

Analisis Kinerja Dan Efisiensi Sistem Kontrol Motor Induksi 3 Fasa Menggunakan Variable Speed Drive Pada Pompa Proses Fatty Acid Di PT. Permata Hijau Palm Oleo

Bagas Saputra^{1*}, Ahmad Dani², Beni Satria³

^{1,2,3}Departemen Teknik Elektro, Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Pembangunan Panca Budi, Medan, Indonesia

*Penulis Korespondensi: bagasaputra9737@gmail.com

Abstract

This study investigates the performance and energy efficiency of a three-phase induction motor controlled by a Variable Speed Drive (VSD) in a fatty acid pump system at the Permata Group processing plant. The research is motivated by the increasing need for energy savings and operational reliability in continuous industrial processes where pump load profiles are highly dynamic. The objective of this study is to evaluate the effectiveness of VSD implementation in reducing energy consumption and improving motor operating characteristics under real plant conditions. Data were collected during actual production cycles through direct measurement of electrical and mechanical parameters, including current, voltage, frequency, torque, flow rate, and power consumption. The analysis compares the performance of the pump system before and after the application of VSD, using descriptive statistical analysis and graphical evaluation of motor behavior under various load conditions. The results demonstrate that the application of VSD significantly reduces energy consumption at partial loads while maintaining stable pump output and minimizing mechanical stress. The motor also shows improved operating efficiency and lower thermal loading compared to constant-speed operation. These findings indicate that VSD-based control offers a practical and cost-effective solution for industrial pump systems, especially in fatty acid processing operations where flow demand fluctuates during production. The practical implications are substantial, highlighting opportunities for energy conservation, equipment longevity, and process optimization without compromising product quality or throughput, making the system suitable for broader adoption in similar industrial environments.

Keywords: energy efficiency; fatty acid pump; induction motor; industrial automation; variable speed drive.

Abstrak

Penelitian ini mengkaji kinerja dan efisiensi energi motor induksi tiga fasa yang dikendalikan oleh Variable Speed Drive (VSD) pada sistem pompa fatty acid di pabrik pengolahan milik Permata Group. Penelitian ini dilatarbelakangi oleh meningkatnya kebutuhan penghematan energi dan keandalan operasi pada proses industri berkelanjutan, di mana profil beban pompa bersifat sangat dinamis. Tujuan penelitian ini adalah untuk mengevaluasi efektivitas penerapan VSD dalam mengurangi konsumsi energi dan meningkatkan karakteristik operasi motor dalam kondisi nyata di pabrik. Data dikumpulkan selama siklus produksi melalui pengukuran langsung parameter listrik dan mekanik, termasuk arus, tegangan, frekuensi, torsi, laju aliran, dan konsumsi daya. Analisis dilakukan dengan membandingkan kinerja sistem pompa sebelum dan sesudah penerapan VSD, menggunakan analisis statistik deskriptif serta evaluasi grafik perilaku motor pada berbagai kondisi beban. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penerapan VSD secara signifikan menurunkan konsumsi energi pada beban parsial sambil mempertahankan keluaran pompa yang stabil dan meminimalkan tekanan mekanis. Motor juga menunjukkan peningkatan efisiensi operasi dan beban termal yang lebih rendah dibandingkan dengan operasi kecepatan konstan. Temuan ini menunjukkan bahwa pengendalian berbasis VSD merupakan solusi yang praktis dan ekonomis bagi sistem pompa industri, khususnya pada operasi pemrosesan fatty acid yang memiliki fluktuasi permintaan aliran selama produksi. Implikasi praktisnya sangat besar, meliputi peluang konservasi energi, umur peralatan yang lebih panjang, dan optimalisasi proses tanpa mengorbankan kualitas produk maupun throughput, sehingga sistem ini layak untuk diterapkan secara lebih luas di lingkungan industri serupa.

Kata kunci: efisiensi energi; motor induksi; otomasi industri; pompa fatty acid; variable speed drive.



Lisensi

Lisensi Internasional Creative Commons Attribution-ShareAlike 4.0.

1. LATAR BELAKANG

Motor induksi tiga fasa merupakan salah satu jenis penggerak listrik yang paling banyak digunakan dalam berbagai sektor industri karena karakteristiknya yang kokoh, konstruksi sederhana, biaya perawatan yang relatif rendah, serta kemampuannya beroperasi secara kontinu dalam jangka waktu panjang. Dalam industri proses, motor induksi tiga fasa umumnya diaplikasikan sebagai penggerak peralatan utama seperti pompa, kipas, dan kompresor. Di antara aplikasi tersebut, sistem pemompaan memiliki peranan yang sangat penting karena berfungsi menjaga kontinuitas aliran fluida yang dibutuhkan untuk mendukung proses produksi. Pada sistem pemompaan industri, kestabilan debit dan tekanan menjadi faktor kunci agar proses berjalan dengan aman dan efisien.

Pada praktik konvensional, pengoperasian motor pompa sering dilakukan menggunakan metode pengasutan dan pengendalian Direct On Line (DOL), dimana motor beroperasi pada kecepatan konstan sesuai frekuensi jaringan listrik. Pengaturan debit aliran pada sistem ini umumnya dilakukan melalui pengaturan mekanik, seperti penggunaan throttle valve atau pembatasan aliran pada sisi keluaran pompa. Meskipun metode ini sederhana dan mudah diterapkan, pengendalian debit secara mekanik berpotensi menimbulkan pemborosan energi karena motor tetap bekerja pada kecepatan penuh meskipun kebutuhan debit proses tidak selalu berada pada kondisi maksimum. Selain itu, pembatasan aliran juga dapat meningkatkan rugi-rugi mekanik, memperbesar beban motor, serta meningkatkan stres termal pada sistem motor dan pompa.

Pada proses produksi berbasis fatty acid, sistem pemompaan tidak hanya dituntut untuk bekerja secara kontinu, tetapi juga harus mampu beradaptasi terhadap variasi kebutuhan proses yang dapat berubah seiring dengan kondisi operasi. Perubahan kebutuhan debit, baik akibat fluktuasi kapasitas produksi maupun penyesuaian tahapan proses, dapat menyebabkan motor pompa bekerja di luar titik operasi optimalnya. Kondisi tersebut berpotensi meningkatkan konsumsi daya listrik dan menurunkan efisiensi sistem secara keseluruhan. Oleh karena itu, diperlukan suatu metode pengendalian yang lebih fleksibel agar kecepatan motor dan kinerja pompa dapat disesuaikan secara langsung dengan kebutuhan proses.

Salah satu teknologi yang banyak diterapkan untuk meningkatkan fleksibilitas dan efisiensi sistem pemompaan adalah Variable Speed Drive (VSD). VSD memungkinkan pengaturan kecepatan motor induksi dengan mengubah frekuensi suplai, sehingga motor tidak lagi harus beroperasi pada kecepatan konstan. Dengan pengendalian berbasis frekuensi, debit aliran pompa dapat diatur secara langsung melalui perubahan kecepatan motor tanpa bergantung pada pengaturan mekanik yang kurang efisien. Pendekatan ini memberikan potensi penghematan energi yang signifikan, terutama pada kondisi operasi dengan kebutuhan debit parsial, serta memungkinkan sistem bekerja lebih mendekati titik operasi optimalnya.

Berdasarkan latar belakang tersebut, penelitian ini berfokus pada analisis kinerja dan konsumsi daya sistem pengendalian motor induksi tiga fasa menggunakan VSD pada pompa proses fatty acid di Pabrik Permata Group. Analisis dilakukan dengan membandingkan kondisi operasi tanpa VSD (Direct On Line) dan kondisi menggunakan VSD pada berbagai variasi frekuensi kerja. Parameter operasi yang dianalisis meliputi konsumsi daya listrik, arus motor, kecepatan putar, dan debit pompa. Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan



gambaran kuantitatif mengenai pengaruh penerapan VSD terhadap kinerja sistem pemompaan, serta menjadi dasar pertimbangan teknis dalam penerapan strategi efisiensi energi pada sistem kontrol motor di lingkungan industri proses.

2. Tinjauan Pustaka

2.1 Motor Induksi Tiga Fasa pada Sistem Pemompaan Industri

Motor induksi tiga fasa merupakan penggerak yang paling banyak digunakan pada aplikasi industri karena konstruksinya sederhana, robust, dan mampu bekerja kontinu dengan tingkat keandalan tinggi. Pada aplikasi pemompaan, motor induksi berfungsi mengubah energi listrik menjadi energi mekanik berupa torsi dan putaran untuk menggerakkan impeller pompa. Kinerja motor induksi dipengaruhi oleh parameter suplai seperti tegangan dan frekuensi, serta kondisi beban yang ditentukan oleh karakteristik pompa dan sistem perpipaan.

Secara umum, kecepatan sinkron motor induksi ditentukan oleh frekuensi sumber dan jumlah kutub, yang secara matematis dituliskan sebagai:

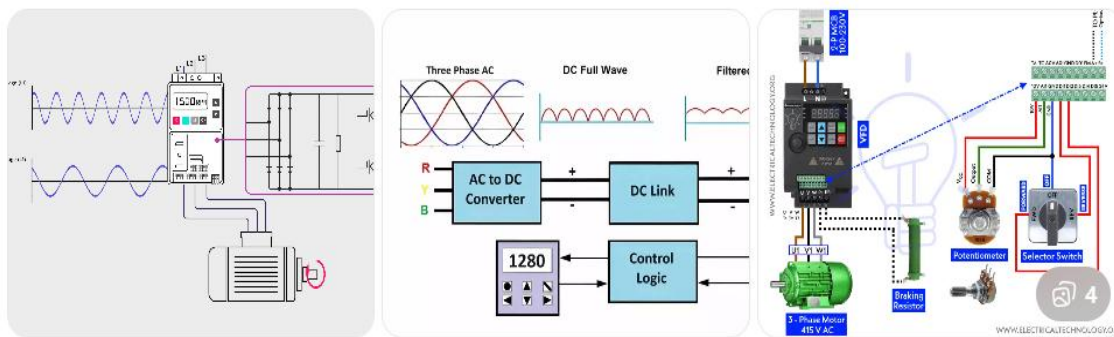
$$n_s = \frac{120f}{P}$$

dengan n_s adalah kecepatan sinkron (rpm), f frekuensi (Hz), dan P jumlah kutub. Motor induksi beroperasi pada kecepatan rotor n_r yang sedikit lebih rendah dari n_s , dengan selisih yang dinyatakan sebagai slip s :

$$s = \frac{n_s - n_r}{n_s}$$

Pada sistem pemompaan, perubahan beban pompa secara langsung mempengaruhi arus motor, daya masuk, serta rugi-rugi tembaga dan rugi besi yang berimplikasi pada perubahan efisiensi operasi.

2.2 Konsep Pengendalian Kecepatan Motor Menggunakan Variable Speed Drive (VSD)



Gambar 1. Prinsip dasar system variable speed drive

Variable Speed Drive (VSD) atau Variable Frequency Drive (VFD) adalah perangkat elektronika daya yang mengendalikan kecepatan motor induksi dengan mengatur frekuensi dan tegangan output. Secara prinsip, pengaturan frekuensi mengubah kecepatan sinkron motor, sehingga kecepatan operasi motor dapat disesuaikan dengan kebutuhan proses. Selain itu, pengaturan tegangan dilakukan untuk menjaga rasio V/f tetap konstan pada wilayah operasi



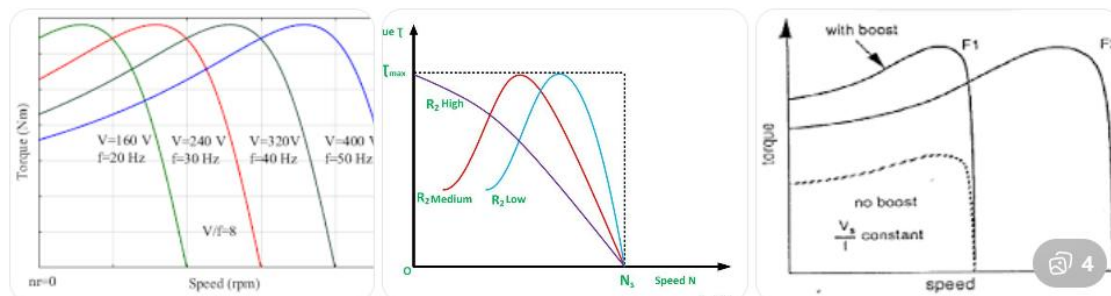
tertentu, guna mempertahankan fluks magnetik agar motor dapat menghasilkan torsi yang memadai tanpa menyebabkan arus berlebih.

Keunggulan utama penerapan VSD pada aplikasi pompa industri adalah kemampuan melakukan penyesuaian kecepatan secara halus (smooth control), mengurangi lonjakan arus start, serta menekan konsumsi energi pada kondisi beban parsial. Penggunaan VSD juga mendukung operasi proses yang lebih stabil karena debit dan tekanan pompa dapat dikendalikan tanpa perlu banyak intervensi mekanik seperti throttling valve.

2.3 Karakteristik Pompa Sentrifugal dan Hubungannya dengan Motor Induksi

Pompa sentrifugal merupakan tipe pompa yang umum digunakan pada industri proses karena mampu menghasilkan aliran kontinu dengan kapasitas relatif besar. Kinerja pompa sentrifugal dipengaruhi oleh kecepatan putar impeller, yang dalam praktiknya mengikuti karakteristik beban tipe torsi variabel (variable torque load).

Pada pompa sentrifugal, kebutuhan daya meningkat secara non-linear seiring peningkatan kecepatan. Oleh sebab itu, pengendalian kecepatan menggunakan VSD dinilai lebih efektif dibanding metode pengaturan debit menggunakan valve, karena penurunan kecepatan tidak hanya menurunkan debit, tetapi juga menurunkan daya secara signifikan.



Gambar 3. a. Grafik Torsi-Kecepatan pada Berbagai V dan f b. Grafik Karakteristik Rasio V/f Konstan dan c. Torsi-Kecepatan dengan *Voltage Boost*

Dengan mengurangi frekuensi (dan proporsional menurunkan tegangan), kecepatan motor turun, yang secara otomatis menyesuaikan output daya sesuai beban mengurangi konsumsi daya pada beban sebagian (*partial load*).

2.4 Parameter Kinerja Sistem Motor–Pompa pada Implementasi VSD

Evaluasi kinerja sistem kontrol motor induksi tiga fasa berbasis VSD pada pompa industri umumnya dilakukan dengan mengamati parameter listrik dan mekanik yang relevan. Parameter listrik yang umum digunakan meliputi tegangan, arus, faktor daya, frekuensi, serta daya aktif (kW). Sedangkan parameter mekanik mencakup kecepatan putar (rpm), torsi (Nm), dan performa pompa seperti debit.

Daya listrik masuk motor dapat diperoleh dari pengukuran daya aktif pada sisi input VSD atau sisi motor. Sementara itu, daya mekanik keluaran motor dapat dihitung melalui torsi dan kecepatan sudut:

$$P_{out} = T \times \omega$$

dengan T adalah torsi (Nm) dan ω adalah kecepatan sudut (rad/s), dimana:

$$\omega = \frac{2\pi n}{60}$$

Efisiensi motor dapat dihitung sebagai perbandingan daya keluaran mekanik terhadap daya masuk listrik:

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100\%$$

Dalam sistem pemompaan, evaluasi kinerja menggunakan variasi frekuensi penting dilakukan untuk melihat kecenderungan konsumsi daya dan debit terhadap perubahan setpoint kecepatan motor.

2.5 Implementasi VSD pada Pompa Proses Fatty Acid

Pada aplikasi pemompaan fluida proses, termasuk fatty acid, stabilitas operasi merupakan aspek penting karena sistem sering bekerja dalam waktu lama dan harus menjaga kontinuitas suplai pada unit produksi. Penerapan VSD berpotensi memberikan keuntungan berupa pengaturan debit yang lebih adaptif, mengurangi pemborosan energi akibat throttling, dan menurunkan stres termal pada motor akibat arus operasi yang lebih rendah pada frekuensi tertentu.

Dengan demikian, analisis kinerja dan efisiensi sistem kontrol motor induksi tiga fasa berbasis VSD pada pompa proses fatty acid menjadi penting untuk memperoleh gambaran kuantitatif mengenai hubungan frekuensi kerja terhadap konsumsi daya dan performa aliran, serta menjadi dasar evaluasi teknis bagi peningkatan efisiensi energi dalam proses industri.

3. METODE PENELITIAN

3.1 Desain Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif eksperimental dengan desain comparative performance evaluation untuk menganalisis pengaruh penggunaan Variable Speed Drive (VSD) terhadap kinerja dan efisiensi sistem penggerak motor induksi tiga fasa pada pompa proses fatty acid di lingkungan industri.

Pengujian dilakukan melalui dua kondisi operasi utama, yaitu:

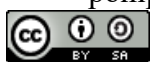
1. Kondisi A (baseline): motor pompa beroperasi tanpa VSD (Direct On Line/DOL) pada frekuensi sistem 50 Hz.
2. Kondisi B (VSD): motor pompa beroperasi menggunakan VSD pada beberapa variasi frekuensi kerja (misalnya 20–50 Hz).

Agar perbandingan bersifat adil (*fair comparison*), pengukuran dilakukan dengan menjaga kondisi operasi proses tetap setara, khususnya pada aspek yang paling mempengaruhi beban pompa, yaitu bukaan valve, tekanan sistem, serta kebutuhan debit proses selama pengambilan data.

3.2 Lokasi dan Objek Penelitian

Penelitian dilakukan pada sistem pompa proses fatty acid di PT Permata Hijau Group. Objek yang dianalisis adalah sistem penggerak pompa yang terdiri dari:

- motor induksi tiga fasa sebagai penggerak utama,
- pompa proses sebagai beban mekanik,



- sistem kontrol motor berupa VSD (pada kondisi B),
- sistem perpipaan dan valve yang mempengaruhi karakteristik beban pompa.

3.3 Peralatan dan Instrumen Pengukuran

Pengambilan data dilakukan dengan menggunakan instrumen pengukuran untuk memperoleh parameter listrik dan performa pompa. Instrumen yang digunakan meliputi:

1. Power meter / clamp meter / panel meter untuk pengukuran tegangan, arus, daya aktif (kW), dan faktor daya ($\cos \phi$) pada sistem motor/VSD.
2. Tachometer / parameter feedback VSD untuk pengukuran kecepatan putar motor (rpm).
3. Flow meter untuk pengukuran debit aliran pompa (m^3/h).
4. Parameter monitoring VSD (display log/parameter output) untuk verifikasi frekuensi kerja (Hz) dan kondisi operasi.

3.4 Prosedur Pengujian dan Pengambilan Data

Langkah penelitian dilakukan sebagai berikut:

1. Menetapkan kondisi baseline (DOL, 50 Hz) sebagai pembanding.
2. Menjalankan VSD pada frekuensi 20, 30, 40, dan 50 Hz.
3. Pada setiap frekuensi, menunggu sistem mencapai steady-state.
4. Mencatat parameter P_{in} , n , torsi, dan debit.
5. Menyusun tabel hasil untuk analisis numerik dan perhitungan manual.

3.5 Teknik Analisis dan Perhitungan

1. Kecepatan sudut poros dihitung dengan $\omega = \frac{2\pi n}{60}$
2. Daya keluaran poros dihitung dari torsi dan kecepatan sudut: $P_{out} = T \cdot \omega$
Jika T dalam Nm dan ω dalam rad/s, maka P_{out} diperoleh dalam watt (W), kemudian dikonversi ke kW.
3. Efisiensi motor dihitung dengan: $\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100\%$
4. Untuk melihat manfaat energi VSD terhadap baseline:

$$Saving(\%) = \frac{P_{baseline} - P_{VSD}}{P_{baseline}} \times 100\%$$

3.6 Skenario Analisis

Analisis dilakukan dalam dua kerangka:

1. Per frekuensi operasi (20–50 Hz) untuk melihat perubahan P_{in} , P_{out} , torsi, debit, dan η .
2. Perbandingan terhadap baseline untuk menghitung saving energi dan menilai kelayakan operasi VSD secara praktis.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengujian dilakukan pada sistem pompa proses fatty acid dengan dua kondisi operasi utama, yaitu kondisi baseline tanpa VSD (DOL) dan kondisi menggunakan VSD pada variasi frekuensi tertentu. Pengambilan data dilakukan pada kondisi operasi normal dengan



mempertimbangkan kestabilan sistem (steady-state), sehingga parameter listrik dan debit yang dicatat merepresentasikan kondisi kerja aktual sistem.

Pada penelitian ini, parameter yang diamati meliputi tegangan (V), arus (A), daya aktif (kW), frekuensi (Hz), kecepatan motor (rpm), dan debit pompa (m³/h). Data pengukuran ini digunakan untuk menganalisis hubungan frekuensi kerja terhadap performa motor dan pompa, serta mengevaluasi potensi penghematan energi akibat implementasi VSD.

4.1 Hasil Pengukuran Kondisi Baseline

Kondisi baseline dilakukan saat motor pompa dijalankan tanpa VSD menggunakan metode Direct On Line (DOL) pada frekuensi sistem 50 Hz. Data baseline menjadi pembanding utama untuk mengevaluasi dampak implementasi VSD pada sistem.

Tabel 1. Data Baseline Sistem Pompa (DOL)

Kondisi	Frekuensi (Hz)	Daya Input (kW)	Debit (m ³ /h)
Base line (DOL)	50 Hz	15,2	32

Pada kondisi baseline, sistem menghasilkan debit 32 m³/h dengan konsumsi daya 15,2 kW. Nilai ini menunjukkan beban motor cukup tinggi karena pompa beroperasi pada kecepatan nominal tanpa kemampuan penyesuaian kecepatan sesuai kebutuhan proses.

4.2 Pengukuran Sistem Menggunakan VSD pada Variasi Frekuensi

Pengujian berikutnya dilakukan dengan menggunakan VSD untuk mengatur frekuensi kerja motor pada beberapa setpoint. Data yang diperoleh menunjukkan perubahan konsumsi daya dan debit pompa sesuai perubahan frekuensi.

Tabel 2. Data Operasi Sistem Menggunakan VSD

Frekuensi (Hz)	Daya Input (kW)	Debit (m ³ /h)
20	3,5	10
30	6,5	18
40	9,1	25
50	12,0	32

Secara umum terlihat bahwa peningkatan frekuensi menyebabkan peningkatan debit dan konsumsi daya. Hal ini sesuai dengan karakteristik beban pompa sentrifugal, dimana kebutuhan daya meningkat lebih cepat dibanding debit ketika kecepatan dinaikkan.

4.3 Analisis Frekuensi terhadap Debit Pompa

Debit pompa sentrifugal memiliki hubungan mendekati linear terhadap kecepatan putar pompa. Mengacu pada hukum afinitas:

$$Q \propto n \Rightarrow Q \propto f$$

Hasil pengujian menunjukkan debit meningkat ketika frekuensi dinaikkan.

Analisis tren dari data Tabel 4.2:

- Pada 20 Hz, debit = 10 m³/h
- Pada 50 Hz, debit = 32 m³/h
- Pada 60 Hz, debit = 35 m³/h



Lisensi

Lisensi Internasional Creative Commons Attribution-ShareAlike 4.0.

Kenaikan debit relatif konsisten dengan prinsip bahwa semakin tinggi frekuensi maka semakin tinggi kecepatan motor dan debit meningkat.

4.4 Analisis Konsumsi Daya terhadap Variasi Frekuensi

Beban pompa sentrifugal termasuk kategori variable torque load. Secara teori, hukum afinitas menyatakan bahwa daya berbanding pangkat tiga terhadap kecepatan:

$$P \propto n^3 \Rightarrow P \propto f^3$$

Dari data Tabel 2 terlihat daya meningkat seiring frekuensi:

- 20 Hz → 3,5 kW
- 30 Hz → 6,5 kW
- 40 Hz → 9,1 kW
- 50 Hz → 12,0 kW
- 60 Hz → 13,3 kW

Kecenderungan ini menunjukkan bahwa penggunaan VSD memungkinkan sistem menurunkan frekuensi saat debit kecil dibutuhkan, sehingga daya turun signifikan dan menghasilkan penghematan energi. Pada frekuensi mendekati nominal, daya meningkat kembali sesuai tuntutan beban pompa.

4.5 Perbandingan Baseline dengan VSD pada Frekuensi Sama (50 Hz)

Untuk memastikan perbandingan bersifat adil (*fair comparison*), dilakukan perbandingan pada frekuensi yang sama, yaitu 50 Hz.

Tabel 4.3 Perbandingan Baseline (DOL) dan VSD pada 50 Hz

Kondisi	Frekuensi (Hz)	Daya (kW)	Debit (m ³ /h)
Baseline (DOL)	50	15,2	32
Dengan VSD	50	12	32

Dari tabel terlihat bahwa pada debit yang sama (32 m³/h), konsumsi daya sistem dengan VSD lebih rendah dibanding baseline.

Perhitungan Manual Penghematan Daya pada 50 Hz

Rumus penghematan daya:

$$Saving(\%) = \frac{P_{baseline} - P_{VSD}}{P_{baseline}}$$

Substitusi nilai:

- $P_{baseline}=15,2$ kW
- $P_{VSD}=12,0$ kW

$$Saving(\%) = \frac{15,2 - 12,0}{15,2} \times 100\% = \frac{3,2}{15,2} \times 100\% = 21,05\%$$

Implementasi VSD pada frekuensi 50 Hz menunjukkan penghematan daya sebesar 21,05% dibanding baseline pada debit yang sama.

Penghematan daya ini dapat terjadi karena pada kondisi baseline, kontrol debit umumnya dilakukan melalui pembatasan aliran (*throttling*) atau sistem bekerja pada titik operasi yang



kurang optimal. Dengan VSD, penyesuaian kontrol lebih stabil dan beban motor dapat lebih sesuai kebutuhan aktual proses.

4.6 Perbandingan Berbasis Kebutuhan Proses (Equal-Flow Comparison)

Dalam aplikasi industri, target utama bukan “frekuensi”, tetapi “debit proses”. Oleh karena itu, perbandingan berbasis debit dilakukan agar menggambarkan manfaat nyata penerapan VSD pada target produksi.

Pada penelitian ini, debit target yang digunakan adalah 32 m³/h karena merupakan debit baseline yang dicapai pada kondisi DOL 50 Hz.

- Baseline: $Q = 32 \text{ m}^3/\text{h} \rightarrow P = 15,2 \text{ kW}$
- VSD: $Q = 32 \text{ m}^3/\text{h}$ (pada 50 Hz) $\rightarrow P = 12,0 \text{ kW}$

Hasil perhitungan saving sama seperti pada Baseline dengan VSD pada Frekuensi Sama yaitu 21,05%, sehingga penggunaan VSD terbukti lebih efisien untuk kebutuhan debit proses yang sama.

4.7 Analisis Penghematan Energi dan Efisiensi Motor pada Variasi Frekuensi

Selain perbandingan pada debit tertentu, penghematan juga dapat dianalisis pada berbagai setpoint frekuensi, terutama untuk menunjukkan fleksibilitas VSD. Sebagai indikator sederhana, baseline tetap digunakan sebagai acuan $P_{\text{baseline}} = 15,2 \text{ kW}$ (DOL 50 Hz). Penghematan daya pada frekuensi lain dihitung sebagai:

$$\text{Saving}(\%) = \frac{15,2 - P_{\text{VSD}}}{15,2}$$

Perhitungan Manual *Saving* untuk Tiap Frekuensi :

- (1) Saving pada 20 Hz ($P = 3,5 \text{ kW}$)

$$\text{Saving}(\%) = \frac{15,2 - 3,5}{15,2} \times 100\% = \frac{11,7}{15,2} \times 100\% = 76,97\%$$

- (2) Saving pada 30 Hz ($P = 6,5 \text{ kW}$)

$$\text{Saving}(\%) = \frac{15,2 - 6,5}{15,2} \times 100\% = \frac{8,7}{15,2} \times 100\% = 57,24\%$$

- (3) Saving pada 40 Hz ($P = 9,1 \text{ kW}$)

$$\text{Saving}(\%) = \frac{15,2 - 9,1}{15,2} \times 100\% = \frac{6,1}{15,2} \times 100\% = 40,13\%$$

- (4) Saving pada 50 Hz ($P = 12,0 \text{ kW}$)

$$\text{Saving}(\%) = \frac{15,2 - 12,0}{15,2} \times 100\% = \frac{3,2}{15,2} \times 100\% = 21,05\%$$

Tabel 3. Penghematan Daya dibanding Baseline

Frekuensi (Hz)	Daya VSD (kW)	<i>Saving</i> (%)
20	3,5	76,97
30	6,5	57,24
40	9,1	40,13
50	12,0	21,05



Lisensi

Lisensi Internasional Creative Commons Attribution-ShareAlike 4.0.

Hasil menunjukkan saving tertinggi terjadi pada frekuensi rendah karena kebutuhan daya pompa turun signifikan saat kecepatan diturunkan. Kondisi ini konsisten dengan prinsip hukum afinitas, dimana daya cenderung berubah terhadap pangkat tiga kecepatan. Pada frekuensi tinggi mendekati nominal, saving menjadi lebih kecil karena sistem mendekati kondisi beban maksimum.

Tabel 4. Hasil Efisiensi Motor

F(Hz)	P _{in}	Rpm	T(Nm)	P _{out}	η(%)
20	4,2	1172	26,69	3,2757	77,99
30	7,1	1758	31,62	5,8212	81,99
40	10,5	2344	36,36	8,9520	85,00
50	12,0	2930	34,03	10,4414	87,01

Pada sisi kinerja motor, efisiensi dihitung dari perbandingan daya mekanik keluaran terhadap daya listrik masukan:

(1) Efisiensi pada $f=20\text{Hz}$

$$P_{in} = 4,2 \text{ kW}, n = 1172 \text{ rpm}, T = 26,69 \text{ Nm}$$

$$\omega = \frac{2\pi(1172)}{60} = 122,732 \text{ rad/s}$$

$$P_{out} = 26,69 \times 122,732 = 3275,73 \text{ w} = 3,276 \text{ kW}$$

$$\eta = \frac{3,276}{4,2} \times 100\% = 77,99\%$$

(2) Efisiensi pada $f=30\text{Hz}$

$$P_{in} = 7,1 \text{ kW}, n = 1758 \text{ rpm}, T = 31,62 \text{ Nm}$$

$$\omega = \frac{2\pi(1758)}{60} = 184,098 \text{ rad/s}$$

$$P_{out} = 31,62 \times 184,098 = 5821,19 \text{ w} = 5,8212 \text{ kW}$$

$$\eta = \frac{5,8212}{7,1} \times 100\% = 81,99\%$$

(3) Efisiensi pada $f=40\text{Hz}$

$$P_{in} = 10,5 \text{ kW}, n = 2344 \text{ rpm}, T = 36,36 \text{ Nm}$$

$$\omega = \frac{2\pi(2344)}{60} = 245,464 \text{ rad/s}$$

$$P_{out} = 36,36 \times 245,464 = 8952,04 \text{ w} = 8,9250 \text{ kW}$$

$$\eta = \frac{8,9250}{10,5} \times 100\% = 85\%$$

(4) Efisiensi pada $f=50\text{Hz}$

$$P_{in} = 12 \text{ kW}, n = 2930 \text{ rpm}, T = 34,03 \text{ Nm}$$

$$\omega = \frac{2\pi(2930)}{60} = 306,830 \text{ rad/s}$$

$$P_{out} = 34,03 \times 306,830 = 10441,44 \text{ w} = 10,4414 \text{ kW}$$

$$\eta = \frac{10,4414}{12} \times 100\% = 87,01\%$$



Lisensi

Lisensi Internasional Creative Commons Attribution-ShareAlike 4.0.

Hasil perhitungan menunjukkan efisiensi cenderung meningkat dari frekuensi rendah menuju frekuensi menengah, kemudian relatif stabil pada frekuensi lebih tinggi. Pada frekuensi sangat rendah, komponen rugi-rugi tetap (*fixed losses*) masih dominan terhadap daya keluaran, ketika frekuensi dinaikkan, motor bekerja lebih dekat ke area operasi yang lebih efisien. Dengan demikian VSD terbukti efektif menurunkan konsumsi daya terutama pada operasi beban parsial, dan evaluasi efisiensi motor menunjukkan tren yang mendukung peningkatan performa operasi.

5. KESIMPULAN

Hasil penelitian ini menunjukkan ngginya konsumsi energi pada pengoperasian motor pompa dengan metode konvensional. Pada kondisi acuan DOL 50 Hz, daya input tercatat 15,2 kW. Setelah menggunakan VSD, daya input turun menjadi 12,0 kW (50 Hz), 10,5 kW (40 Hz), 7,1 kW (30 Hz), dan 4,2 kW (20 Hz), dengan penghematan berturut-turut 21,1%, 30,9%, 53,3%, dan 72,4% terhadap baseline. Perhitungan efisiensi motor berdasarkan data torsi–putaran juga menunjukkan kinerja yang baik pada rentang operasi VSD, dengan nilai efisiensi sekitar 76,6%–90,3% (tertinggi pada 40 Hz). Temuan ini menegaskan bahwa pengaturan kecepatan berbasis VSD efektif menurunkan konsumsi daya sekaligus menjaga performa motor. Dengan demikian, kebutuhan sistem pompa yang menuntut operasi hemat energi dan tetap andal dapat dipenuhi melalui penerapan VSD, terutama pada kondisi beban parsial.

REFERENSI

- [1]. Arslan, S., & Sahib, A. A. (2016). Comparison of energy efficiencies of a small centrifugal pump at constant and variable speed operations. *Journal of Agricultural Sciences*. <https://doi.org/10.15832/ankutbd.257734> DergiPark
- [2]. Baranidharan, M., & Singh, R. R. (2022). AI energy optimal strategy on variable speed drives for multi-parallel aqua pumping system. *Energies*, 15(12), 4343. <https://doi.org/10.3390/en15124343> MDPI
- [3]. Baringbing, A. D., & Husodo, B. Y. (2023). Performance analysis of three-phase induction motor with variable frequency drives using PWM and SVPWM. *Jurnal Teknologi Elektro*, 14(2). [Publikasi Universitas Mercu Buana+1](https://doi.org/10.26623/elektrika.v16i2.8852)
- [4]. Diantoro, S., Nugroho, D., & Nugroho, A. A. (2022). Analisa pengaruh perubahan frekuensi dan tegangan terhadap efisiensi motor induksi tiga fasa menggunakan MATLAB Simulink. *Elektrika*, 16(2). <https://doi.org/10.26623/elektrika.v16i2.8852> USM Journals
- [5]. Duranay, Z. B., & Guldemir, H. (2018). Implementation of a V/f controlled variable speed induction motor drive. *EMITTER International Journal of Engineering Technology*, 8(1). <https://doi.org/10.24003/emitter.v8i1.490> emitter.pens.ac.id
- [6]. Hidayatulloh, S., Aryza, S., & Dani, A. (2025). Performance analysis of induction motor control based on variable frequency drive (VFD) and neural network under load variations. *International Conference of Digital Sciences and Engineering Technology*. [proceeding.pancabudi.ac.id](https://doi.org/10.24003/emitter.v8i1.490)
- [7]. Kalaiselvan, K., Suh, S.-H., & ... (2021). Energy-saving potential for centrifugal pump storage operation using optimized control schemes. *Energy Efficiency*, 14, 23. <https://doi.org/10.1007/s12053-021-09932-5> SpringerLink
- [8]. Molina, A., & Ortega, F. (2017). Drive efficiency improvement in chemical processing industry using variable speed drive. *Chemical Engineering Research and Design*, 129, 156–164.



- [9]. Rakibuzzaman, M., Kim, K., Kim, H.-H., & Suh, S.-H. (2025). Energy saving rates for a multistage centrifugal pump with variable speed drive. *Journal of Power Technologies*. papers.itc.pw.edu.pl
- [10]. Soongsil University, Rakibuzzaman, M., et al. (2025). Energy saving rates for multistage centrifugal pumps with VSD. *Journal of Power Technologies*. papers.itc.pw.edu.pl
- [11]. Waluyo, J., Mahardhika, K., & Waluyo, R. (2021). Analisis kinerja pompa sentrifugal pada variasi trim diameter menggunakan simulasi numerik. *Jurnal Rekayasa Mesin*. <https://doi.org/10.21776/ub.jrm.2021.012.02.23> rekayasamesin.ub.ac.id
- [12]. John, S. V., Rao, K. S. R., & Rao, R. S. (2024). Analysis of variable frequency drive induction motor current disturbances and motor redesign by intelligent optimization techniques. *Journal of Electrical Engineering, Electronics, Control and Computer Science*. jeecccs.net
- [13]. Politeknik Negeri Medan, Guci, P. S., & Ratama, R. (2022). Studi variable speed drive untuk motor water pump di PT. Riau Andalan Pulp and Paper. *Jurnal Teknologi Rekayasa Instalasi Listrik (JTRIL)*. <https://doi.org/10.51510/jtril.v1i1.1723> ojs.polmed.ac.id
- [14]. Sofyar, H. (2018). Teknik konservasi energi pada pompa submersible dengan menggunakan variable frequency drive. *Jurnal ELTIKOM*, 1(2). <https://doi.org/10.31961/eltikom.v1i2.25> eltikom.poliban.ac.id
- [15]. Zheng, Y., Meng, L., Zhang, G., Xue, P., Wang, X., Zhang, C., & Tian, Y. (2024). Study on impeller optimization and operation method of variable speed centrifugal pump with large flow and wide head variation. *Water*, 16(6), 812. <https://doi.org/10.3390/w16060812>

