



Terbit *online* pada laman web jurnal :
<https://ejournal.sttp-yds.ac.id/index.php/js/index>

SAINSTEK

| ISSN (Print) 2337-6910 | ISSN (Online) 2460-1039 |



Efisiensi Energi dan Kelayakan Ekonomi Penerapan *Variable Speed Drive* Pada Sistem Pompa Distribusi *Process Water*

Yolnasdi^a, Triana Ramdha^b, Ermawati^c, Kevin^d, Chrismondari^e

^{a,b,c,d,e}Program Studi S1 Teknik Elektro, Sekolah Tinggi Teknologi Pekanbaru, Jl. Dirgantara NO.4, Pekanbaru, Indonesia

INFORMASI ARTIKEL

Sejarah Artikel:
 Diterima Redaksi: 07 Juni 2026
 Revisi Akhir: 25 Juni 2026
 Diterbitkan Online: 29 Juni 2026

KATA KUNCI

Variable Speed Drive
 Motor induksi
 Pompa sentrifugal
 Efisiensi energi
 Simple Payback Period

KORESPONDENSI

Telepon: -
 E-mail: yolnasdi9@gmail.com

ABSTRACT

Sistem distribusi *process water* pada industri umumnya menggunakan motor induksi berdaya besar yang beroperasi secara kontinu sehingga berkontribusi signifikan terhadap konsumsi energi listrik. Pengendalian debit menggunakan metode throttling valve pada sistem Direct On Line (DOL) sering menimbulkan inefisiensi energi akibat motor tetap beroperasi pada kecepatan nominal meskipun kebutuhan debit berkurang. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis efisiensi energi dan kelayakan ekonomi penerapan Variable Speed Drive (VSD) pada motor pompa sentrifugal berkapasitas 500 kW di PT Riau Andalan Pulp and Paper. Metode penelitian menggunakan pendekatan deskriptif kuantitatif dan komparatif berdasarkan data operasional aktual yang diperoleh dari Human Machine Interface (HMI) dan Electronic Tripping Unit (ETU) selama 14 hari pengamatan. Analisis ekonomi dilakukan menggunakan metode Simple Payback Period (SPP). Hasil penelitian menunjukkan bahwa penggunaan VSD mampu menurunkan konsumsi daya secara signifikan dibandingkan metode DOL dengan throttling valve. Pada kondisi operasi setara 50%, konsumsi daya sistem DOL tercatat sebesar 318 kW, sedangkan sistem VSD hanya sebesar 32 kW. Implementasi VSD menghasilkan penghematan energi rata-rata sebesar 4.042,19 kWh per hari atau setara 1.475.399,35 kWh per tahun. Penghematan energi tersebut memberikan reduksi biaya operasional sebesar Rp1.645.070.275,25 per tahun. Dengan nilai investasi sebesar Rp5.000.000.000, sistem memiliki periode pengembalian modal selama 3,039 tahun. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penerapan Variable Speed Drive layak diterapkan sebagai solusi konservasi energi dan peningkatan efisiensi operasional pada sistem pompa distribusi *process water* industri.

1. PENDAHULUAN

Energi listrik merupakan salah satu komponen biaya operasional terbesar dalam sektor industri. Sebagian besar konsumsi energi listrik di industri digunakan untuk mengoperasikan motor listrik, terutama motor induksi tiga fasa yang berfungsi sebagai penggerak pompa, kipas, kompresor, dan peralatan produksi lainnya. Pada sistem distribusi *process water*, pompa sentrifugal berkapasitas besar beroperasi secara kontinu untuk memenuhi kebutuhan proses produksi sehingga konsumsi energi yang dihasilkan sangat signifikan [3].

Pada banyak industri, pengaturan debit fluida masih dilakukan menggunakan metode throttling valve dengan sistem pengasutan Direct On Line (DOL). Metode ini mengatur aliran fluida melalui pembatasan bukaan katup tanpa mengubah kecepatan putar motor. Akibatnya motor tetap bekerja mendekati kondisi nominal meskipun

kebutuhan debit menurun, sehingga menimbulkan pemborosan energi listrik [6].

Perkembangan teknologi Variable Speed Drive (VSD) memberikan alternatif pengendalian yang lebih efisien. VSD memungkinkan pengaturan kecepatan putar motor melalui perubahan frekuensi dan tegangan suplai sehingga konsumsi energi dapat disesuaikan dengan kebutuhan proses aktual. Berdasarkan hukum afinitas pompa sentrifugal, daya yang dibutuhkan pompa berbanding lurus dengan pangkat tiga kecepatan putar, sehingga penurunan kecepatan motor dapat menghasilkan penghematan energi yang signifikan [2].

PT Riau Andalan Pulp and Paper menggunakan motor induksi tiga fasa berkapasitas 500 kW untuk sistem distribusi *process water*. Besarnya kapasitas motor tersebut menjadikan optimasi konsumsi energi sebagai salah satu aspek penting dalam upaya meningkatkan efisiensi operasional perusahaan [1]. Oleh karena itu,

penelitian ini dilakukan untuk menganalisis perbandingan konsumsi daya antara metode DOL dan VSD serta mengevaluasi kelayakan ekonominya berdasarkan penghematan energi yang diperoleh.

2. TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Motor Induksi Tiga Fasa

Motor induksi dikenal sebagai "kuda beban" industri karena konstruksinya yang kokoh. Prinsip kerjanya didasarkan pada induksi elektromagnetik di mana medan magnet putar dihasilkan oleh stator.

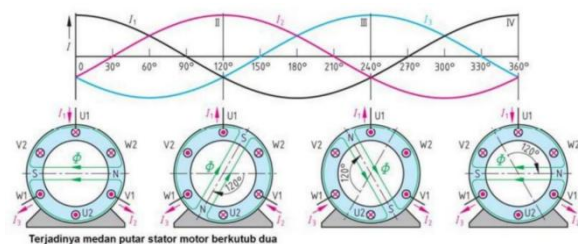


Gambar 1. Motor Induksi 3 Fasa (Sumber: Laili et al., 2023).

2.2. Prinsip Kerja Motor Induksi

Ketika belitan stator dihubungkan ke sumber daya AC tiga fasa, tiga arus sinusoidal yang terpisah fasa sebesar 120 derajat mengalir melalui masing-masing belitan fasa. Belitan-belitan ini sendiri ditempatkan secara fisik di dalam stator dengan jarak 120 derajat spasial satu sama lain. Kombinasi dari pergeseran fasa temporal (dalam arus) dan pergeseran fasa spasial (dalam penempatan belitan) ini menghasilkan medan magnet resultan yang memiliki magnitudo yang relatif konstan tetapi arahnya berputar secara kontinu mengelilingi celah udara dengan kecepatan yang seragam [7].

Kecepatan putaran medan magnet ini disebut kecepatan sinkron (Ns). Kecepatan ini tidak bergantung pada beban motor, melainkan ditentukan secara eksklusif oleh frekuensi sumber listrik (f) dan jumlah kutub magnet (P) yang dibentuk oleh belitan stator.



Gambar 2. Gelombang Sinusoidal Medan Stator (Sumber: Laili et al., 2023).

2.3. Daya Listrik

Dalam sistem tenaga listrik, terdapat tiga jenis daya listrik yaitu daya aktif, daya reaktif, dan daya semu. Daya aktif (real power) atau daya rata-rata merupakan daya yang diserap oleh komponen resistif beban. Satuan dari daya aktif adalah watt, tetapi karena watt adalah satuan yang terlalu kecil untuk kuantitas sistem tenaga, maka daya aktif biasa diukur dalam kilowatt (kW) atau megawatt (MW)

[7]. Secara matematis, daya aktif dirumuskan sebagai berikut :

$$P = V_p \times I \times \cos \varphi \text{ (1 Fasa)} \tag{1}$$

$$P = \sqrt{3} \times V_L \times I \times \cos \varphi \text{ (3 Fasa)} \tag{2}$$

Di mana:

P = Daya aktif (Watt)

V_p = Tegangan fasa-netral (Volt)

V_L = Tegangan fasa-fasa (Volt)

I = Arus (Ampere)

Cos φ = Faktor daya

Daya reaktif (reactive power) adalah daya yang dibutuhkan untuk membangkitkan medan magnet di kumparan-kumparan beban induktif. Daya reaktif diserap oleh beban-beban induktif, namun justru dihasilkan oleh beban kapasitif seperti kapasitor bank. Satuan untuk daya reaktif dinyatakan dengan VAR, dengan satuan yang lebih praktis adalah kVAR atau MVAR. Secara matematis, daya reaktif dirumuskan sebagai berikut :

$$Q = V_p \times I \times \sin \varphi \text{ (1 Fasa)} \tag{3}$$

$$Q = \sqrt{3} \times V_L \times I \times \sin \varphi \text{ (3 Fasa)} \tag{4}$$

Di mana:

Q = Daya reaktif (VAR)

V_p = Tegangan fasa-netral (Volt)

V_L = Tegangan antar fasa (Volt)

I = Arus (Ampere)

Daya semu (*apparent power*) adalah daya total yang disuplai oleh sumber, merupakan penjumlahan vektor antara daya aktif dan daya reaktif. Secara matematis, daya semu dirumuskan sebagai berikut :

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} \tag{5}$$

Di mana:

S = Daya semu (VA)

P = Daya aktif (Watt)

Q = Daya reaktif (VAR)

Faktor daya (*power factor*) merupakan perbandingan antara daya aktif (watt) dengan daya semu (VA), atau nilai cosinus sudut antara daya aktif dan daya semu/daya total. Daya reaktif yang tinggi akan meningkatkan nilai cosinus sudut dan sebagai hasilnya faktor daya akan menjadi lebih rendah. Nilai faktor daya selalu lebih kecil atau sama dengan satu.

Faktor daya dapat dirumuskan dengan persamaan:

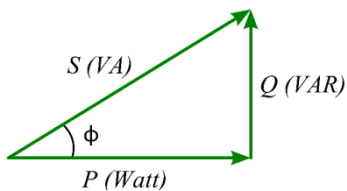
$$\cos \varphi = \frac{P}{S} \tag{6}$$

Di mana:

Cos φ = Faktor daya

P = Daya aktif (Watt)

S = Daya semu (VA)

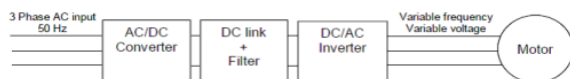


Gambar 3. Segitiga Daya (Sumber: Laili et al., 2023).

2.4. Prinsip Kerja Variable Speed Drive (VSD)

2.4.1. Prinsip Kerja Variable Speed Drive

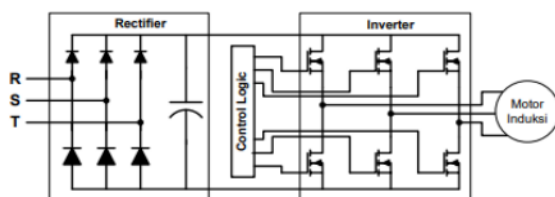
Pengaturan putaran motor induksi bisa dilakukan dengan berbagai metode salah satunya dengan menggunakan inverter. Awal rangkaian bekerja dengan menggunakan tegangan 6600 VAC, dengan frekuensi maksimal 50 Hz. Tegangan input 6600 VAC akan diubah menjadi tegangan DC dengan menggunakan dioda. Dioda akan dipasang menjadi bentuk bridge, tegangan yang telah disearahkan akan disuplai ke kapasitor (untuk menyimpan muatan listrik) fungsi utama dari kapasitor ini adalah untuk memperbaiki bentuk gelombang ripple. Setelah tegangan DC konstan maka akan digunakan teknik *Pulse Width Modulation* (PWM) [2].



Gambar 4. Prinsip Kerja VSD

Sumber: Ihsan Faturrohman & Mohammad Fatkhurrohman, 2023.

Dengan teknik PWM ini bisa didapatkan amplitudo dan frekuensi keluaran yang diinginkan. Selain itu teknik *Pulse Width Modulation* (PWM) juga menghasilkan harmonisa yang jauh lebih kecil daripada teknik yang lain serta menghasilkan gelombang sinusoidal, dimana kita tahu bahwa harmonisa ini akan menimbulkan rugi-rugi pada motor yaitu cepat panas. Maka dari itu teknik *Pulse Width Modulation* (PWM) inilah yang biasanya dipakai dalam mengubah tegangan *Direct Current* (DC) menjadi *Alternating Current* (AC) [7].



Gambar 5. Teknik PWM

Sumber Pranata et al., 2018.

2.4.2. Efisiensi Daya Listrik

Efisiensi daya listrik adalah ukuran seberapa baik sebuah alat atau sistem mengubah daya listrik yang diserapnya (input) menjadi daya kerja yang berguna (output). Tidak ada mesin atau sistem kelistrikan di dunia nyata yang 100% sempurna. Selalu ada sebagian daya yang "hilang" selama proses konversi berlangsung. Semakin tinggi persentase efisiensi suatu alat, semakin sedikit energi yang terbuang sia-sia, yang pada akhirnya akan menekan biaya operasional [8].

Rumus Perhitungan :

$$\eta = \left(\frac{P_{out}}{P_{in}}\right) \times 100\% \tag{7}$$

$$\eta = \text{Efisiensi}$$

P_{out} = Daya keluaran atau daya berguna (Watt atau kW)

P_{in} = Daya masukan atau total daya listrik yang diserap (Watt atau kW)

Karena daya masukan selalu terbagi menjadi daya yang berguna dan daya yang hilang, maka hubungan ketiganya dapat ditulis sebagai:

$$P_{in} = P_{out} + P_{loss} \tag{8}$$

Di mana P_{loss} adalah total rugi-rugi daya yang terjadi di dalam sistem. Semakin kecil nilai P_{loss} , maka nilai P_{out} akan semakin mendekati P_{in} , sehingga efisiensi η akan semakin mendekati angka 100%.

2.5. Ekonomi Teknik

Sebelum menghitung parameter kelayakan investasi, Anda harus terlebih dahulu mengkuantifikasi selisih daya yang diserap, lalu mengonversinya menjadi penghematan energi (kWh), dan terakhir menjadi penghematan finansial (Rupiah). Formulasi matematisnya adalah sebagai berikut:

$$\text{penghematan energi} = \frac{(P_{DOL} - P_{VSD})}{t} \tag{9}$$

Setelah mendapatkan nilai penghematan energi tahunan, langkah selanjutnya adalah mengonversinya menjadi nilai moneter dengan mengalikannya dengan tarif dasar listrik (TDL) industri yang berlaku:

$$\text{Cost saving} = \text{penghematan energi} \times \text{TDL} \times 365$$

Simple Payback Period adalah metode analisis investasi yang paling dasar. SPP mengukur berapa lama waktu (dalam satuan tahun atau bulan) yang dibutuhkan agar akumulasi penghematan operasional (*Cost Saving*) dapat mengembalikan total investasi awal (*CapEx*) [3].

$$SPP = \frac{\text{Total Investasi awal}}{\text{Cost saving tahunan}} \tag{10}$$

Parameter ini sangat krusial. Jika nilai SPP lebih pendek dari umur pakai (*lifetime*) perangkat VSD tersebut, maka investasi kelistrikan ini dinilai sangat layak secara teknis maupun ekonomis.

3. METODOLOGI

3.1. Lokasi Penelitian

Penelitian dilakukan pada sistem distribusi process water di PT Riau Andalan Pulp and Paper. Objek penelitian berupa motor induksi tiga fasa berdaya 500 kW yang digunakan sebagai penggerak pompa sentrifugal distribusi air proses. Metode penelitian menggunakan pendekatan deskriptif kuantitatif dan komparatif. Data operasional diperoleh secara langsung melalui Human Machine Interface (HMI) pada sistem Variable Speed Drive dan Electronic Tripping Unit (ETU) Siemens pada sistem Direct On Line selama 14 hari berturut-turut. Analisis dilakukan melalui dua skenario pengoperasian, yaitu:

a. Skenario A (DOL + Throttlng Valve)

Motor dioperasikan menggunakan metode Direct On Line dengan kecepatan tetap 100%, sedangkan pengaturan debit dilakukan melalui bukaan katup.

b. Skenario B (Variable Speed Drive)

Katup dibuka penuh dan debit air diatur melalui perubahan frekuensi serta kecepatan putar motor menggunakan Variable Speed Drive.

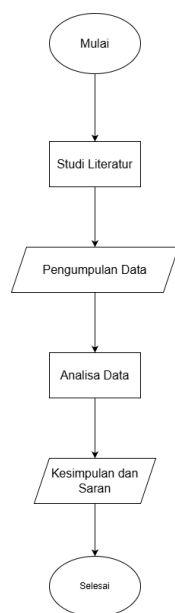
Parameter yang dianalisis meliputi:

1. Tegangan operasi (Volt)
2. Arus beban (Ampere)
3. Faktor daya (Cos φ)
4. Daya aktif (kW)
5. Konsumsi energi (kWh)
6. Penghematan biaya listrik
7. Simple Payback Period (SPP)

Penghematan energi tahunan dihitung berdasarkan selisih konsumsi energi antara sistem DOL dan VSD. Selanjutnya penghematan biaya dihitung menggunakan tarif listrik industri yang berlaku. Kelayakan investasi dievaluasi menggunakan metode Simple Payback Period.

3.2. Flow Chart Penelitian

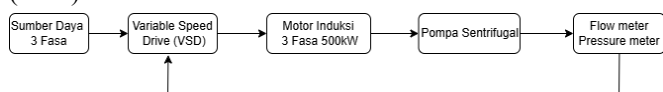
Terdapat diagram alur yang akan menjelaskan proses secara keseluruhan dari penelitian ini secara sederhana. Digunakan sebagai peta untuk mempermudah dan menyederhanakan langkah-langkah yang akan dilakukan. Berikut adalah Flow chart:



Gambar 6. Flow Chart Penelitian

3.3. Sistem Distribusi

Untuk memberikan gambaran alur kerja sistem yang diteliti, disusunlah sebuah blok diagram sistem distribusi process water menggunakan kendali Variable Speed Drive (VSD).



Gambar 7. Sistem Pengendalian VSD

3.4. Spesifikasi Pompa Sentrifugal

Pada penelitian ini, objek kendali mekanis yang dievaluasi adalah unit pompa sentrifugal pabrikan Andritz

yang terintegrasi pada sistem distribusi process water. Spesifikasi teknis dari pompa ini merupakan parameter fundamental dalam mendefinisikan kurva performansi sistem serta titik operasi desainnya. Berdasarkan Tabel 1, pompa sentrifugal tipe ACP-500 5S-DD ini didesain untuk mendistribusikan fluida cair dengan kapasitas debit nominal maksimal (Q) mencapai 1800 guna mengatasi total head (H) setinggi 65 meter. Untuk mencapai flow rate tersebut, pompa membutuhkan injeksi daya mekanis pada poros sebesar 500 kW yang dikonversikan ke impeler berdiameter 493,7 mm. Kapasitas ini mengindikasikan bahwa pompa beroperasi pada skala utilitas berat, di mana regulasi debit yang tidak efisien—seperti penggunaan throttling valve—akan memicu kerugian daya aktif yang masif.

Tabel 1. Spesifikasi Pompa

Spesifikasi pompa	
Merk	Andritz China
item	276P038
Type	ACP-500 5S-DD
no	133427802
years	2021
Q	1800 m ³ /h
P	500 kW
Imp	493.7 mm
H	65 m
n	1492 rpm

3.5. Spesifikasi Motor Induksi 3 Fasa

Berdasarkan Tabel 2, motor penggerak ini memiliki kapasitas daya output mekanis sebesar 500 kW. Motor beroperasi pada frekuensi jala-jala nominal 50 Hz dengan kecepatan putar rotor 1491 RPM, yang mengindikasikan konstruksi motor 4 kutub dengan desain slip yang sangat rendah guna memaksimalkan torsi. Pada konfigurasi tegangan 690V (Star), motor ini menarik arus nominal yang sangat masif, yaitu sebesar 512 A.

Tabel 2. Spesifikasi Motor Induksi 3 Fasa

Spesifikasi	
Manufaktur	WEG
Daya	500 kW
Frekuensi	50 Hz
Tegangan	400VD/690 VY
Arus	883/512 A
RPM	1491
Kelas Insulasi	F
Berat	3794 kg
Duty	S1
Cos φ	0,85

Spesifikasi	
	96,2 (100%)
Eff	96,0 (75%)
	95,4 (50%)

Parameter efisiensi (η) pabrikan menunjukkan angka yang sangat baik, yakni 96,2% pada pembebanan penuh (100%) dan 96,0% pada pembebanan 75%. Selain itu, motor memiliki faktor daya ($\cos \phi$) sebesar 0,85. Spesifikasi ini menegaskan bahwa untuk mempertahankan efisiensi konversi daya listrik menjadi mekanik yang tinggi, motor harus dioperasikan mendekati beban nominalnya. Pengoperasian secara *Direct On Line* (DOL) dengan beban hidrolis yang dicekik menggunakan *throttling valve* akan mengakibatkan titik operasi motor menjauhi efisiensi optimalnya. Oleh karena itu, penerapan VSD menjadi krusial untuk memodulasi frekuensi dan tegangan *input* secara proporsional, sehingga daya aktif yang ditarik dari sistem kelistrikan (yang dapat dihitung menggunakan persamaan $P = V_p \times I \times \cos \phi$) dapat diturunkan secara eksponensial mengikuti kebutuhan aktual debit cairan.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1. Perbandingan Konsumsi Daya Sistem DOL dan VSD

Setelah memahami spesifikasi teknis peralatan, langkah selanjutnya adalah menganalisis kinerja sistem berdasarkan kondisi operasional riil di lapangan. Analisis ini bertujuan untuk membuktikan secara seberapa besar perbedaan konsumsi daya listrik antara metode konvensional (*Direct On Line* dengan *throttling valve*) dibandingkan dengan metode pengaturan kecepatan (*Variable Speed Drive*). Guna memastikan objektivitas dan tidak mengganggu proses produksi, pengujian ini dilakukan melalui dua skenario operasi yang saling melengkapi.

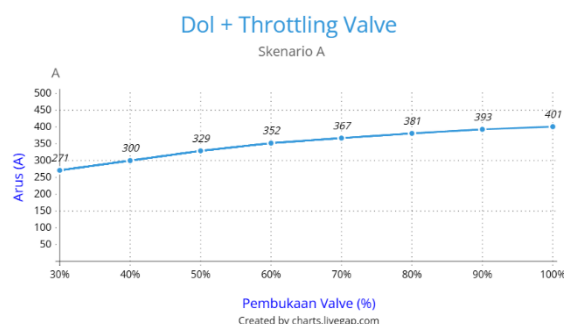
4.1.1. Pengukuran Skenario A

Pengujian pertama dilakukan pada sistem *Direct On Line* (DOL) yang saat ini beroperasi di lapangan. Pada sistem eksisting ini, motor induksi 3 fasa menerima suplai tegangan langsung dari jala-jala listrik, sehingga rotor terus berputar pada kecepatan konstan (sekitar 1500 RPM pada frekuensi 50 Hz). Mengingat kebutuhan air (*process water*) di pabrik selalu naik-turun, laju aliran fluida terpaksa diatur secara mekanis dengan cara memanipulasi bukaan katup (*throttling valve*) pada pipa keluaran pompa.

Tabel 3. Skenario A DOL + Throttling Valve

Skenario A DOL+throttling valve				
Valve %	Tegangan	Arus	Daya	flow
100	684	401	387	1378
90	683	393	379	1315
80	685	381	368	1187
70	682	367	355	942

Skenario A DOL+throttling valve				
60	684	352	340	671
50	677	329	318	419
40	678	300	290	214
30	679	271	262	49



Gambar 8. Grafik DOL + Throttling Valve

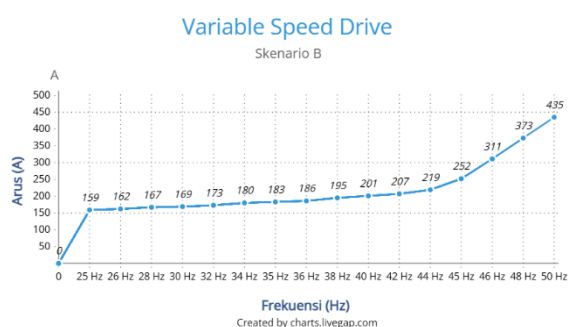
Merujuk pada data di Tabel 3 dan kurva Gambar 8, terlihat jelas bahwa mengecilkan bukaan katup tidak membuat konsumsi listrik motor ikut turun secara signifikan. Metode ini terbukti sangat boros energi. Hal ini terjadi karena motor tetap menyedot daya yang besar akibat terus dipaksa memompa fluida melawan saluran pipa yang sengaja disempitkan. Bukti nyatanya dapat dilihat ketika katup ditutup hingga posisi 50%. Pada kondisi tersebut, debit air anjlok tajam menyisakan 419 m³/jam (hanya sekitar 30% dari kapasitas maksimal). Anehnya, konsumsi listrik motor tidak ikut turun sepadan. Motor terbukti masih menyedot daya sebesar 318 kW dengan arus 329 A. Artinya, motor tetap menguras 82,1% daya maksimumnya (387 kW). Besaran energi yang tersedot ini sebagian besar terbuang percuma menjadi rugi-rugi dinamis (*dynamic loss*) karena dipaksa menembus hambatan katup. Kondisi ini memperlihatkan betapa tidak efisiennya sistem DOL dalam merespons naik-turunnya kebutuhan air di lapangan. Sebagai catatan, bahwa pengambilan data untuk simulasi penutupan katup sengaja dihentikan pada batas terendah 30% demi menjaga keselamatan mekanis (*mechanical safety*) peralatan.

4.1.2. Pengukuran Skenario B

Pengujian dengan *Variable Speed Drive* (VSD) ini berbeda dengan skenario A yang mengatur bukaan dari katup mekanis, pada VSD ini dilakukan dengan meregulasi frekuensi keluaran (Hz) yang secara langsung mengubah kecepatan sinkron medan magnet stator, sehingga putaran mekanis poros pompa dapat disesuaikan dengan presisi mengikuti fluktuasi kebutuhan *process water* di lapangan. Pada skenario ini, katup perpipaan dibuka penuh (100%), dan debit air murni diregulasi melalui penurunan frekuensi pada *Human Machine Interface* (HMI) panel VSD ABB. Data parameter kelistrikan, meliputi tegangan, arus, dan kalkulasi daya aktif pada berbagai variasi frekuensi sebagai representasi persentase kapasitas kecepatan motor, direkapitulasi pada Tabel 4

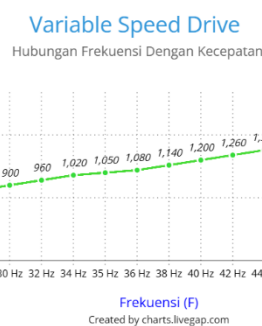
Tabel 4. Skenario B Variable Speed Drive

Skenario B Variable speed drive					
Frekuensi	Tegangan	Arus	Daya	Speed	flow
50	690	435	380	1500	1380
48	662	373	235	1440	1325
46	634	311	205	1380	1269
45	621	252	192	1350	1242
44	607	219	180	1320	1214
42	579	207	156	1260	1159
40	552	201	136	1200	1104
38	524	195	124	1140	1049
36	496	186	99	1080	994
35	483	183	97	1050	966
34	469	180	89	1020	938
32	441	173	69	960	883
30	414	169	57	900	828
28	386	167	51	840	773
26	358	162	37	780	718
25	345	159	32	750	690



Gambar 9. Skenario Variable Speed Drive

Terlihat bahwa Gambar 9 merepresentasikan profil penyerapan arus motor induksi terhadap variasi frekuensi keluaran VSD (dari 50 Hz turun hingga 25 Hz). Berdasarkan kurva tersebut, dapat dianalisis bahwa penurunan arus tidak terjadi secara linier proporsional, melainkan membentuk kurva yang menunjukkan dua karakteristik penting dalam pengoperasian pompa dan motor induksi. Pada frekuensi tinggi (45–50 Hz), arus motor turun dengan cepat. Hal ini menunjukkan bahwa sedikit penurunan kecepatan motor dapat mengurangi beban pompa secara signifikan sehingga arus yang dibutuhkan motor juga berkurang. Sebaliknya, pada frekuensi rendah (di bawah 35 Hz), penurunan arus mulai melambat dan cenderung bertahan di sekitar 159 A. Kondisi ini terjadi karena motor induksi tetap memerlukan arus magnetisasi untuk membangkitkan medan magnet meskipun beban pompa sudah sangat kecil. Hasil ini membuktikan bahwa VSD mampu menyesuaikan konsumsi arus sesuai kebutuhan beban aktual, sehingga lebih efisien dibandingkan sistem DOL yang tetap menarik arus tinggi meskipun beban berubah.

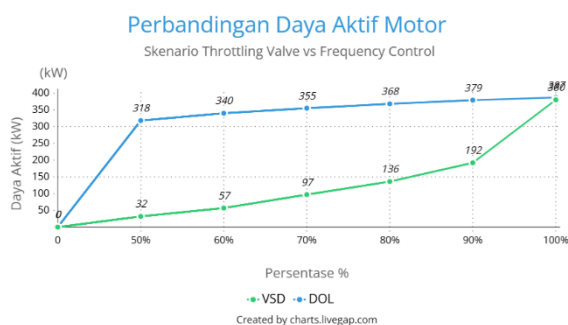


Gambar 10. Hubungan Frekuensi dengan Kecepatan

Berdasarkan Gambar 10, putaran motor berubah sebanding dengan perubahan frekuensi VSD. Semakin rendah frekuensi yang diberikan, semakin rendah pula putaran motor. Hasil ini menunjukkan bahwa VSD mampu mengendalikan kecepatan motor secara stabil dan akurat, sehingga mendukung tercapainya penghematan energi pada sistem pompa

4.2. Perbandingan Efisiensi Energi Sistem Throttling Valve dan Variable Speed Drive

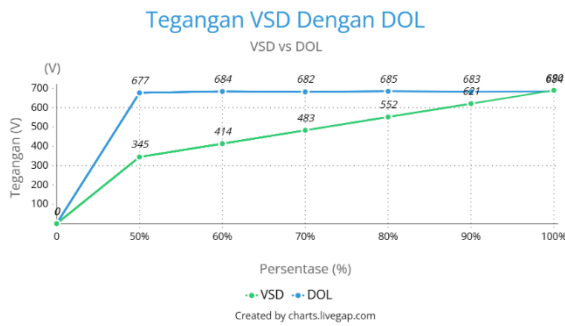
Untuk mengetahui efisiensi VSD, dilakukan perbandingan dengan sistem DOL menggunakan daya aktif (kW) sebagai parameter utama. Daya aktif menunjukkan konsumsi energi listrik yang sebenarnya dan menjadi dasar dalam perhitungan penghematan energi serta biaya listrik



Gambar 11. Daya Aktif

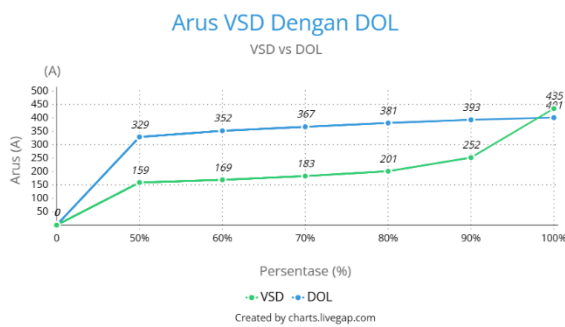
Berdasarkan Gambar 11, terlihat bahwa penggunaan VSD lebih hemat energi dibandingkan sistem DOL yang menggunakan katup. Hal ini ditunjukkan oleh perbedaan konsumsi daya yang cukup besar antara kedua sistem. Pada kondisi bukaan katup 50%, sistem DOL mengonsumsi daya sebesar 318 kW. Sementara itu, pada sistem VSD dengan setpoint 50% juga (25 Hz), daya yang digunakan hanya 32 kW. Dengan demikian, penggunaan VSD mampu

menghemat daya hingga 286 kW dibandingkan sistem DOL.



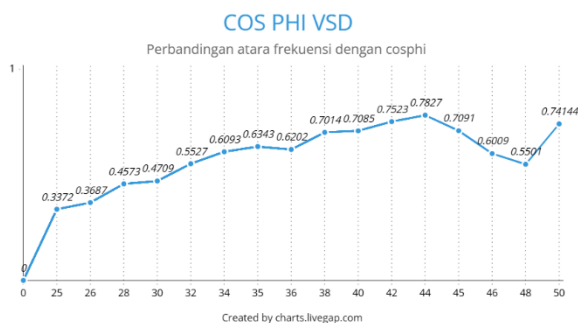
Gambar 12. Perbandingan Tegangan DOL & VSD

Gambar 12 menunjukkan perbedaan tegangan kerja antara sistem DOL dan VSD. Pada sistem DOL, tegangan relatif tetap di kisaran 677–684 V meskipun kebutuhan debit air berubah. Sebaliknya, pada sistem VSD, tegangan dapat disesuaikan dengan kebutuhan operasi motor. Pada setpoint 50%, tegangan turun menjadi 345 V. Kemampuan VSD menyesuaikan tegangan dan kecepatan motor inilah yang membuat konsumsi daya menjadi lebih rendah dan menghasilkan penghematan energi yang signifikan dibandingkan sistem DOL



Gambar 13. Perbandingan Arus DOL dengan VSD

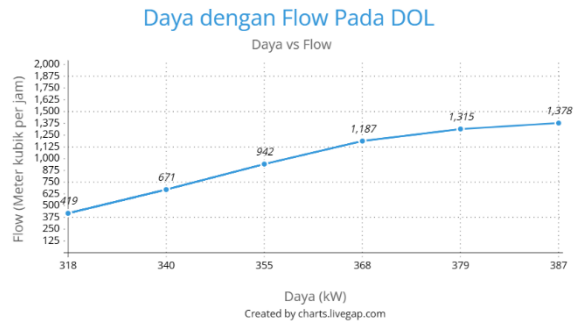
Berdasarkan Gambar 13, terlihat bahwa arus pada sistem DOL tetap tinggi meskipun kebutuhan aliran air menurun. Pada bukaan katup 50%, motor masih menarik arus sebesar 329 A karena tetap beroperasi pada kecepatan penuh. Sebaliknya, pada sistem VSD arus motor turun mengikuti penurunan kecepatan motor. Pada kondisi operasi 50% (25 Hz), arus hanya sebesar 159 A. Hal ini menunjukkan bahwa VSD mampu menyesuaikan kerja motor dengan kebutuhan beban sehingga penggunaan energi menjadi lebih efisien dibandingkan sistem DOL.



Gambar 14. Cos φ terhadap Frekuensi

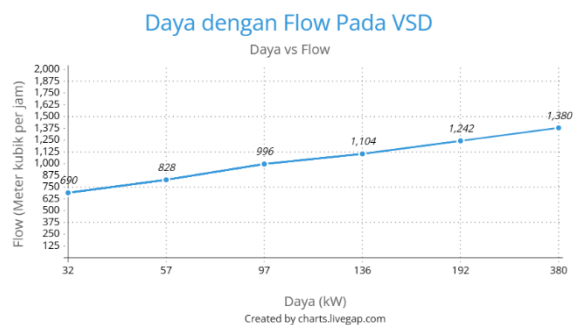
Berdasarkan Gambar 14, nilai faktor daya (cos φ) cenderung menurun saat frekuensi motor diturunkan. Pada

frekuensi rendah, beban pompa menjadi lebih ringan sehingga daya aktif yang digunakan motor berkurang, sedangkan kebutuhan arus untuk membentuk medan magnet tetap ada. Kondisi ini menyebabkan nilai cos φ menjadi lebih rendah. Meskipun demikian, penurunan cos φ pada motor tidak memengaruhi kualitas daya listrik jaringan pabrik karena VSD membantu menjaga faktor daya pada sisi sumber tetap baik



Gambar 15. Hubungan Daya Aktif dengan Debit Air pada Sistem DOL

Berdasarkan Gambar 15, sistem Direct On Line (DOL) dengan pengaturan katup menunjukkan penggunaan energi yang kurang efisien. Saat kebutuhan air turun dari 1.378 m³/jam menjadi 419 m³/jam, daya motor hanya turun dari 387 kW menjadi 318 kW. Hal ini menunjukkan bahwa meskipun aliran air sudah berkurang banyak, motor tetap menggunakan daya yang tinggi. Kondisi ini membuktikan bahwa pengaturan debit dengan katup tidak mampu mengurangi konsumsi listrik secara efektif.



Gambar 16. Hubungan Daya Aktif dengan Debit Air pada Sistem VSD

Sebaliknya, Gambar 16 menunjukkan bahwa sistem Variable Speed Drive (VSD) bekerja jauh lebih efisien. Saat debit air maksimum sebesar 1.380 m³/jam, motor menggunakan daya sekitar 380 kW. Namun, ketika debit air diturunkan menjadi 690 m³/jam, daya motor juga turun secara signifikan hingga hanya 32 kW. Hal ini menunjukkan bahwa VSD mampu menyesuaikan penggunaan daya sesuai dengan kebutuhan debit air sehingga energi yang digunakan menjadi lebih hemat

4.3. Analisis Kelayakan Ekonomi Teknik

Setelah diketahui bahwa VSD mampu mengurangi konsumsi daya, langkah berikutnya adalah menganalisis manfaat ekonominya. Analisis ini dilakukan dengan menghitung penghematan biaya listrik yang diperoleh dan membandingkannya dengan biaya investasi awal untuk menentukan waktu pengembalian investasi menggunakan metode Simple Payback Period (SPP).

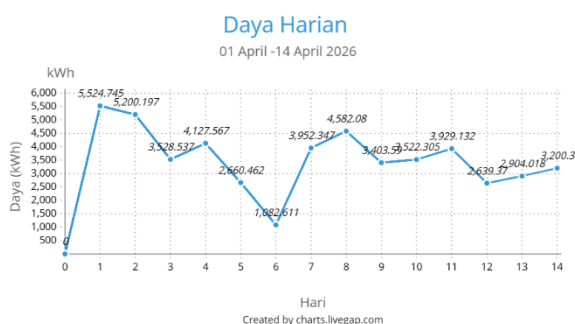
4.3.1. Penghematan Energi

Untuk mengetahui besarnya penghematan biaya listrik yang diperoleh perusahaan, terlebih dahulu dihitung selisih penggunaan energi antara sistem DOL dan sistem VSD. Agar hasil perhitungan sesuai dengan kondisi operasi yang sebenarnya, data konsumsi energi VSD dikumpulkan selama 14 hari berturut-turut. Data lengkap terdapat pada lampiran, sedangkan ringkasan konsumsi energi harian ditampilkan pada Tabel 5.

Tabel 5. Total Konsumsi Daya Harian

Hari	Daya (kWh)
1	5524.745777
2	5200.197594
3	3528.537639
4	4127.567095
5	2660.462013
6	1082.611508
7	3952.347775
8	4582.080656
9	3403.590442
10	3522.305382
11	3929.132707
12	2639.370368
13	2904.018791
14	3200.300607

Untuk memperjelas seberapa dinamisnya kebutuhan air di pabrik, fluktuasi konsumsi energi harian dari tabel di atas divisualisasikan dalam bentuk grafik pada Gambar 17 di bawah ini.



Gambar 17. Grafik Konsumsi Daya Harian

Berdasarkan data pengukuran selama 14 hari, konsumsi energi VSD berubah-ubah mengikuti kebutuhan air pabrik. Dari hasil perhitungan diperoleh rata-rata konsumsi energi sebesar 3.589,81 kWh per hari. Sebagai perbandingan, data operasi sebelumnya menunjukkan bahwa sistem DOL dengan bukaan katup sekitar 50% mengonsumsi daya sebesar 318 kW, atau setara dengan 7.632 kWh per hari. Dengan demikian, penggunaan VSD mampu menghemat energi sebesar

Penghematan harian = 7.632 kWh – 3.589,81 kWh = 4.042,19 kWh per hari. Jika pabrik beroperasi selama 365 hari dalam setahun, maka total penghematan energi yang diperoleh mencapai:

1.475.399,35 kWh per tahun. Hasil ini menunjukkan bahwa penggunaan VSD memberikan penghematan energi yang cukup besar. Selanjutnya, nilai penghematan energi tersebut dikonversi menjadi penghematan biaya listrik untuk mengetahui manfaat ekonominya.

4.3.2. Penghematan Biaya Operasional (OpEx)

Setelah diketahui jumlah energi yang berhasil dihemat, langkah berikutnya adalah menghitung nilai penghematan biaya listrik yang diperoleh. Perhitungan ini menggunakan tarif listrik industri sebesar Rp1.115 per kWh. Berdasarkan hasil sebelumnya, total penghematan energi mencapai 1.475.399,35 kWh per tahun. Dengan demikian, penghematan biaya listrik dapat dihitung sebagai berikut:

$$\begin{aligned} \text{Penghematan biaya} &= 1.475.399,35 \text{ kWh} \times \\ &\text{Rp1.115/kWh} = \text{Rp1.645.070.275,25 per tahun} \end{aligned}$$

Hasil tersebut menunjukkan bahwa penggunaan VSD pada satu unit pompa dapat mengurangi biaya listrik perusahaan hingga sekitar Rp1,65 miliar per tahun. Nilai penghematan ini cukup besar dan dapat digunakan untuk membantu mengembalikan biaya investasi pemasangan VSD

4.3.3. Analisis Waktu Pengembalian Modal (Simple Payback Period/SPP)

Untuk menerapkan sistem VSD, perusahaan perlu mengeluarkan biaya investasi awal. Dalam penelitian ini, total biaya investasi diperkirakan sebesar Rp5.000.000.000, yang mencakup pengadaan VSD 500 kW, modifikasi panel MCC, instalasi kabel daya, dan proses komisioning.

Kelayakan investasi kemudian dianalisis menggunakan metode Simple Payback Period (SPP), yaitu menghitung waktu yang dibutuhkan agar penghematan biaya listrik dapat menutupi biaya investasi. Berdasarkan hasil perhitungan:

$$\begin{aligned} SPP &= \frac{\text{Total Investasi}}{\text{Total Penghematan Per Tahun}} \\ SPP &= \frac{5.000.000.000}{1.645.070.275,25} \\ SPP &= 3,039 \text{ Tahun} \end{aligned}$$

Hasil ini menunjukkan bahwa investasi VSD dapat kembali dalam waktu sekitar 3 tahun. Dengan umur pakai peralatan yang dapat mencapai 15–20 tahun, investasi ini dinilai layak untuk diterapkan. Setelah masa pengembalian modal tercapai, perusahaan dapat terus menikmati penghematan biaya listrik lebih dari Rp1,6 miliar per tahun selama peralatan masih beroperasi. Perawatan rutin VSD tidak diperhitungkan karena dilakukan oleh tenaga internal perusahaan dan tidak menambah biaya yang signifikan.

5. KESIMPULAN DAN SARAN

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa:

Penggunaan Variable Speed Drive (VSD) terbukti lebih efisien dibandingkan sistem Direct On Line (DOL) yang menggunakan pengaturan katup. Pada kondisi operasi 50%, sistem DOL mengonsumsi daya sebesar 318 kW, sedangkan sistem VSD hanya 32 kW, sehingga diperoleh penghematan daya sebesar 286 kW.

Penggunaan VSD berpotensi menghemat energi listrik rata-rata 4.042,19 kWh per hari atau sekitar 1.475.399,35 kWh per tahun. Penghematan energi tersebut mampu mengurangi biaya listrik perusahaan hingga Rp1.645.070.275,25 per tahun. Dengan investasi sebesar Rp5.000.000.000, waktu pengembalian modal (Simple Payback Period) adalah sekitar 3,04 tahun. Hasil ini menunjukkan bahwa penerapan VSD layak dilakukan karena mampu meningkatkan efisiensi energi sekaligus memberikan manfaat ekonomi yang signifikan bagi perusahaan

5.1. Saran

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, beberapa saran yang dapat diberikan adalah sebagai berikut:

PT RAPP disarankan untuk menerapkan teknologi Variable Speed Drive (VSD) pada pompa lain yang memiliki daya besar dan beban yang berubah-ubah agar penghematan energi dapat ditingkatkan.

Penelitian selanjutnya dapat mengkaji pengaruh harmonisa yang dihasilkan oleh VSD terhadap kualitas daya listrik untuk memastikan sistem tetap beroperasi dengan baik dan sesuai standar yang berlaku.

Pada pengoperasian motor dengan kecepatan rendah dalam waktu yang lama, disarankan menggunakan sistem pendingin tambahan agar suhu motor tetap terjaga dan kinerja motor tetap optimal

UCAPAN TERIMA KASIH

Terima kasih kepada seluruh pihak yang telah mendukung dan membantu kelancaran penelitian ini dari awal hingga selesai.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] T. Elshennawy, "Techno-economic evaluation of variable speed drive (VSD) applications for energy saving in petroleum refineries," 2019.
- [2] I. Faturrohman and M. Fatkhurrohman, "Pengaturan kecepatan motor induksi 3 fasa dengan mengatur frekuensi menggunakan VSD di PERUMDAM Tirta Madani Serang," *Jurnal Sains dan Teknologi*, vol. 2, no. 1, pp. 46-56, 2023, doi: 10.58169/saintek.v2i1.135.
- [3] K. Kissock and D. Chase, "Are your variable speed pumping applications delivering the predicted savings? Improving control to maximize results," 2015.
- [4] M. N. Laili, M. C. Bagaskoro, L. Gumilar, M. R. Faiz, and Aripriharta, "Perancangan kendali motor induksi menggunakan variable speed drive," vol. 8, no. 1, 2023.
- [5] I. Mohammad Amir and A. Irman Firdaus, "Studi analisis pengaruh harmonisa akibat penggunaan variable speed drive pada motor induksi tiga fasa," n.d.
- [6] R. Patel, "Throttling in pumps and scope of energy saving," *International Journal of Advance Engineering and Research Development*, vol. 3, no. 1, 2016.
- [7] Y. Pranata, T. Arfianto, and N. Taryana, "Analisis unjuk kerja motor induksi 3 fasa menggunakan inverter 3 fasa," *TELKA*, vol. 4, no. 2, pp. 91-102, 2018.
- [8] Z. Rizqianti, "Analisis pengasutan motor jenis variable speed drive (VSD) dan soft starter pada fan cooler sistem di PT. Cemindo Gemilang Tbk Bayah," 2022.
- [9] Rizqianti, Z., & Permata, E. (2022). Analisis Pengasutan Motor Jenis Variable Speed Drive (VSD) dan Soft Starter Pada Fan Cooler Sistem Di PT. Cemindo Gemilang TBK Bayah. *Jurnal Riset Rumpun Ilmu Teknik*, 1(2).
- [10] Nugroho, S. E., Aribowo, W., & Hermawan, A. C. (2021). Sitem Pengendalian Kecepatan Motor Tiga Fasa Menggunakan Metode Direct Torque Control (DTC). *Jurnal Teknik Elektro*, 10(1).
- [11] Smith, R. dan Hawkins, B. 2020. *Energy Management Principles: Applications and Savings in Industrial Systems*. New York: McGraw-Hill Education.
- [12] Andrianus Sinaga, Y., Saudi Samosir, A., & Haris, A. (2017). Rancang Bangun Inverter 1 Fasa dengan Kontrol Pembangkit Pulse Width Modulation (PWM). *Jurnal Rekayasa Dan Teknologi Elektro-ELECTRICAN*, 11(2).
- [13] Pranoto, A. D. (2014). Pengaruh Sudut Buka Katup Terhadap Karakteristik Orifice pada Model Instalasi Pemipaan. Universitas Negeri Jakarta.