modulasi amplitude (m_a)

$$V_{p,AC} = \frac{m_a}{2} \times V_{DC}$$

Dimana m_a adalah rasio perbandingan antara amplitude sinyal referensi (A_m) dengan amplitude sinyal pembawa (A_c).

Modulasi Sinusoidal Linier ($m_a \leq 1$)

Untuk memastikan kualitas sinyal yang baik tanpa distorsi (overshoot), nilai maksimum m_a adalah 1.

$$V_{DC,min} = 2 \times \frac{V_{p,AC}}{m_a}$$

$$V_{DC,min} = 2 \times \frac{310.2}{1}$$

$$V_{DC,min} = 620.4 \text{ V}$$

Untuk menjamin motor dapat mencapai tegangan nominalnya, nilai V_{DC} yang disarankan untuk simulasi harus sedikit lebih tinggi dari nilai minimum ini.

Nilai V_{DC} yang dipilih = 650 V

3.2.3. Pemodelan block Pengendali PID (Proportional-Integral-Derivative)

Pengendali PID adalah mekanisme loop tertutup (closed loop) yang digunakan untuk menjaga dan mengendalikan kecepatan actual motor (ω_{actual}) agar sesuai dengan kecepatan referensi (ω_{ref}) yang ditetapkan.

a. Sinyal kesalahan (error)

PID bekerja dengan menghitung sinyal kesalahan $e(t)$, yaitu selisih antara set point yang diinginkan dengan nilai pengukuran saat ini.

$$e(t) = \omega_{ref} - \omega_{actual}$$

Dimana :

- $\omega_{ref} = target (set point)$
- $\omega_{actual} =$ Kecepatan sudut yang diukur dari block Asynchronous Machine

b. Sinyal Kontrol (Output PID)

Berdasarkan sinyal kesalahan $e(t)$, PID menghasilkan sinyal kontrol $u(t)$ yang merupakan kombinasi dari tiga aksi : Proporsional, Integral dan Derivative. Nilai K_p , K_i dan K_d tidak diambil dari nameplate tetapi harus disesuaikan (tuned) untuk mencapai performa yang diinginkan (respon cepat, overshoot rendah, steady state error nol).

c. Sinyal Kontrol block Three Phase Sine Generator

Dalam penelitian ini skema kontrol V/f (Volt per Frekuensi) dimana pengontrol PID mengatur sinyal referensi yang kemudian diumpulkan ke Three Phase Sine Generator, dengan set point adalah kecepatan sudut $\omega_{ref} \frac{rad}{s}$.

Tujuan dari Three Phase Sine Generator adalah menghasilkan sinyal tegangan sinusoidal 3 fasa yang amplitudonya ($|u|$) dan frekuensinya (F_{req}) sesuai dengan kebutuhan kecepatan motor.

- Perhitungan Frekuensi Stator (f)

$$f = \frac{N_s \times p}{120}$$

$$\omega_s = N_s \times \frac{2\pi}{60}$$

$$N_s = \frac{\omega_s \times 60}{2\pi}$$

Jadi

$$f = \frac{\omega_s \times p \times 0.5}{\pi}$$

Dimana :

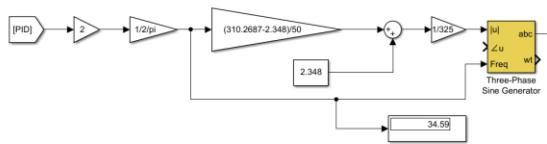
$$\omega_s \left(\frac{\text{rad}}{\text{s}} \right)$$

- \approx Kecepatan sudut sinkron (omega sinkron)
- $N_s (\text{rpm})$
- \approx Kecepatan sinkron dalam putaran per menit
- $2\pi (\text{radian})$
- \approx Jumlah radian dalam satu putaran penuh

- Perhitungan Input Amplitudo ($|u|$)

$$|u| = \left\{ f \frac{x \left(\frac{V_n}{\sqrt{3}} x \sqrt{2} - R_s x I_s \right)}{50} + R_s x I_s \right\} x \frac{1}{0.5 V_{DC}}$$

$$|u| = \left\{ f x \left(\frac{380 x \sqrt{2} - 0.2 I_s}{\sqrt{3}} \right) + 0.2 I_s \right\} x \frac{1}{325}$$



Gambar 3. 5. Input block three phase sine generator

3.2.4. Pengaruh Kecepatan Motor terhadap Debit Air

Parameter Pompa sentrifugal dirancang untuk beroperasi pada kecepatan nominal motor. Berikut ini merupakan data yang terkait dengan pompa yang digunakan :

- Merk : Ebara
- Type : 200 x 150 FS4HA
- Kapasitas : $3,8 \text{ m}^3/\text{m} - 5,2 \text{ m}^3/\text{m}$
- Effisiensi Pompa 90%
- Operasional Pompa-1 efektif = $5,2 \text{ m}^3/\text{m} \times 85\% = 4,42 \text{ m}^3/\text{m} \approx 265.2 \text{ m}^3/\text{h}$
- Operasional Pompa-2 efektif = $5,2 \text{ m}^3/\text{m} \times 90\% = 4,68 \text{ m}^3/\text{m} \approx 280.8 \text{ m}^3/\text{h}$

Karena data kurva pompa Ebara 200x1500 FS4HA tidak tersedia disini, maka kita akan menggunakan Hukum Afinitas Pompa untuk memperkirakan debit baru (Q_2) berdasarkan

kinerja nominal pompa (Q_{nom}) pada (N_{nom}) dan kecepatan baru (N_2).

Perhitungan menggunakan Hukum Afinitas Pompa

Untuk debit (Q) :

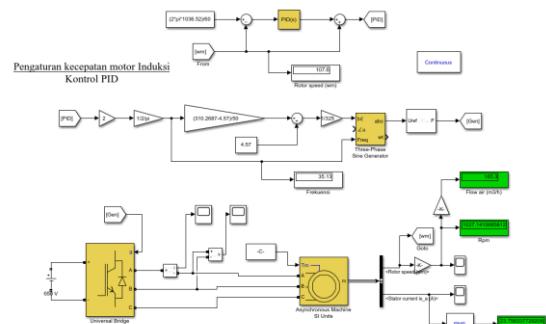
$$\frac{Q_2}{Q_1} = \frac{N_2}{N_1}$$

Dimana :

- $Q_1 = Q_{nom}$ (debit pada N_{nom})
- Q_2 (Debit pada N_2)

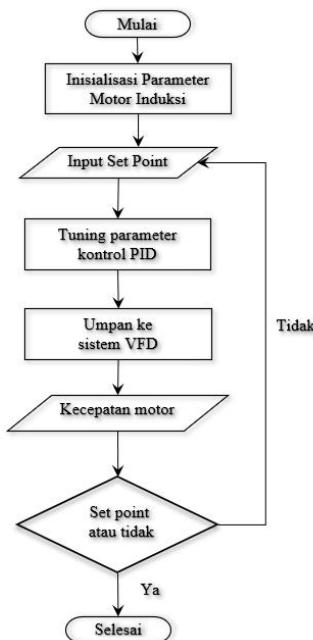
3.2.5. Alur Kerja Simulink Matlab

Penggabungan kontrol PID dengan metode loop tertutup dihubungkan dengan Inverter yang berfungsi sebagai pencacah sehingga tegangan yang masuk kedalam motor induksi 3 phasa bisa diatur dengan Tuning Frekuensi yang berpengaruh terhadap putaran rotor motor, hal ini bisa berfungsi sebagai menaikkan atau menurunkan kecepatan rotor sehingga memperbesar atau memperkecil flow air pada pompa sentrifugal.



Gambar 3. 6. Rangkaian Kontrol PID pada pengendali motor Induksi 3 Phasa

Gambar 3.6 Menunjukkan model sistem yang telah dibuat menggunakan Simulink pada matlab, maka diagram alir untuk menerangkan pengaturan kecepatan motor induksi 3 phasa dengan mengatur flow air pada pompa sentrifugal dapat digambarkan sebagai berikut :



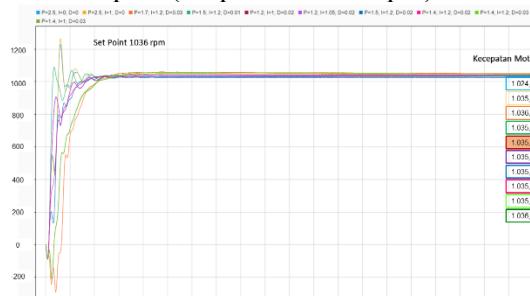
Gambar 3. 7. Diagram alir simulasi program

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Setelah memasukkan data parameter Asynchronous Machine, Universal Bridge dan Three Phase Sine Generator pada blok Simulink, maka selanjutkan mencari parameter tuning PID secara trial dan error. Simulasi dilakukan sebanyak 10 kali untuk tiap kontrol Pompa. Dari respon tersebut dicari nilai yang mendekati set point dan overshoot yang rendah.

Berikut ini hasil dari simulasi tuning PID

a. Pompa 1 (set point = 1036 rpm)

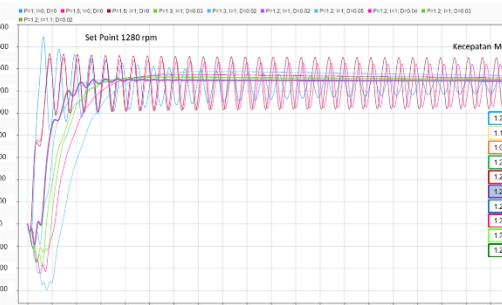


Gambar 4. 1. Grafik respon kecepatan kontrol PID

Dengan mempertimbangkan nilai Overshoot dan Steady State untuk mencari respon sistem yang diharapkan, maka parameter kontrol PID yang digunakan adalah $P = 1,2$; $I = 1$ dan $D = 0,02$ rise time = 41,43 ms, Overshoot = 0,14% , speed motor 1035,6 rpm.

b. Pompa 2 (set point = 1280 rpm)

Setelah melakukan beberapa kali simulasi terhadap kontrol PID maka mendapatkan hasil yang bisa dipilih sesuai dengan rencana dari plan motor induksi. Berikut ini hasil yang didapat :



Gambar 4. 2. Grafik respon kecepatan kontrol PID

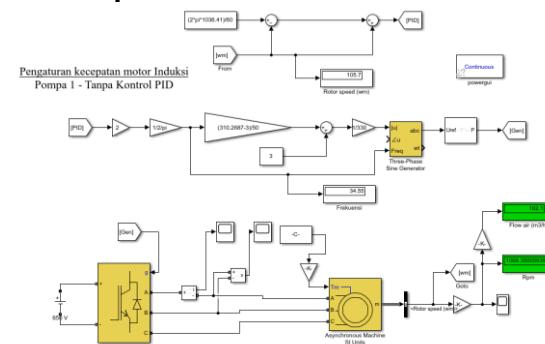
Dengan mempertimbangkan nilai Overshoot dan Steady State untuk mencari respon sistem yang diharapkan, maka parameter kontrol PID yang digunakan adalah $P = 1,2$; $I = 1$ dan $D = 0,02$ rise time = 46,33 ms, Overshoot = 1,76% , speed motor 1280,15 rpm.

Setelah mendapatkan parameter kontrol PID, selanjutnya melakukan simulasi pada matlab dilakukan dengan kontrol PID dan juga tanpa kontrol PID. Komparasi ini akan menunjukkan bagaimana perbedaan respon system tersebut. Berikut ini hasil yang didapat dari running Matlab :

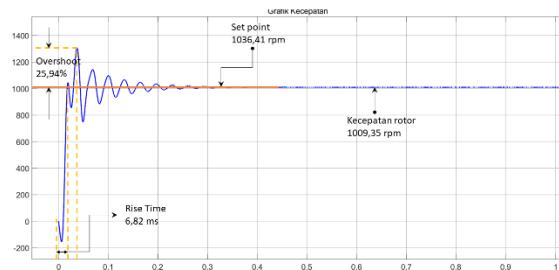
4.1. Rata-rata kecepatan rotor 1.036,41 rpm pada pompa 1

Hasil simulasi dengan set point 1.036,41 rpm dengan waktu simulasi 5 detik menghasilkan grafik sebagai berikut :

a. Tanpa Kontrol PID



Gambar 4. 3. Block Diagram Simulink Sp=1.036,41 rpm



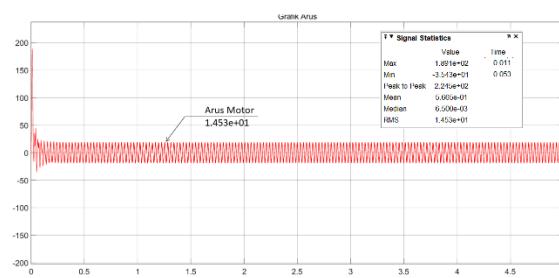
Gambar 4. 4. Grafik kecepatan rotor 1009,35 rpm

Dengan kecepatan rotor 1009,35 rpm, maka bisa dicari frekuensi pada motor dengan rumus sebagai berikut :

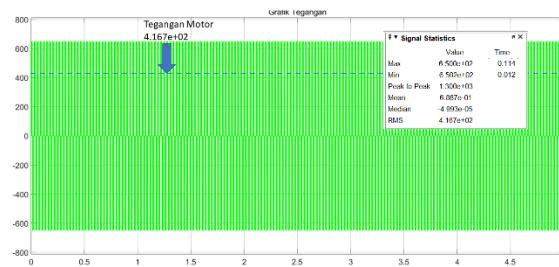
$$n_r = \frac{120 \times f}{P}$$

$$f = \frac{1009,35 \times 4}{120}$$

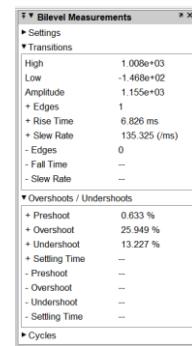
$$f = 33,65 \text{ Hz}$$



Gambar 4. 5. Grafik arus Motor 1.453e+01 Ampere



Gambar 4. 6. Grafik Tegangan Motor 4.167e+02



Gambar 4. 7. Hasil respon sistem setelah running

Hasil dari simulasi tanpa kontrol PID diperoleh respon yaitu nilai rise time = 6,826 ms, nilai steady state error = 0,0261s, nilai overshoot = 25,949%, nilai kecepatan motor induksi = 1009,35 rpm, frekuensi = 33,65 Hz, Arus = 14,53A, Tegangan = 416,7 Volt dan flow air sebesar 182,1 m³/h.

Sehingga berdasarkan data simulasi dibandingkan dengan data riil dilapangan bisa dihitung effisiensi motor sebagai berikut :

Daya Simulasi (Pi)

$$= \sqrt{3} \times 416,7 \times 14,53 \times 0,85$$

$$= 8.913,92 \text{ watt}$$

Daya Data Ukur (Pr)

$$= \sqrt{3} \times 517,88 \times 11,18$$

$$\times 0,85$$

$$= 8.524,06 \text{ watt}$$

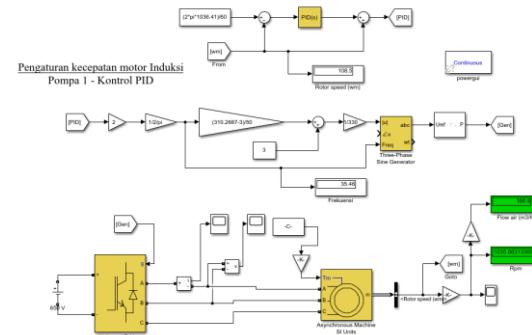
Effisiensi Motor

$$= \frac{\text{Daya Simulasi (Pi)}}{\text{Daya Data Ukur (Pr)}} \times 100\%$$

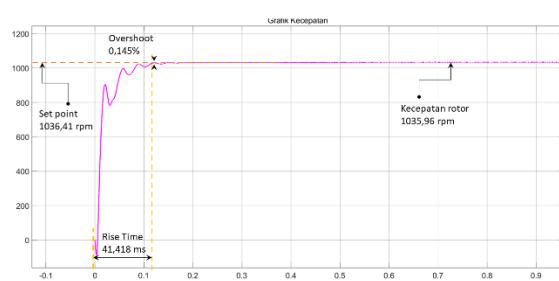
$$= \frac{8.913,92}{8.524,06} \times 100\%$$

$$= 104,57\%$$

b. Dengan Kontrol PID



Gambar 4. 8. Block Diagram Simulink Sp=1.036,41 rpm



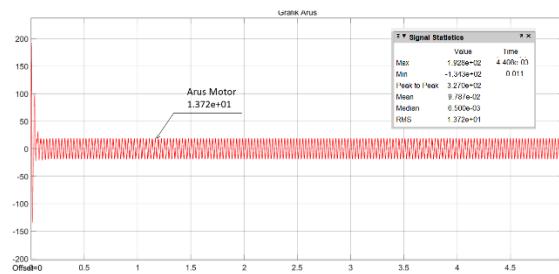
Gambar 4. 9. Grafik kecepatan rotor 1.035,96 rpm

Dengan kecepatan rotor 1.035,96 rpm, maka bisa dicari frekuensi pada motor dengan rumus sebagai berikut :

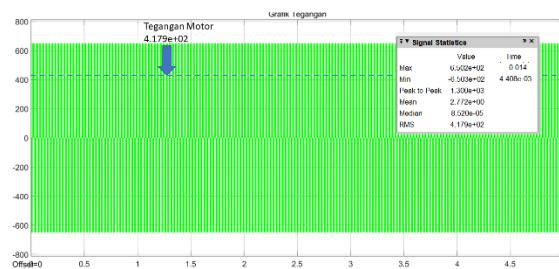
$$n_r = \frac{120 \times f}{P}$$

$$f = \frac{1.035,96 \times 4}{120}$$

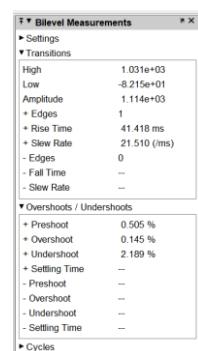
$$f = 34,53 \text{ Hz}$$



Gambar 4. 10. Grafik arus Motor 1.372e+01 Ampere



Gambar 4. 11. Grafik Tegangan Motor 4.179e+02 Volt



Gambar 4. 12. Hasil respon sistem setelah running

Hasil dari simulasi menggunakan kontrol PID diperoleh respon yaitu nilai rise time = 41,418 ms, nilai steady state error = 0,00043s, nilai overshoot = 0,145%,

nilai kecepatan motor induksi = 1.035,96 rpm, frekuensi = 34,53 Hz, Arus = 13,72A, Tegangan = 417,9 Volt dan flow air sebesar 186,9 m³/h.

Sehingga berdasarkan data simulasi dibandingkan dengan data riil dilapangan bisa dihitung effisiensi motor sebagai berikut :

Daya Simulasi (Pi)

$$= \sqrt{3} \times 417,9 \times 13,72 \times 0,85$$

$$= 8.441,24 \text{ watt}$$

Daya Data Ukur (Pr)

$$= \sqrt{3} \times 517,88 \times 11,18 \times 0,85$$

$$= 8.475,57 \text{ watt}$$

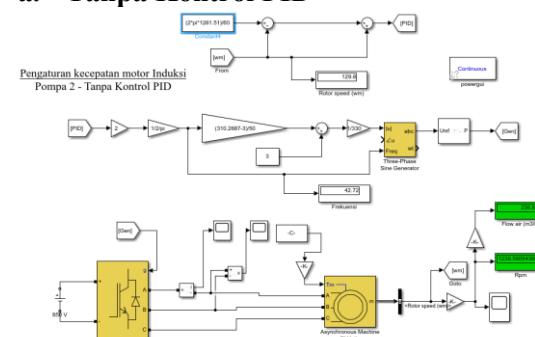
Effisiensi Motor

$$\begin{aligned} &= \frac{\text{Daya Simulasi (Pi)}}{\text{Daya Data Ukur (Pr)}} \times 100\% \\ &= \frac{8.441,24}{8.524,06} \times 100\% \\ &= 99,03\% \end{aligned}$$

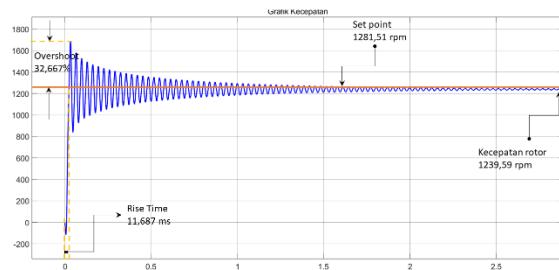
4.2. Rata-rata kecepatan rotor 1.281,51 rpm pada pompa 2

Hasil simulasi dengan set point 1.281,51 rpm dengan waktu simulasi 5 detik menghasilkan grafik sebagai berikut :

a. Tanpa Kontrol PID



Gambar 4. 13. Block Diagram Simulink Sp=1.281,51 rpm



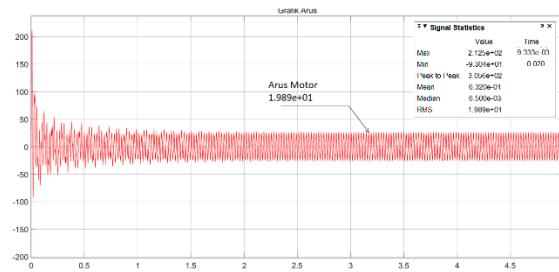
Gambar 4. 14. Grafik kecepatan rotor 1.239,59 rpm

Dengan kecepatan rotor 1.239,59 rpm, maka bisa dicari frekuensi pada motor dengan rumus sebagai berikut :

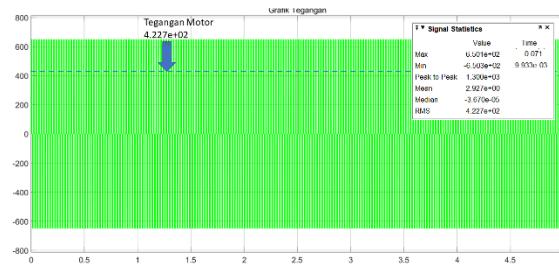
$$n_r = \frac{120 \times f}{P}$$

$$f = \frac{1.239,59 \times 4}{120}$$

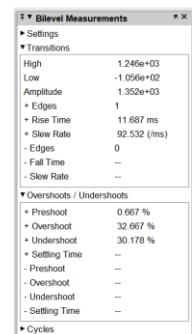
$$f = 41,32 \text{ Hz}$$



Gambar 4. 15. Grafik arus Motor 1.989e+01 Ampere



Gambar 4. 16. Grafik Tegangan Motor 4.227e+02 Volt



Gambar 4. 17. Hasil respon sistem setelah running

Hasil dari simulasi tanpa kontrol PID diperoleh respon yaitu nilai rise time = 11,687 ms, nilai steady state error = 0,0327s, nilai overshoot = 32,667%, nilai kecepatan motor induksi = 1.239,59 rpm, frekuensi = 41,32 Hz, Arus = 19,89A, Tegangan = 422,7 Volt dan flow air sebesar 236,8 m³/h.

Sehingga berdasarkan data simulasi dibandingkan dengan data riil dilapangan bisa dihitung effisiensi motor sebagai berikut :

Daya Simulasi (P_i)

$$= \sqrt{3} \times 422,7 \times 19,89 \times 0,85$$

$$= 12.377,9 \text{ watt}$$

Daya Data Ukur (P_r)

$$= \sqrt{3} \times 519,42 \times 15,47$$

$$\times 0,85$$

$$= 11.828,08 \text{ watt}$$

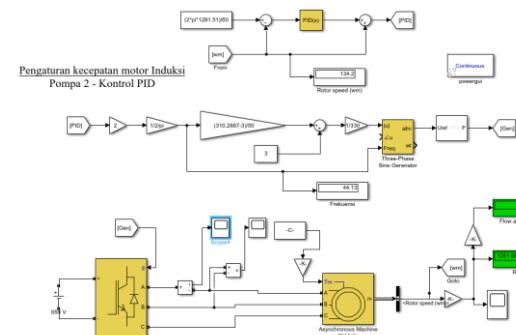
Effisiensi Motor

$$\frac{\text{Daya Simulasi} (P_i)}{\text{Daya Data Ukur} (P_r)} \times 100\%$$

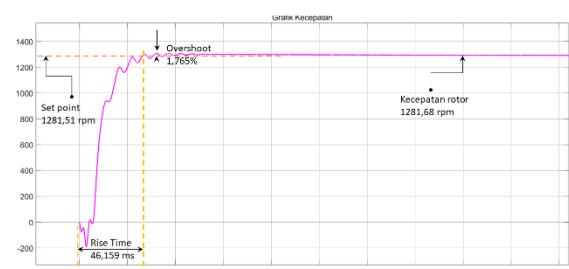
$$= \frac{12.377,9}{11.828,08} \times 100\%$$

$$= 104,65\%$$

b. Dengan Kontrol PID



Gambar 4. 18. Block Diagram Simulink Sp=1281,51 rpm



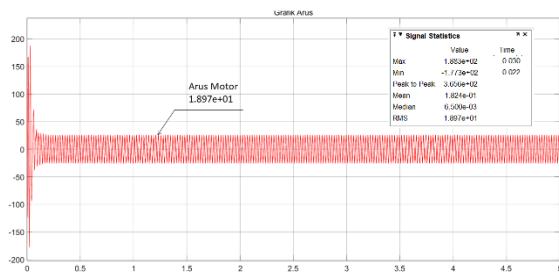
Gambar 4. 19. Grafik kecepatan rotor 1281,68 rpm

Dengan kecepatan rotor 1.281,68 rpm, maka bisa dicari frekuensi pada motor dengan rumus sebagai berikut :

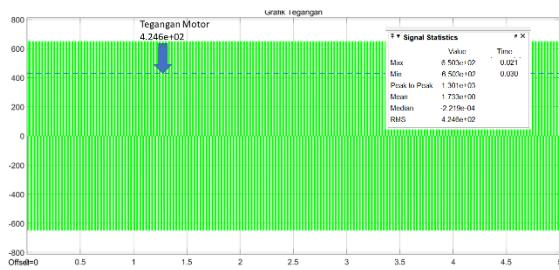
$$n_r = \frac{120 \times f}{P}$$

$$f = \frac{1.281,68 \times 4}{120}$$

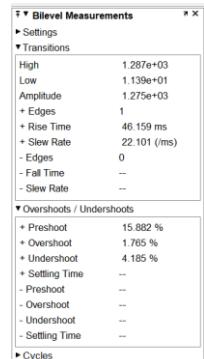
$$f = 42,72 \text{ Hz}$$



Gambar 4. 20. Grafik arus Motor 1.897e+01 Ampere



Gambar 4. 21. Grafik Tegangan Motor 4.246e+02 Volt



Gambar 4. 22. Hasil respon sistem setelah running

Hasil dari simulasi menggunakan kontrol PID diperoleh respon yaitu nilai rise time = 46,159 ms, nilai steady state error = 0,0001s, nilai overshoot = 1,765%, nilai kecepatan motor induksi = 1.281,68 rpm, frekuensi = 42,72 Hz, Arus = 18,97A, Tegangan = 424,6 Volt dan flow air sebesar 244,8 m³/h.

Sehingga berdasarkan data simulasi dibandingkan dengan data riil dilapangan bisa dihitung effisiensi motor sebagai berikut :

Daya Simulasi (Pi)

$$= \sqrt{3} \times 424,6 \times 18,97 \times 0,85$$

$$= 11.858,4 \text{ watt}$$

Daya Data Ukur (Pr)

$$= \sqrt{3} \times 519,42 \times 15,47 \times 0,85$$

$$= 11.828,08 \text{ watt}$$

Effisiensi Motor

$$= \frac{\text{Daya Simulasi (Pi)}}{\text{Daya Data Ukur (Pr)}} \times 100\%$$

$$= \frac{11.858,4}{11.828,08} \times 100\%$$

$$= 100,26\%$$

1. Rekap Simulink Matlab tanpa kontrol PID

Tabel 4. 1. Pompa 1 tanpa kontrol PID

No	Speed	Freq (Hz)	V	A	Flow (m ³ /h)
1	1.009,44	33	418	14,47	182,1
2	1.009,35	33	418	14,24	182,1
3	1.009,13	33	418	14,06	182,1
4	1.009,37	33	417	14,2	182,1
Rata rata	1.009,35	33	417	11,18	182,1

Tabel 4. 2. Pompa 2 tanpa kontrol PID

No	Speed	Freq (Hz)	V	A	Flow (m ³ /h)
1	1.238,98	41	423	20,15	237
2	1.239,04	41	425	19,7	237
3	1.239,62	41	423	20,0	237
4	1.240,52	41	423	19,64	237
Rata rata	1.239,59	41	422	19,89	237

Perhitungan Error data pengukuran rata-rata dibanding simulasi matlab Simulink rata-rata yang tanpa menggunakan kontrol PID, untuk rumus perhitungan Error sebagai berikut :

Error

$$= \frac{\text{data pengukuran} - \text{data simulasi}}{\text{data pengukuran}} \times 100\%$$

Tanpa Kontrol PID

- Error Speed motor induksi pada pompa 1 tanpa kontrol PID

$$\text{Error} = \frac{(1.036,41 - 1009,35)}{1.036,41} \times 100\%$$

$$\text{Error} = 2,61\%$$

- Error Speed motor induksi pada pompa 2 tanpa kontrol PID

$$Error = \frac{(1.281,51 - 1.239,59)}{1.281,51} \times 100\%$$

$$Error = 3,27\%$$

- c. Error Frekuensi pada pompa 1 tanpa kontrol PID

$$Error = \frac{(35 - 33,65)}{35} \times 100\%$$

$$Error = 3,87\%$$

- d. Error Frekuensi pada pompa 2 tanpa kontrol PID

$$Error = \frac{(43,25 - 41,32)}{43,25} \times 100\%$$

$$Error = 4,47\%$$

- e. Error Flow Air pada pompa 1 tanpa kontrol PID

$$Error = \frac{(184,9 - 182,1)}{184,9} \times 100\%$$

$$Error = 1,51\%$$

- f. Error Flow Air pada pompa 2 tanpa kontrol PID

$$Error = \frac{(250,96 - 236,8)}{250,96} \times 100\%$$

$$Error = 5,64\%$$

2. Rekap Simulink Matlab kontrol PID

Tabel 4. 3. Pompa 1 kontrol PID

No	Speed	Freq (Hz)	V	A	Flow (m ³ /h)
1	1.036,07	34,54	420	13,79	187
2	1.035,97	34,53	420	13,2	187
3	1.035,76	34,53	418	13,74	187
4	1.036,02	34,53	419	13,76	187
Rata rata	1.035,96	34,53	418	13,72	187

Tabel 4. 4. Pompa 2 kontrol PID

No	Speed	Freq (Hz)	V	A	Flow (m ³ /h)
1	1.281	42,7	420	18,6	244,7
2	1.281	42,7	430	18,7	244,7
3	1.281,7	42,7	424	18,8	244,8
4	1.282,9	42,7	416	19	245,1
Rata rata	1.281,68	42,7	418	18,9	244,8

Perhitungan Error antara data pengukuran dibanding simulasi matlab Simulink kontrol dengan menggunakan PID, untuk rumus perhitungan Error sebagai berikut :

$$Error = \frac{data\ pengukuran - data\ simulasi}{data\ pengukuran} \times 100\%$$

Menggunakan Kontrol PID

- a. Error Speed motor induksi pada pompa 1 menggunakan kontrol PID

$$Error = \frac{(1.036,41 - 1.035,96)}{1.036,41} \times 100\%$$

$$Error = 0,04\%$$

- b. Error Speed motor induksi pada pompa 2 menggunakan kontrol PID

$$Error = \frac{(1.281,51 - 1.281,68)}{1.281,51} \times 100\%$$

$$Error = 0,01\%$$

- c. Error Frekuensi pada pompa 1 menggunakan kontrol PID

$$Error = \frac{(35 - 34,53)}{35} \times 100\%$$

$$Error = 1,34\%$$

- d. Error Frekuensi pada pompa 2 menggunakan kontrol PID

$$Error = \frac{(43,25 - 42,72)}{43,25} \times 100\%$$

$$Error = 1,22\%$$

- e. Error Flow Air pada pompa 1 menggunakan kontrol PID

$$Error = \frac{(184,9 - 186,9)}{184,9} \times 100\%$$

$$Error = 1,08\%$$

- f. Error Flow Air pada pompa 2 menggunakan kontrol PID

$$Error = \frac{(250,96 - 244,8)}{250,96} \times 100\%$$

$$Error = 2,45\%$$

3. Rekapitulasi Hasil Analisa

Tabel 4. 5. Hasil Analisa kontrol PID

No	Uraian	Error		Eff Daya	
		Tanpa PID	PID	Tanpa PID	PID
A	Pompa 1				
1	Speed	2,61 %	0,04 %	104,57 %	99,03 %
2	Freq	3,87 %	1,34 %		
3	Flow air	1,51 %	1,08 %		
B	Pompa 2				

1	Speed	3,27 %	0,01 %	104,65 %	98,79 %
2	Freq	4,47 %	1,22 %		
3	Flow air	5,64 %	2,45 %		

5. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil simulasi, pengambilan data dilapangan dan perhitungan yang dilakukan untuk mengetahui pengendalian kecepatan motor induksi 3 phasa pada pompa centrifugal menggunakan *Variable Frequency Drive* dapat diambil kesimpulan sebagai berikut :

- Simulasi pengaturan motor induksi untuk menggerakkan pompa centrifugal dengan *Variable Frequency Drive* menggunakan kontrol PID menghasilkan respon yang lebih baik dibandingkan dengan tidak menggunakan kontrol PID.
- Dengan menggunakan kontrol PID juga akan meningkatkan effisiensi Daya pada motor Induksi, sehingga lebih menghemat biaya pemakaian energi listrik.
- Kondisi pada pompa 1 hasil rata rata tanpa kontrol PID yaitu nilai rise time = 6,826 ms, nilai steady state error = 0,0261s, nilai overshoot = 25,949%, sedangkan menggunakan control PID yaitu nilai rise time = 41,418 ms, nilai steady state error = 0,00043s, nilai overshoot = 0,144%.
- Kondisi pada pompa 2 hasil rata rata tanpa kontrol PID yaitu nilai rise time = 11,687 ms, nilai steady state error = 0,0001s, nilai overshoot = 32,667%, sedangkan menggunakan kontrol PID yaitu nilai rise time = 46,159 ms, nilai steady state error = 0,00005s, nilai overshoot = 1,765%.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada dosen pembimbing dan seluruh pihak di Program Studi Teknik Elektro Institut Teknologi Adhi Tama Surabaya yang telah memberikan bimbingan, fasilitas, serta masukan yang sangat berarti dalam penyusunan dan pelaksanaan penelitian ini. Terima kasih juga disampaikan kepada rekan-rekan mahasiswa/kerja yang telah memberikan semangat dan dukungan selama proses simulasi dan penyusunan laporan ini. Semoga penelitian

ini dapat memberikan kontribusi positif bagi pengembangan sistem kontrol di bidang teknik elektro.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] S. A. Prabowo, W. Dwiono, and A. J. Taufiq, “The Analysis Of 3 Phase 1 HP Induction Motor Efficiency In Under Voltage And Over Voltage Condition With PSIM Simulation,” *J. Ris. Rekayasa Elektro*, vol. 1, no. 2, 2020, doi: 10.30595/jrre.v1i2.5232.
- [2] M. Sinusoidal and P. M. Spwm, “Desain Penggunaan Variable Frequency Drive (VFD) Pada Starting-Up Motor Induksi 3 Fasa Menggunakan Metode Sinusoidal Pulse-Width Modulation (SPWM),” vol. 9, no. 3, pp. 317–329, 2024.
- [3] I. Faturrohman, “Pengaturan Kecepatan Motor Induksi 3fasa Dengan Mengatur Frekuensi Menggunakan VSD di PERUMDAM Tirta Madani Serang,” vol. 2, no. 1, 2023.
- [4] F. Fatqurrohman, “C.431.17.0013-15-File-Komplit-20220302095338,” 2021.
- [5] A. B. F. Fakhri, Y. A. Deavy, and M. Putri, “Analisis Pengaruh Kendali Putar Motor Induksi Tiga Fasa Menggunakan Vfd Siemens,” *Pros. Konf. Nas. ...*, pp. 674–683, 2022, [Online]. Available: <http://ojs.polmed.ac.id/index.php/KONSEP2021/article/view/894%0Ahttps://ojs.polmed.ac.id/index.php/KONSEP2021/article/download/894/479>
- [6] B. D. Nugraha, S. Safaruddin, and A. D. Andre, “Analisis Sistem Starting Soft Starter Motor Listrik Pt.Semen Baturaja,” *J. Multidisipliner Kapalamada*, vol. 1, no. 03, pp. 412–419, 2022, doi: 10.62668/kapalamada.v1i03.280.
- [7] U. P. Pancabudi, “MOTOR INDUKSI PADA SISTEM PENGERAK,” vol. 13, no. 3, pp. 423–430.
- [8] M. I. B. Fauzy, “Eksitasi Generator,” 2016. [Online]. Available: <https://scientricalengineering.wordpress.com/kuliah/mesin-elektrik/mesin-ac/eksitasi-generator/>
- [9] A. F. Huda, “Sistem Kendali Kecepatan Motor Cooler Fan 55Fn08Mt01 Pada Grate Cooler Clinker Menggunakan Variable Frequency Drive (Vfd) Di Pt Semen Baturaja Tbk,” *J. Inform. dan Tek. Elektro Terap.*, vol. 12, no. 2, pp. 1124–1130, 2024, doi: 10.23960/jitet.v12i2.4172.
- [10] Maeli Khusnul Munfiqoh and Didik Aribowo, “Pengendalian Kecepatan Motor Induksi Tiga Fasa Menggunakan Variable Frequency-Drive (VFD) Untuk Mendeteksi Aliran dan Tekanan

- Air Pada Modul Pumps Training System PT. Festo Indonesia," *J. Sains dan Teknol.*, vol. 1, no. 2, pp. 24–34, 2022, doi: 10.58169/saintek.v1i2.74.
- [11] W. T. Sirait, "Studi Kinerja Pompa Sentrifugal Sebagai Pendistribusi Air Pada Finish Water Pump Di PDAM Tirtanadi IPAM Sunggal," *J. Ilm. Tenaga List.*, vol. 4, no. 1, pp. 1–9, 2024.
- [12] A. Yani, "Analisis Karakteristik Pompa Air Type Sentrifugal Kapasitas 34 Liter/Menit Dengan Daya Pompa 125 Watt," *J. Sains Terap.*, vol. 5, no. 1, pp. 1–7, 2022.
- [13] H. Liu and Y. Zhi, "Design of Variable Frequency Speed Regulation and Constant Pressure Water Supply System," *OALib*, vol. 07, no. 12, pp. 1–12, 2020, doi: 10.4236/oalib.1107018.
- [14] A. Primagani, Z. Afnan, F. R. Husna, and E. N. Firdausi, "Kontrol Level Ketinggian Air Tandon Penguin 1500 Liter Menggunakan Matlab," vol. 13, no. 3, pp. 229–237.
- [15] P. N. Paraskevopoulos, *Modern control engineering*. 2017. doi: 10.1201/9781315214573.