

# Peluang Penghematan Energi Pada Motor Induksi 3 Fasa Dengan Penggerak Variable Speed Drive (VSD)

Farhan Wahyu Nur Rahman<sup>1</sup>, Nia Renanda<sup>2</sup>, Edy Setiawan<sup>3\*</sup>, Anda Iviana Juniani<sup>4</sup>, Wiedartini<sup>5</sup>, Lugas Jagad Satrianata<sup>6</sup>

<sup>1,3,6</sup> Teknik Otomasi, Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya, Indonesia

<sup>2</sup> Manajemen Bisnis, Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya, Indonesia

<sup>4</sup> Teknik Desain Manufaktur, Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya, Indonesia

<sup>5</sup> Teknik Keselamatan dan Kesehatan Kerja, Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya

Email: edy\_setiawan@ppns.ac.id

**Abstrak**— Sebagian besar beban di industri adalah motor. Sehingga penggunaan energi terbesar adalah pada penggunaan motor. Penelitian ini untuk membuktikan pengaruh perubahan kecepatan pada motor induksi tiga fase terhadap konsumsi energi dengan penggerak VSD. Metode yang digunakan dalam pembuktian ini menggunakan metode eksperimen langsung dan analisa data. Melalui pengujian dan analisis data, hubungan antara kecepatan dan penggunaan energi dapat ditunjukkan. Hasilnya menunjukkan bahwa VSD di atur pada frekuensi 20 Hz dan 40 Hz, untuk mengatur kecepatan motor sebagai penggerak pompa dapat menghemat penggunaan energinya. Menghasilkan penurunan konsumsi energi sebesar 20,54% dan pengurangan biaya operasional hingga Rp. 3.292,32 per bulan pada implementasi motor sebagai penggerak pompa.

**Kata Kunci**— motor induksi, Variable Speed Drive, efisiensi energi, konsumsi energi, kecepatan putar

## I. PENDAHULUAN

Perkembangan teknologi di era modern telah membawa perubahan signifikan dalam berbagai aspek kehidupan, termasuk di sektor industri. Salah satu inovasi yang menjadi fokus perhatian adalah penggunaan Variable Speed Drive (VSD) dalam mengontrol kecepatan motor induksi tiga fasa. Teknologi ini menawarkan solusi yang lebih efisien dan fleksibel dalam mengendalikan putaran motor, yang merupakan komponen krusial dalam banyak proses industri. Motor induksi tiga fasa telah lama menjadi pilihan utama di sektor industri karena keunggulan efisiensi dan keandalannya [1]. Namun, konsumsi energi yang besar dari motor-motor ini tetap menjadi perhatian utama, mengingat dampaknya terhadap biaya operasional dan lingkungan. Aspek krusial ini menjadi lebih relevan mengingat bahwa tingkat konsumsi energi motor sangat dipengaruhi oleh kecepatan putarnya [2]. Penggunaan VSD membuka peluang baru dalam optimalisasi kinerja motor induksi. Teknologi ini memungkinkan penyesuaian dinamis kecepatan putar motor sesuai dengan tuntutan beban, yang berpotensi menghasilkan efisiensi energi yang lebih tinggi [3]. Kemampuan VSD dalam mengatur kecepatan motor secara presisi tidak hanya meningkatkan efisiensi energi, tetapi juga dapat memperpanjang umur motor dan mengurangi keausan mekanis [4].

Penelitian ini bertujuan untuk membuktikan pengaruh variasi kecepatan putaran terhadap konsumsi energi pada motor induksi tiga fasa yang dikendalikan menggunakan VSD. Dengan memahami korelasi antara kecepatan putar

dan konsumsi energi, diharapkan dapat diperoleh informasi berharga untuk memaksimalkan efisiensi energi dan menekan biaya operasional [5]. Di era di mana efisiensi energi menjadi prioritas global, optimalisasi konsumsi energi pada sistem motor listrik menjadi isu yang sangat krusial [6]. Mengingat prevalensi penggunaan motor induksi tiga fasa di industri, peningkatan efisiensi energi pada motor jenis ini dapat memberikan dampak penghematan energi yang signifikan secara keseluruhan [7]. Pengendalian kecepatan putar motor menggunakan VSD telah terbukti mampu meningkatkan efisiensi energi secara nyata dibandingkan dengan metode konvensional [5]. Kemampuan VSD untuk mengoptimalkan kecepatan motor sesuai kebutuhan beban tidak hanya menghasilkan penghematan energi, tetapi juga dapat meningkatkan presisi kontrol proses dan mengurangi kebisingan operasional [8].

Penelitian ini diharapkan mampu memberikan kontribusi berarti dalam pemahaman yang lebih mendalam tentang hubungan antara kecepatan putaran dan konsumsi energi pada motor induksi tiga fasa yang dikendalikan dengan VSD.. Hasil yang diperoleh dapat menjadi acuan berharga bagi industri dan praktisi dalam upaya meningkatkan efisiensi energi, mengurangi biaya operasional, dan mendukung praktik manufaktur yang lebih berkelanjutan.

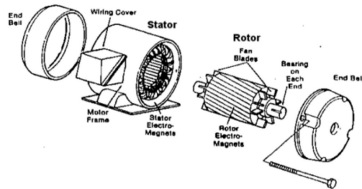
## II. BAHAN DAN METODE

Metode yang digunakan dalam pembuktian ini menggunakan metode eksperimen langsung dan analisa data. Pada tahap pertama, mempersiapkan peralatan, melakukan identifikasi nameplate pada motor induksi yang digunakan dan kebutuhan VSD yang sesuai. tahap selanjutnya adalah melakukan instalasi hubungan motor dengan VSD. Instrumen pengukuran termasuk unit pengukuran dan perangkat akuisisi data sesuai prosedur yang ditentukan yang dimasukkan dengan baik ke dalam proses ini. Selama tahap pengujian, motor dijalankan dalam kecepatan yang berbeda yang diatur dengan VSD. Dalam setiap kecepatan, pengukuran konsumsi energi, arus, voltase, dan parameter lain yang relevan dilakukan. Data dianalisis dalam bentuk grafik dan tabel yang menunjukkan hubungan antara kecepatan dan konsumsi energi.

### A. Motor Induksi

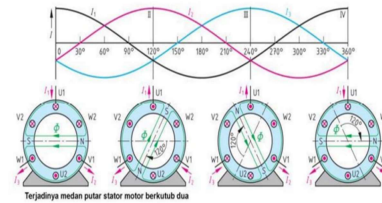
Motor listrik memiliki fungsi untuk mengubah energi listrik menjadi energi mekanik dalam bentuk tenaga putar.

Motor ini terdiri dari dua komponen utama, yaitu stator yang merupakan bagian diam, dan rotor yang merupakan bagian berputar. Pada motor AC, kumparan rotor tidak mendapatkan energi listrik secara langsung, melainkan melalui induksi, mirip dengan prinsip kerja transformator. Motor Listrik Tiga Fasa adalah jenis motor yang paling umum digunakan dalam berbagai aplikasi industri. Popularitasnya disebabkan oleh desainnya yang sederhana, harganya yang terjangkau, kemudahan akses, dan kemampuannya untuk langsung terhubung ke sumber daya AC [9].



Gambar 1. Motor Induksi

Secara umum, motor induksi terdiri dari dua komponen utama: rotor dan stator. Rotor adalah bagian yang bergerak, berbentuk silinder dan terpasang pada poros motor. Rotor dapat berupa jenis sangkar tupai (squirrel cage) atau rotor belitan (wound rotor), dengan yang pertama lebih umum digunakan karena kesederhanaan dan ketahanannya. Stator, di sisi lain, adalah bagian yang diam dan mengelilingi rotor. Stator terdiri dari rangka besi yang memiliki slot-slot untuk menempatkan kumparan tiga fasa. Di antara rotor dan stator terdapat celah udara yang sangat kecil, biasanya hanya beberapa milimeter. Celah udara ini sangat penting karena mempengaruhi efisiensi motor dan karakteristik torsi. Celah yang terlalu besar dapat mengurangi efisiensi, sementara celah yang terlalu kecil dapat menyebabkan gesekan mekanis. Ketika stator dihubungkan dengan sumber tegangan AC tiga fasa, arus tiga fasa akan mengalir melalui kumparan stator. Setiap kumparan fasa biasanya terdistribusi dan tersusun sedemikian rupa untuk menghasilkan distribusi fluks magnet yang mendekati sinusoidal. Arus AC tiga fasa yang mengalir pada stator ini akan menghasilkan fluks bolak-balik dalam masing-masing kumparan. Interaksi fluks dari setiap fasa akan menciptakan medan putar. Fenomena ini dikenal sebagai medan magnet berputar, yang merupakan prinsip dasar operasi motor induksi. Medan putar ini bergerak dengan kecepatan sinkron, yang ditentukan oleh frekuensi suplai dan jumlah kutub motor. Kecepatan medan putar ini kemudian menginduksi arus pada rotor melalui induksi elektromagnetik, mirip dengan prinsip kerja transformator. Arus yang terinduksi pada rotor berinteraksi dengan medan magnet stator, menghasilkan gaya elektromagnetik yang menyebabkan rotor berputar. Namun, rotor selalu berputar sedikit lebih lambat dari medan putar stator, perbedaan kecepatan ini disebut slip. Slip ini penting karena tanpanya, tidak ada arus yang akan terinduksi pada rotor dan motor tidak akan menghasilkan torsi. Desain dan konstruksi yang tepat dari komponen-komponen ini, serta pemahaman mendalam tentang prinsip-prinsip elektromagnetik yang mendasarinya, sangat penting untuk mencapai kinerja motor yang optimal dalam hal efisiensi, torsi, dan kecepatan [10].



Gambar 2. Bentuk gelombang sinusoidal dan timbulnya medan putar pada stator motor induksi

- Pada sudut  $0^\circ$ , arus  $I_1$  memiliki nilai positif, sedangkan arus  $I_2$  dan  $I_3$  memiliki nilai negatif. Dalam kondisi ini, lilitan  $V_2$ ,  $U_1$ , dan  $W_2$  diberi tanda silang (menandakan arus keluar dari pembaca), sementara lilitan  $V_1$ ,  $U_2$ , dan  $W_1$  diberi tanda titik (menandakan arus masuk ke pembaca). Pada sudut  $0^\circ$ , fluks magnet terbentuk pada garis horizontal, dengan kutub S (selatan) dan kutub N (utara).
- Pada sudut  $120^\circ$ , arus  $I_2$  memiliki nilai positif, sementara arus  $I_1$  dan  $I_3$  bernilai negatif. Lilitan  $W_2$ ,  $V_1$ , dan  $U_2$  ditandai dengan tanda silang (arus meninggalkan pembaca), sedangkan kawat  $W_1$ ,  $V_2$ , dan  $U_1$  ditandai dengan titik (arus menuju pembaca). Fluks magnetik kutub S dan N mengalami pergeseran sebesar  $120^\circ$  dari posisi awal.
- Pada sudut  $240^\circ$ , arus  $I_3$  memiliki nilai positif, sedangkan arus  $I_1$  dan  $I_2$  memiliki nilai negatif. Lilitan  $U_2$ ,  $W_1$ , dan  $V_2$  ditandai dengan tanda silang (arus menjauh dari pembaca), sementara kawat  $U_1$ ,  $W_2$ , dan  $V_1$  ditandai dengan titik (arus menuju pembaca). Fluks magnetik kutub S dan N bergeser sebesar  $120^\circ$  dari posisi kedua.
- Pada sudut  $360^\circ$ , posisinya sama seperti pada sudut  $0^\circ$ , di mana kutub S dan N kembali ke posisi awal.

### B. Prinsip Kerja Motor Induksi

Motor induksi bekerja berdasarkan prinsip induksi elektromagnetik antara kumparan stator dan rotor. Ketika kumparan stator motor induksi tiga fasa terhubung ke sumber tegangan tiga fasa, kumparan tersebut menciptakan medan magnet berputar. Konduktor pada rotor yang dialiri arus berada dalam garis gaya fluks dari kumparan stator, sehingga kumparan rotor mengalami gaya Lorentz. Medan putar stator akan memotong konduktor-konduktor pada rotor, sehingga rotor berputar mengikuti medan putar stator [11]. Kecepatan putaran medan putar ini dikenal sebagai kecepatan sinkron, yang nilainya adalah sebagai berikut:

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

Dimana :

$n_s$  = kecepatan sinkron motor (rpm)

$F$  = frekuensi (Hz)

$P$  = jumlah kutub motor

Misalkan rotor pada motor induksi berputar dengan kecepatan  $\omega_r$  dan medan magnet stator berputar dengan kecepatan  $\omega_s$ . Perbedaan kecepatan relatif antara kecepatan medan magnet stator yang berputar dan kecepatan rotor ini dikenal sebagai kecepatan slip, dengan nilai sebagai berikut:

$$Slip = \frac{n_s - n_r}{n_s} \quad (2)$$

Dimana :

$S$  = slip motor

$n_s$  = kecepatan sinkron motor (rpm)

$n_r$  = kecepatan motor (rpm)

### C. Variable Speed Drive (VSD)

Variable Speed Drive (VSD), atau sering disebut sebagai inverter, adalah perangkat yang menggunakan dioda untuk menyearahkan tegangan AC (arus bolak-balik) menjadi tegangan DC (arus searah), kemudian mengonversinya kembali menjadi tegangan AC. [12]. Pada umumnya, VSD pertama-tama mengonversi arus AC menjadi arus DC melalui rangkaian penyearah. Pilihan yang lebih canggih adalah menggunakan penyearah terkontrol (inverter). Setelah arus AC diubah menjadi arus DC, langkah berikutnya adalah meratakan bentuk gelombang DC yang biasanya memiliki riak, dengan menambahkan komponen yang disebut link atau penyearah DC.



Gambar 3. Variable Speed Drive (VSD)

Setelah mendapatkan tegangan DC yang stabil, langkah selanjutnya adalah mengonversinya kembali menjadi arus AC menggunakan rangkaian inverter. Rangkaian inverter berperan dalam mengubah arus DC secara bergantian untuk menghasilkan arus AC. Sebelum akhirnya diterapkan pada motor induksi, diperlukan rangkaian modulasi lebar pulsa (PWM). Proses ini bertujuan untuk mengubah arus DC menjadi arus AC dengan frekuensi yang diinginkan [13].

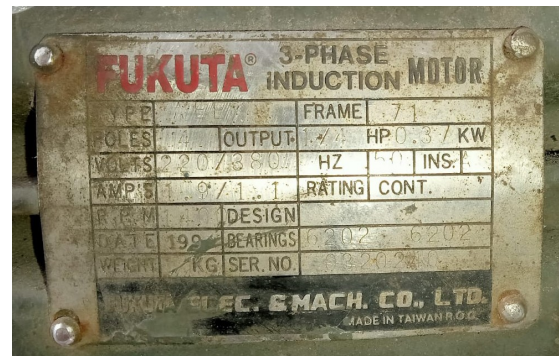
### D. Prinsip Kerja Variable Speed Drive

Secara sederhana, prinsip kerja Variable Speed Drive (VSD atau Inverter Drive bekerja serupa dengan inverter sederhana. Prinsip kerjanya melibatkan konversi AC menjadi DC, yang kemudian diatur menggunakan teknik penyearahan untuk mengubah DC menjadi tegangan dan frekuensi keluaran AC yang bervariasi sesuai dengan kebutuhan frekuensi untuk mengatur kecepatan putar motor [14]. Tegangan dari jaringan 50 Hz diteruskan ke Board Rectifier (penyearah DC) dan kemudian disimpan di dalam Capacitor Bank. [15]. Tegangan DC selanjutnya dikirim ke Board Inverter untuk diubah kembali menjadi AC dengan frekuensi yang diperlukan. Dengan memanfaatkan frekuensi pembawa (hingga 20 kHz), tegangan DC dimodulasi sehingga menghasilkan tegangan dan frekuensi yang diinginkan [16].

## III. HASIL DAN PEMBAHASAN

### A. Pengujian Motor Tanpa menggunakan VSD

Motor ini adalah motor induksi tiga fasa merek FUKUTA dengan frame berukuran 71. Motor ini memiliki output sebesar 1/4 HP atau 0.33 kW, dan dapat beroperasi pada tegangan 220/380 V dengan frekuensi 50 Hz. Arus yang dibutuhkan adalah 0.9/1.1 A dengan rating continuous. Motor ini diproduksi oleh Fukuta Elec. & Mach. Co. Ltd. pada tahun 1992 di Taiwan, R.O.C., dan dilengkapi dengan bantalan tipe 6202 [17]. Nomor serinya adalah 823020. Nameplate motor dapat dilihat pada gambar dibawah.



Gambar 4. nameplate motor induksi

Motor beroperasi 1 kali dalam 24 jam dengan pembebanan digunakan untuk motor pompa air bertekanan tinggi dan dalam sekali beroperasi motor memerlukan waktu 1 jam. Pengujian akan dilakukan dengan tanpa menggunakan *variable speed drive* dan akan dibandingkan dengan pengujian yang menggunakan *variable speed drive*. Hasil pengukuran penggunaan motor dengan tanpa inverter dapat dilihat pada Tabel 1.

TABLE I. HASIL PENGUKURAN TEGANGAN, ARUS, DAYA DAN ENERGI LISTRIK MOTOR INDUKSI TIGA PHASA TANPA VSD

Frekuensi (Hz)	Arus (A)	Power Faktor	Tegangan (Volt)	Total Daya (KW)	Kecepatan (RPM)
50	1,19	0,745	239.77	0,392	1400.05
50	1.12	0.671	242.57	0.345	1408.93
50	1.15	0.701	241.21	0.378	1400.63
50	1.21	0.696	243.77	0.356	1402.01
50	1.19	0.731	241.98	0.353	1409.42
50	1.05	0.729	240.64	0.358	1393.26

Frekuensi (Hz)	Arus (A)	Power Faktor	Tegangan (Volt)	Total Daya (KW)	Kecepatan (RPM)
50	1.15	0.703	242.94	0.364	1393.65
50	1.09	0.708	243.86	0.371	1404.85
50	1.09	0.682	243.13	0.347	1394.13
50	1.12	0.660	243.60	0.388	1409.72
50	1.11	0.693	241.73	0.379	1397.93
50	1.17	0.703	242.27	0.339	1396.26
50	1.14	0.725	241.66	0.400	1409.61
50	1.11	0.724	242.28	0.408	1407.40
50	1.12	0.629	241.37	0.394	1409.34
50	1.12	0.694	239.55	0.366	1404.53
50	1.17	0.679	243.35	0.349	1395.69
50	1.09	0.672	242.20	0.391	1409.55
50	1.12	0.666	239.74	0.362	1398.66
50	1.06	0.739	243.93	0.394	1404.01
50	0.97	0.690	241.19	0.374	1404.74
50	1.13	0.691	243.10	0.390	1399.22
50	1.14	0.675	244.46	0.377	1403.07
50	1.06	0.716	243.26	0.384	1404.61
50	1.12	0.699	242.23	0.373	1402.55

Berdasarkan hasil pengukuran selama 24 jam pada Tabel 1, motor induksi tiga fase tanpa VSD menunjukkan kinerja yang stabil dengan beberapa variasi dalam parameter operasional. Frekuensi sistem tercatat konsisten pada 50 Hz, yang merupakan standar frekuensi listrik di banyak negara, menunjukkan kestabilan frekuensi sistem listrik yang digunakan.

Arus yang ditarik oleh motor bervariasi antara 0.97 A hingga 1.21 A, dengan rata-rata 1.12 A. Variasi arus ini kemungkinan besar disebabkan oleh fluktuasi beban yang terhubung ke motor, mengakibatkan perubahan arus yang ditarik. Power faktor berkisar antara 0.66 hingga 0.75, dengan rata-rata 0.699. Nilai ini menunjukkan adanya komponen reaktif dalam sistem yang menyebabkan arus dan tegangan tidak sefase, serta menunjukkan bahwa efisiensi sistem tidak optimal karena ada energi yang hilang dalam bentuk panas.

Tegangan yang diukur bervariasi antara 239 V hingga 245 V dengan rata-rata 242.23 V. Fluktuasi tegangan ini berada dalam batas yang dapat diterima untuk kebanyakan aplikasi industri dan mencerminkan variasi normal dalam sistem distribusi listrik. Total daya yang dikonsumsi motor berkisar antara 0.34 KW hingga 0.41 KW, dengan rata-rata 0.373 KW. Variasi dalam daya total ini adalah hasil dari fluktuasi arus dan tegangan, dan menunjukkan bahwa beban yang terhubung ke motor tidak terlalu besar.

Kecepatan motor berkisar antara 1393 RPM hingga 1410 RPM, dengan rata-rata 1402.55 RPM. Kecepatan motor yang hampir konstan menunjukkan bahwa motor beroperasi secara stabil dan tidak terpengaruh oleh fluktuasi beban yang signifikan.

Secara keseluruhan, motor induksi tiga fase yang digunakan menunjukkan kinerja yang cukup stabil.

Tegangan dan frekuensi yang konsisten memastikan operasi motor yang andal. Namun, power faktor yang relatif rendah menunjukkan adanya peluang untuk meningkatkan efisiensi sistem. Penggunaan perangkat seperti kapasitor bank untuk koreksi faktor daya dapat meningkatkan efisiensi dan mengurangi kehilangan energi. Selain itu, pemantauan berkala pada parameter operasional motor dan pemeliharaan rutin dapat membantu dalam mendeteksi masalah sebelum menjadi kritis, memastikan operasi motor yang lebih efisien dan andal.

Di bawah ini adalah perhitungan penggunaan energi listrik tanpa VSD berdasarkan data pengukuran rata-rata. [18]. Daya dan konsumsi energi listrik dari motor induksi tiga fasa dapat dihitung berdasarkan data rata-rata yang tercantum dalam Tabel 1, dengan hasil sebagai berikut:

$$\begin{aligned}
 P &= \sqrt{3} \times V \times I \times \text{Cosphi} \\
 &= \sqrt{3} \times 243 \times 1.1 \times 0,7 \\
 &= 370,381 \text{ Watt} \\
 &= 0,37 \text{ Kw}
 \end{aligned}$$

Penggunaan energi listrik selama satu jam untuk satu unit motor induksi tiga fasa yang berfungsi sebagai pompa air adalah sebagai berikut:

$$\begin{aligned}
 W &= 0,37 \text{ Kw} \times 1 \text{ jam} \\
 &= 0,37 \text{ kWh}
 \end{aligned}$$

Penghitungan biaya penggunaan energi listrik untuk motor induksi tiga fasa yang digunakan sebagai motor penggerak pompa dilakukan dengan asumsi biaya per kWh energi listrik sebesar Rp. 1.444,-sebagai berikut:

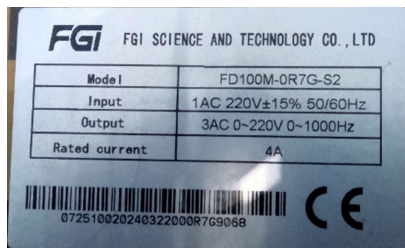
$$\begin{aligned}
 \text{Biaya Pemakaian energi listrik (per hari)} \\
 &= 0,37 \text{ Kw} \times 1 \text{ jam} \times \text{Rp. } 1.444 \\
 &= \text{Rp. } 534.280, -
 \end{aligned}$$

## B. Pengujian Motor Dengan Menggunakan Variable Speed Drive (VSD)

Variable Speed Drive (VSD) adalah perangkat elektronik yang berfungsi untuk mengatur kecepatan motor listrik dengan mengubah frekuensi. [19].

Analisis dilakukan pada beberapa parameter. Pertama, dilakukan pengamatan terhadap perubahan tegangan sebagai respons terhadap variasi frekuensi yang diatur oleh VSD. Kedua, putaran motor (RPM) diukur pada berbagai tingkat frekuensi untuk memahami hubungan antara frekuensi dan kecepatan motor. Ketiga, analisis dilakukan terhadap perubahan debit aliran pompa (yang dilakukan pada eksperimennya), yang mencerminkan kondisi operasional yang berbeda-beda dalam aplikasinya.

Pada gambar 5 menunjukkan detail spesifikasi inverter, yang mencakup informasi seperti rentang frekuensi output, kapasitas daya, tegangan input dan output, serta fitur-fitur kontrol yang tersedia. Pemahaman mendalam tentang spesifikasi ini penting untuk menginterpretasikan hasil penelitian dan memastikan bahwa VSD digunakan secara optimal sesuai dengan karakteristik motor induksi yang diuji. Pengujian dilakukan dengan menggunakan inverter Variable Speed Drive (VSD) pada kondisi frekuensi yang berbeda sesuai dengan spesifikasi inverter. Tujuan dari pengujian ini adalah untuk mengevaluasi kinerja motor induksi 3 fasa dengan menggunakan VSD. Hasil pengujian motor dengan menggunakan inverter dapat dilihat pada Tabel 2 yang meliputi arus, tegangan, daya, faktor daya dan kecepatan motor pada setiap pengaturan frekuensi. Analisis ini membantu untuk memahami bagaimana variasi frekuensi mempengaruhi efisiensi dan kinerja motor induksi 3 fasa dalam aplikasi industri.



Gambar 5. Spesifikasi Inverter Variable Speed Drive

TABLE II. HASIL PENGUKURAN TEGANGAN, ARUS, DAYA DAN ENERGI LISTRIK MOTOR INDUKSI TIGA PHASA MENGGUNAKAN VSD

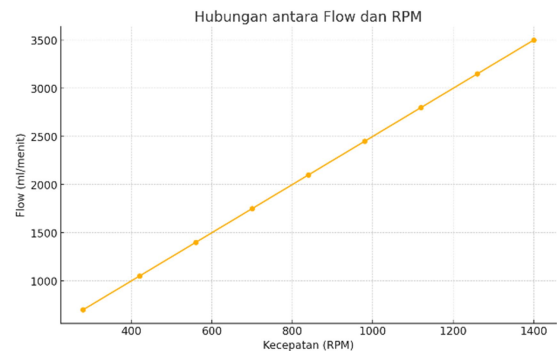
Frekuensi (Hz)	Arus (A)	Pow er Faktor	Tegangan (Volt)	Tot al Daya (K W)	Kecepatan (RPM)	Flow (ml/menit)
50	1,0	0,7	243	0,29	1400	3500
45	1,0	0,7	219	0,26	1260	3150
40	1,0	0,7	194	0,23	1120	2800
35	1,0	0,7	170	0,20	980	2450
30	1,0	0,7	146	0,17	840	2100
25	1,1	0,7	122	0,16	700	1750
20	1,1	0,7	97	0,12	560	1400
15	1,1	0,7	73	0,09	420	1050
10	1,1	0,7	49	0,06	280	700

Tabel 2 menunjukkan hubungan linear antara frekuensi motor dan flow pompa, di mana penurunan frekuensi menyebabkan penurunan flow secara proporsional. Ini sesuai dengan hukum afinitas pompa yang menyatakan bahwa flow berbanding lurus dengan kecepatan motor. Meskipun flow menurun seiring dengan penurunan frekuensi, total daya yang digunakan juga berkurang. Hal ini mengindikasikan adanya potensi penghematan energi ketika pompa beroperasi pada frekuensi yang lebih rendah, khususnya untuk aplikasi yang tidak memerlukan aliran maksimum.

Sistem ini menawarkan rentang operasi yang luas, mulai dari 700 ml/menit pada 10 Hz hingga 3500 ml/menit pada 50 Hz, memberikan fleksibilitas yang signifikan dalam pengendalian flow untuk berbagai kebutuhan aplikasi. Kecepatan motor berkurang secara linear dengan penurunan frekuensi, yang dapat memperpanjang umur komponen mekanis pompa dan motor jika dioperasikan pada kecepatan yang lebih rendah untuk jangka waktu yang lama.

Menariknya, arus motor tetap relatif konstan pada 1,0 A untuk frekuensi 30-50 Hz, tetapi sedikit meningkat menjadi 1,1 A pada frekuensi yang lebih rendah. Ini mungkin menunjukkan bahwa motor bekerja kurang efisien pada frekuensi yang sangat rendah. Tegangan juga menurun secara linear dengan penurunan frekuensi, karakteristik normal dari Variable Speed Drive (VSD) yang digunakan.

Namun, perlu dicatat bahwa operasi pada frekuensi sangat rendah (di bawah 20 Hz) mungkin tidak direkomendasikan untuk penggunaan jangka panjang karena dapat mempengaruhi pendinginan motor dan efisiensi pompa.



Gambar 6. Karakteristik RPM Motor dan Tegangan

Hasil pengujian yang ditampilkan pada Gambar 1 menunjukkan bahwa, secara umum, peningkatan tegangan mempengaruhi kecepatan putar motor. Seperti halnya frekuensi, tegangan keluaran dari VSD akan semakin menurun seiring dengan penurunan frekuensi. Di bawah ini disajikan perhitungan konsumsi energi listrik menggunakan VSD.

Daya kuda dan biaya operasi listrik (operasional) dari motor induksi tiga fase yang digunakan sebagai penggerak pompa air dapat dihitung dengan menggunakan data pada Tabel 2. Hasil perhitungan tersebut adalah sebagai berikut:

$$P = \sqrt{3} \times V \times I \times \text{Cosphi}$$

$$\begin{aligned}
 &= \sqrt{3} \times 243 \times 1,0 \times 0,7 \\
 &= 294,621 \text{ Watt} \\
 &= 0,294 \text{ Kw}
 \end{aligned}$$

Langkah-langkah berikut ini dapat dilakukan untuk menentukan penggunaan energi listrik selama 1 jam dari motor induksi tiga fase yang digunakan sebagai pompa air:

$$\begin{aligned}
 W &= 0,294 \text{ Kw} \times 1 \text{ Jam} \\
 &= 0,294 \text{ kWh}
 \end{aligned}$$

Pemakaian motor selama 1 jam dalam sehari maka biaya energi listrik yang dibutuhkan dapat dihitung dengan hitungan berikut.

$$\begin{aligned}
 \text{Biaya energi listrik} &= 0,294 \text{ kWh} \times 1 \text{ Jam} \times \text{Rp. } 1.444, - \\
 &= \text{Rp. } 424.536, -
 \end{aligned}$$

Berikut adalah perbandingan antara sebelum penggunaan VSD dan Setelah Penggunaan VSD:

TABLE III. PPERBANDINGAN ANTARA SEBELUM PENGGUNAAN VSD DAN SETELAH PENGGUNAAN VSD

	Frekuensi (Hz)	Daya Motor (KW)	Besarnya konsumsi daya yang harus dibayar dalam 1 hari
Sebelum Penggunaan VSD	50	0,37	534.280,-
Setelah Penggunaan VSD	50	0,294	424.536,-
Penghematan			109,744

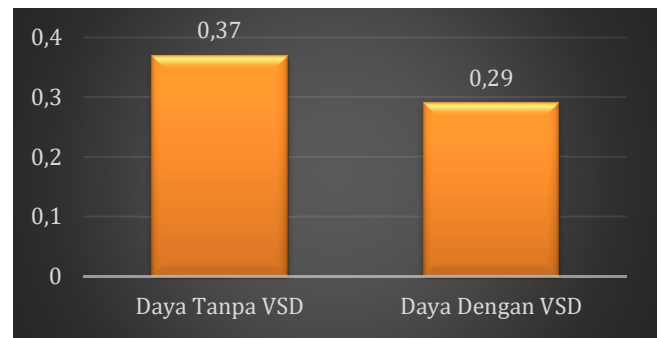
Hasil pengukuran mengungkapkan bahwa efisiensi energi yang didapat dari motor induksi tiga fase, baik tanpa VSD maupun dengan VSD, adalah sebagai berikut:

Penghematan listrik selama satu (1) jam dalam sehari.

$$\begin{aligned}
 &= \frac{0,370 - 0,294}{0,370} \times 100\% \\
 &= 20,54\%
 \end{aligned}$$

Jika dihitung dalam hal biaya, totalnya adalah Rp. 109,744 per hari dan Rp. 3,292.32 per bulan. Perbandingan konsumsi energi listrik antara Tabel 1 dan Tabel 2 menunjukkan bahwa penggunaan energi listrik dengan VSD lebih efisien, yaitu 0.076 kWh lebih rendah dibandingkan dengan motor induksi tanpa VSD, yang berarti penghematan energi listrik sebesar 20.54%.

Hal ini dapat dilihat pada grafik 2 di bawah ini.



Gambar 7. Perbandingan pemakaian energi listrik

#### IV. KESIMPULAN

Penelitian ini menyajikan efektivitas Variable Speed Drive (VSD) dalam meningkatkan kinerja motor induksi tiga fase. Hasil pengujian menunjukkan bahwa VSD mampu mengurangi konsumsi energi listrik sebesar 20,54% dibandingkan dengan pengoperasian tanpa VSD sehingga terjadi penghematan biaya sebesar Rp.3.292,32 per bulan. Menyesuaikan kecepatan motor sesuai dengan beban melalui VSD terbukti efektif dalam meningkatkan efisiensi energi. Temuan ini memberikan wawasan penting bagi sektor industri untuk meningkatkan efisiensi energi dan mengurangi biaya operasional, yang terkait dengan penggunaan motor listrik. Aplikasi VSD pada motor induksi tiga fase menunjukkan potensi besar untuk mengoptimalkan konsumsi energi dan mewujudkan penghematan biaya yang besar di lingkungan industri.

#### DAFTAR PUSTAKA

- [1] Boglietti, A., Cavagnino, A., Ferraris, L., Lazzari, M., & Vaschetto, S. (2020). "Optimization of Induction Motors for Electric Vehicles." *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 67(10), 8803-8811.
- [2] Anijalg, P., Kallaste, A., & Kutt, L. (2021). "Impact of Variable Frequency Drives on Energy Consumption in Industrial Applications." *Energies*, 14(3), 754.
- [3] Alsmadi, Y., Barakat, M., & Maaitah, M. (2021). "Analysis of Energy Savings Using Variable Speed Drives in Industrial Applications." *Energy Reports*, 7, 1342-1350.
- [4] Ferreira, L., & de Almeida, A. (2022). "Energy Efficiency in Electric Motors and Drives: A Review." *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 153, 111720.
- [5] Dutta, P., & Singha, L. (2018). "Variable Speed Drive Control for Energy Efficiency in Induction Motors." *International Journal of Power Electronics and Drive Systems*, 9(4), 1819-1826.
- [6] Goyal, A., Sharma, S., & Verma, R. (2022). "Energy Management in Industrial Motors Using Variable Speed Drives." *Energy Procedia*, 157, 1123-1128.
- [7] IEA (2021). "Energy Efficiency 2021." International Energy Agency. Available at: [www.iea.org](http://www.iea.org).

- [8] Hughes, A., & Drury, B. (2019). *Electric Motors and Drives: Fundamentals, Types and Applications*. 5th Edition. Elsevier.
- [9] Homepage, S., Yang, J., & Zhang, L. (2022). "Recent Advances in Variable Speed Drive Technologies for Industrial Applications." *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 69(5), 3716-3726.
- [10] Fakhri, H., Yusoff, M., & Hamdan, M. (2022). "Modeling and Simulation of Induction Motors Using MATLAB/Simulink." *Journal of Electrical Engineering & Automation*, 4(3), 299-305.
- [11] Mohammad Amir, & Irman Firdaus. (2017). "Performance Analysis of Three-Phase Induction Motors Using Different Speed Control Methods." *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Informatics*, 5(2), 178-185.
- [12] Ahmed, S., Hassan, M., & Hussain, Z. (2022). "Energy Efficient Control of Three-Phase Induction Motor Using Variable Speed Drives." *Journal of Electrical Engineering & Technology*, 17(4), 2135-2145.
- [13] Rivki, M., Ahmad, F., & Abdullah, S. (2022). "Implementation of Advanced Variable Speed Drive for Enhanced Energy Efficiency." *IEEE Access*, 10, 108758-108767.
- [14] Khizer, M., Saeed, M., & Shahbaz, M. (2023). "Performance Analysis of Induction Motor Drives Under Variable Load Conditions." *IEEE Access*, 11, 4567-4576.
- [15] Khokhar, H., Anjum, M., & Raza, M. (2020). "Optimizing Energy Consumption in Industrial Motors Using Variable Speed Drives." *Journal of Control and Decision*, 7(3), 145-155.
- [16] Aktas, A., & Singh, M. (2022). "Energy Savings in Variable Speed Drive Systems for Industrial Applications." *Journal of Cleaner Production*, 335, 130273.
- [17] Madi, T., Al-Hasan, M., & Rashid, M. (2021). "Efficiency Improvement of Induction Motors Using Advanced VSD Techniques." *Electric Power Components and Systems*, 49(7-8), 732-743.
- [18] Sadiq, S., Munir, A., & Rehman, M. (2023). "A Comparative Study on Energy Efficiency of Induction Motors Controlled by VSDs." *International Journal of Energy Research*, 47(2), 1256-1269.
- [19] Mohammad Amir, & Irman Firdaus. (2017). "Performance Analysis of Three-Phase Induction Motors Using Different Speed Control Methods." *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Informatics*, 5(2), 178-185.