

Analisis Efisiensi Energi Motor Induksi pada *Horizontal Pumping System* dengan Penggunaan *Variable Speed Drive***Ida Bagus Made Wisnu Wardana¹, M. Saleh Al Amin², Nita Nurdiana^{3*}**^{1,2,3}*Program Studi Teknik Elektro, Universitas PGRI Palembang, Palembang, Indonesia*idabagusmadewisnuwardana@gmail.com¹, salehamin@univpgri-palembang.ac.id², nurdiani78@univpgri-palembang.ac.id^{3*}*Received 25 Juli 2025 | Revised 11 Juni 2026 | Accepted 10 Juli 2026***ABSTRAK**

Motor induksi merupakan penggerak utama di berbagai sistem industri, namun konsumsi energinya yang tinggi menjadi tantangan dalam upaya efisiensi. Salah satu teknologi yang digunakan untuk mengoptimalkan konsumsi energi adalah *Variable Speed Drive* (VSD), yang memungkinkan pengaturan kecepatan motor sesuai kebutuhan beban. Penelitian ini bertujuan menganalisis pengaruh penggunaan VSD terhadap efisiensi energi motor induksi tiga fasa pada sistem pompa horizontal untuk injeksi *produced water*. Pengujian lapangan dilakukan pada motor induksi berdaya 185 kW yang dikendalikan VSD dengan variasi frekuensi 45–47,5 Hz. Parameter yang diukur meliputi tegangan, arus, faktor daya, tekanan fluida, debit aliran, dan daya hidrolis output. Efisiensi sistem dihitung dari perbandingan daya input listrik terhadap daya hidrolis output. Hasil menunjukkan bahwa penggunaan VSD menurunkan daya start dari 923,07 kW menjadi 65,06 kW dan meningkatkan efisiensi dari 57,26% menjadi 59,34%. Kesimpulannya, VSD tidak hanya meningkatkan efisiensi energi, tetapi juga mengurangi beban mekanis, menstabilkan operasi, dan memperpanjang umur peralatan. Penerapan teknologi ini direkomendasikan pada sistem pompa industri dengan beban torsi variabel untuk mendukung konservasi energi.

Kata kunci: Motor Induksi, Variable Speed Drive, Efisiensi Energi, Sistem Pompa, Injeksi Fluida

Induction motors are the primary drivers in various industrial systems; however, their high energy consumption poses a challenge to efficiency improvement efforts. One technology used to optimize energy consumption is the Variable Speed Drive (VSD), which allows motor speed to be adjusted according to load requirements. This study aims to analyze the effect of using a VSD on the energy efficiency of a three-phase induction motor in a horizontal pumping system for produced water injection. Field tests were conducted on a 185 kW induction motor controlled by a VSD with frequency variations of 45–47.5 Hz. Parameters measured included voltage, current, power factor, fluid pressure, flow rate, and hydraulic output power. System efficiency was calculated as the ratio between electrical input power and hydraulic output power. The results show that the use of a VSD reduced starting power from 923.07 kW to 65.06 kW and increased efficiency from 57.26% to 59.34%. In conclusion, the VSD not only improves energy efficiency but also reduces mechanical load, stabilizes operation, and extends equipment lifespan. The implementation of this technology is recommended for industrial pump systems with variable torque loads to support energy conservation.

Keywords: Induction Motor, Variable Speed Drive, Energy Efficiency, Pump System, Fluid Injection

I. PENDAHULUAN

Motor induksi tiga fasa merupakan salah satu mesin listrik yang paling banyak digunakan dalam sektor industri karena memiliki konstruksi yang sederhana, keandalan operasi yang tinggi, efisiensi yang relatif baik, serta biaya pemeliharaan yang rendah (Choudhary 2020; Al Amin, Nurdiana, and Emidiana 2023). Penggunaannya mencakup berbagai aplikasi seperti sistem pompa, kompresor, blower, conveyor, dan peralatan industri lainnya yang beroperasi secara kontinu. Pada sistem perpompaan industri, motor induksi berperan sebagai penggerak utama yang menentukan kinerja hidrolis sistem secara keseluruhan, sehingga efisiensi operasinya menjadi faktor penting dalam pengelolaan energi dan biaya operasional industri.

Konsumsi energi listrik pada sektor industri sebagian besar digunakan oleh sistem penggerak motor listrik. Oleh karena itu, peningkatan efisiensi motor induksi menjadi salah satu strategi utama dalam program konservasi energi. Menurut (Dems and Komeza 2022), efisiensi motor induksi sangat dipengaruhi oleh kondisi pembebanan dan metode pengaturan kecepatan yang digunakan. Pada banyak aplikasi industri, motor masih dioperasikan pada kecepatan tetap (*fixed speed operation*) meskipun kebutuhan proses mengalami perubahan. Kondisi tersebut menyebabkan penggunaan energi yang kurang optimal karena daya listrik yang diserap motor tidak selalu sesuai dengan kebutuhan aktual sistem.

Pada sistem pompa sentrifugal, perubahan kebutuhan debit dan tekanan fluida umumnya diakomodasi menggunakan katup pengatur aliran (*throttling valve*), sementara motor tetap beroperasi pada kecepatan

nominal. Metode ini relatif sederhana namun berpotensi menimbulkan pemborosan energi akibat meningkatnya rugi-rugi hidrolik dan konsumsi daya yang tidak proporsional terhadap kebutuhan proses. Penelitian (Salmasi, Abraham, and Salmasi 2022) menunjukkan bahwa sistem pompa yang beroperasi pada kecepatan tetap memiliki efisiensi yang lebih rendah dibandingkan sistem yang menerapkan pengaturan kecepatan variabel. Hasil serupa juga dilaporkan oleh (Fouda 2023; Yang et al. 2022), yang menyatakan bahwa pengendalian kecepatan pompa berdasarkan kebutuhan beban mampu meningkatkan efisiensi energi dan menurunkan konsumsi daya secara signifikan.

Salah satu teknologi yang banyak digunakan untuk meningkatkan efisiensi energi pada motor induksi adalah *Variable Speed Drive* (VSD) atau *Variable Frequency Drive* (VFD). Teknologi ini memungkinkan pengaturan frekuensi dan tegangan suplai sehingga kecepatan putaran motor dapat disesuaikan dengan kebutuhan beban aktual sistem. Dengan pengaturan tersebut, daya listrik yang digunakan motor menjadi lebih proporsional terhadap kebutuhan proses sehingga konsumsi energi dapat dikurangi secara signifikan (Utomo and Irfan 2022; Syamsuri, Mukti, and Duanaputri 2022). Selain itu, penggunaan VSD memungkinkan sistem pompa beroperasi lebih dekat dengan kondisi *Best Efficiency Point* (BEP), sehingga efisiensi energi dan performa hidrolik sistem dapat ditingkatkan (Gevorkov et al. 2022).

Selain memberikan penghematan energi, penggunaan VSD juga mampu mengurangi arus start (*inrush current*) yang sering menjadi permasalahan pada motor induksi berdaya besar. Tingginya arus *start* dapat menyebabkan gangguan kualitas daya, peningkatan rugi-rugi energi, serta mempercepat degradasi isolasi motor akibat tekanan termal yang berlebihan. (Dems and Komeza 2022) menjelaskan bahwa pengendalian motor menggunakan inverter mampu meningkatkan efisiensi operasi pada berbagai rentang frekuensi sekaligus mengurangi dampak negatif yang ditimbulkan selama proses start-up. Penelitian (Nasir 2022; Baranidharan and Singh 2022) juga menunjukkan bahwa penggunaan inverter yang tepat dapat memperbaiki karakteristik operasi motor induksi serta meminimalkan rugi-rugi akibat harmonisa dan ketidakseimbangan tegangan.

Pada sistem perpompaan, hubungan antara kecepatan putaran motor, debit aliran, tekanan, dan daya mengikuti hukum afinitas pompa (*pump affinity laws*). Oleh karena itu, perubahan kecil pada kecepatan motor dapat memberikan pengaruh yang signifikan terhadap konsumsi energi dan kinerja sistem. (Belaroussi et al. 2022) melaporkan bahwa penerapan VSD pada sistem pompa mampu menghasilkan strategi operasi yang lebih efisien dibandingkan metode pengaturan konvensional. Hasil penelitian (Elhussieny, Elbaksawi, and Hassan 2022) juga menunjukkan bahwa penggunaan *variable-speed drive* mampu meningkatkan efisiensi sistem motor-pompa sekaligus menurunkan biaya operasi. Temuan tersebut diperkuat oleh (Wang et al. 2025) yang menyatakan bahwa kombinasi VFD dan optimasi sistem pompa dapat meningkatkan efisiensi keseluruhan sistem secara signifikan.

Berbagai penelitian sebelumnya telah membuktikan bahwa penggunaan VSD mampu meningkatkan efisiensi energi motor induksi dan sistem perpompaan. Namun demikian, sebagian besar penelitian masih dilakukan pada sistem laboratorium, simulasi, maupun aplikasi perpompaan umum. Penelitian (Fakhri, Deavy, and Putri 2021) menunjukkan bahwa pengendalian putaran motor induksi menggunakan VFD memberikan dampak positif terhadap konsumsi energi, tetapi pengujian masih terbatas pada kondisi tertentu. Hingga saat ini, kajian yang mengevaluasi kinerja aktual penggunaan VSD pada horizontal pumping system untuk injeksi *produced water* di industri minyak dan gas masih relatif terbatas, khususnya yang melibatkan analisis daya input listrik, daya hidrolik, efisiensi sistem, dan pengaruh variasi frekuensi operasi terhadap performa plant secara keseluruhan.

Berdasarkan kondisi tersebut, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh penggunaan *Variable Speed Drive* terhadap efisiensi energi motor induksi tiga fasa pada horizontal pumping system untuk injeksi *produced water* di Suban Gas Plant. Analisis dilakukan melalui pengukuran langsung terhadap parameter listrik dan hidrolik sistem pada berbagai frekuensi operasi VSD. Fokus penelitian diarahkan pada evaluasi daya input listrik, daya keluaran hidrolik, efisiensi sistem, serta pengaruh penggunaan VSD terhadap kinerja dan keandalan operasi plant. Hasil penelitian diharapkan dapat memberikan kontribusi dalam pengembangan strategi konservasi energi dan peningkatan efisiensi operasi sistem perpompaan industri, khususnya pada fasilitas minyak dan gas yang beroperasi secara kontinu.

II. METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan pendekatan eksperimen lapangan (*field experiment*) untuk menganalisis Penelitian ini menggunakan pendekatan eksperimen lapangan (*field experiment*) untuk menganalisis efisiensi energi motor induksi tiga fasa yang digunakan pada sistem pompa injeksi *produced water* di fasilitas Suban Gas Plant. Plant injeksi *produced water* merupakan bagian dari sistem pendukung produksi gas yang berfungsi untuk menginjeksikan air hasil produksi kembali ke dalam formasi melalui pompa bertekanan tinggi guna menjaga keseimbangan reservoir dan memenuhi standar pengelolaan lingkungan. Sistem ini beroperasi secara kontinu dengan variasi debit dan tekanan, sehingga memerlukan pengendalian kecepatan motor yang adaptif terhadap perubahan beban.

Motor yang diteliti adalah motor induksi tiga fasa berdaya 185 kW (250 HP) yang menggerakkan pompa horizontal tipe REDA HS175N. Motor ini dikendalikan menggunakan *Variable Speed Drive* (VSD) tipe VariStar ST7 (Sine Wave Drive, 2000 Plus) untuk menyesuaikan kecepatan putaran motor terhadap kebutuhan operasi pompa. Pengujian dilakukan dengan memvariasikan frekuensi kerja VSD pada nilai 45 Hz, 46 Hz, dan 47,5 Hz, yang merepresentasikan kondisi operasi aktual sistem injeksi *produced water* di lapangan.

Tahapan penelitian seperti ditunjukkan pada Gambar 1, diawali dengan studi literatur yang bertujuan untuk memperoleh landasan teoritis terkait karakteristik motor induksi, prinsip kerja VSD, serta hubungan antara kecepatan motor, beban pompa, dan efisiensi energi. Selanjutnya dilakukan persiapan sistem dan peralatan ukur untuk memastikan seluruh instrumen berada dalam kondisi layak dan terkalibrasi sebelum pengambilan data. Pengukuran data primer dilakukan secara langsung pada sistem aktual, baik pada kondisi motor yang dikendalikan menggunakan VSD maupun kondisi tanpa VSD yang dianalisis melalui pendekatan teoretis. Data hasil pengukuran kemudian digunakan untuk menghitung efisiensi energi motor dan sistem pompa, yang selanjutnya dibandingkan untuk dianalisis guna mengevaluasi pengaruh penggunaan VSD terhadap kinerja energi sistem.

Parameter yang diukur dalam penelitian ini meliputi tegangan keluaran VSD, arus motor, faktor daya, tekanan fluida, debit aliran, serta kecepatan putaran motor. Data dikumpulkan menggunakan perangkat ukur digital yang terdiri atas *power meter* untuk mengukur tegangan, arus, dan daya aktif motor, *tachometer* untuk mengukur kecepatan rotasi motor, serta *pressure transmitter* untuk memantau tekanan fluida pada sistem pompa. Seluruh pengukuran dilakukan pada kondisi operasi stabil untuk meminimalkan fluktuasi data.

Selain pengukuran langsung di lapangan, penelitian ini juga melakukan simulasi teoretis konsumsi daya motor tanpa VSD. Simulasi tersebut disusun berdasarkan data *nameplate* motor, karakteristik pompa, serta perhitungan kebutuhan daya secara teori sesuai dengan kondisi debit dan tekanan sistem. Hasil simulasi ini kemudian dibandingkan dengan hasil pengukuran aktual pada sistem yang menggunakan VSD untuk menilai besarnya peningkatan efisiensi energi yang diperoleh melalui penerapan pengendalian kecepatan motor.



Gambar 1. Diagram Alur Penelitian

Perhitungan Efisiensi Sistem

Efisiensi sistem pada penelitian ini ditentukan berdasarkan perbandingan antara daya keluaran hidrolik pompa dan daya masukan listrik motor induksi, yang merepresentasikan kemampuan sistem dalam mengonversi energi listrik menjadi energi hidrolik secara efektif. Pendekatan ini umum digunakan dalam evaluasi kinerja motor induksi pada aplikasi pompa industri karena mampu menggambarkan kondisi operasi aktual secara komprehensif (Choudhary 2020); (Multi and Febryane 2020). Efisiensi sistem dinyatakan dalam persentase dan dihitung menggunakan Persamaan (1).

$$\eta_{\text{sistem}} = \frac{P_{\text{hidrolik}}}{P_{\text{input}}} \times 100\% \quad (1)$$

Daya input listrik (P_{input}) merupakan daya yang diserap oleh motor induksi tiga fasa dari sumber listrik melalui *Variable Frequency Drive* (VFD). Motor induksi tiga fasa dipilih pada plant injeksi *produced water* di Suban

Gas Plant karena memiliki efisiensi yang lebih tinggi, torsi yang stabil, serta keandalan yang baik untuk operasi kontinu dibandingkan motor satu fasa, khususnya pada aplikasi industri berdaya besar (Parsa 2018); (Choudhary 2020). Daya input dihitung berdasarkan karakteristik sistem tiga fasa seimbang menggunakan Persamaan (2).

$$P_{\text{input}} = \sqrt{3} \times V_{\text{out}} \times I \times \cos \phi \quad (2)$$

di mana V_{out} adalah tegangan keluaran VFD, I adalah arus motor, dan $\cos \phi$ adalah faktor daya motor yang dalam penelitian ini diasumsikan bernilai rata-rata 0,85. Nilai konstanta $\sqrt{3} (\approx 1,73)$ digunakan untuk merepresentasikan hubungan daya total pada sistem tiga fasa. Faktor daya menjadi parameter penting karena sangat memengaruhi besar daya nyata yang diserap motor, terutama pada kondisi beban parsial (Dems and Komez 2022).

Daya keluaran hidrolik (P_{hidrolik}) merepresentasikan energi yang benar-benar dimanfaatkan oleh sistem pompa untuk mengalirkan fluida *produced water*. Besarnya daya hidrolik dipengaruhi oleh debit aliran dan perbedaan tekanan antara sisi isap (*suction*) dan sisi buang (*discharge*) pompa. Perhitungan daya hidrolik dilakukan menggunakan pendekatan sistem satuan imperial yang umum digunakan dalam industri minyak dan gas, sebagaimana ditunjukkan pada Persamaan (3).

$$P_{\text{hidrolik}} = \frac{Q \times \Delta P \times 0,7457}{1714 \times \eta_P} \quad (3)$$

di mana Q adalah debit aliran dalam satuan USGPM, ΔP adalah selisih tekanan antara *suction* dan *discharge* pompa dalam satuan psi, dan η_{pompa} adalah efisiensi pompa yang dalam penelitian ini diasumsikan sebesar 75%. Konstanta 1714 merupakan faktor konversi dalam sistem imperial untuk menyederhanakan perhitungan daya hidrolik, sedangkan konstanta 0,7457 digunakan untuk mengonversi daya dari satuan horsepower ke kilowatt.

Pengendalian kecepatan motor induksi dalam penelitian ini dilakukan menggunakan *Variable Frequency Drive* (VFD) tipe VariStar ST7 (Sine Wave Drive, 2000 Plus). VFD bekerja dengan cara mengubah frekuensi dan tegangan suplai ke motor induksi, sehingga kecepatan putaran motor dapat diatur secara proporsional terhadap frekuensi sesuai dengan prinsip dasar motor induksi. Penurunan frekuensi akan menurunkan kecepatan putaran motor, sementara penyesuaian tegangan dilakukan untuk menjaga rasio tegangan terhadap frekuensi (V/f) agar fluks magnet tetap stabil dan motor beroperasi secara efisien.

Dengan kemampuan pengaturan frekuensi ini, VFD memungkinkan motor dan pompa bekerja sesuai dengan kebutuhan aktual debit dan tekanan sistem injeksi *produced water*. Dampaknya terhadap plant adalah berkurangnya konsumsi energi listrik pada kondisi beban parsial, menurunnya arus start, serta berkurangnya tegangan mekanis pada komponen pompa dan motor. Selain itu, pengaturan kecepatan yang fleksibel membantu meningkatkan efisiensi sistem secara keseluruhan karena daya listrik yang diserap motor menjadi lebih sebanding dengan daya hidrolik yang dibutuhkan oleh proses injeksi fluida.

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

Penelitian ini menghasilkan evaluasi efisiensi sistem melalui dua pendekatan, yaitu simulasi teoretis tanpa penggunaan *Variable Speed Drive* (VSD) dan pengujian aktual menggunakan VSD. Kedua pendekatan tersebut digunakan untuk menilai secara kuantitatif pengaruh pengaturan kecepatan motor induksi terhadap daya input listrik, daya output hidrolik, serta implikasinya terhadap kinerja keseluruhan *plant system* pompa sentrifugal untuk injeksi *produced water*. Perbandingan ini menjadi penting karena sistem injeksi beroperasi secara kontinu dan sangat dipengaruhi oleh kesesuaian antara kebutuhan proses dan konsumsi energi.

Simulasi Teoretis Tanpa VSD

Simulasi teoretis dilakukan berdasarkan data *nameplate* motor (Gambar 2) dengan menggunakan perhitungan daya input sesuai Persamaan (2). Hasil simulasi menunjukkan bahwa daya start motor mencapai 923,07 kW, sedangkan daya pada kondisi operasi (*running condition*) sebesar 184,61 kW. Nilai ini mengindikasikan tingginya konsumsi daya, terutama pada saat *start-up*, yang berpotensi menimbulkan *inrush current* sangat besar serta beban termal dan mekanis yang signifikan pada motor dan sistem kelistrikan.



JSE-5

Peningkatan dan kestabilan efisiensi ini menunjukkan bahwa VSD mampu menyesuaikan daya input listrik agar lebih proporsional terhadap kebutuhan daya output hidrolik. Dalam konteks *plant system*, kondisi ini menandakan bahwa energi listrik yang disuplai ke motor dimanfaatkan secara lebih optimal untuk menghasilkan kerja hidrolik, sehingga *energy losses* dapat ditekan. Meskipun peningkatan efisiensi secara persentase terlihat moderat, dampaknya menjadi signifikan pada sistem industri berskala besar yang beroperasi secara kontinu.

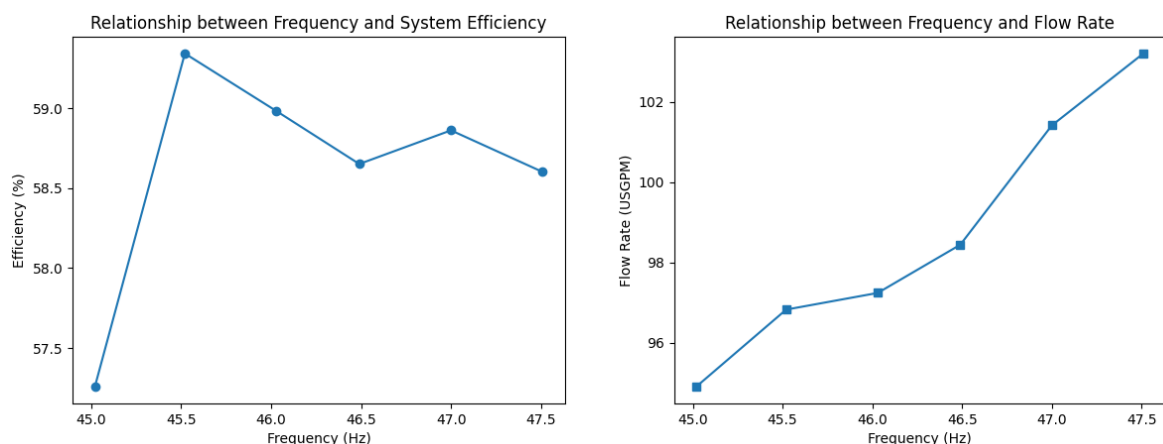
Kinerja Hidrolik: Hubungan Frekuensi, *Flow Rate*, dan ΔP

Kinerja hidrolik sistem menunjukkan tren peningkatan seiring kenaikan frekuensi kerja, sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 3. Nilai *flow rate* meningkat dari 94,91 USGPM pada frekuensi 45,02 Hz menjadi 103,20 USGPM pada frekuensi 47,51 Hz, sementara selisih tekanan (ΔP) meningkat dari 785,7 psi menjadi 833,7 psi.

Tabel 3. Flowrate terhadap Frekuensi

Frekuensi (Hz)	Flow Rate (USGPM)	ΔP (psi)
45,02	94,91	785,7
45,52	96,825	796,5
46,03	97,24	807,5
46,49	98,44	814,9
47,00	101,41	825,6
47,51	103,20	833,7

Peningkatan flow rate dan ΔP ini menunjukkan bahwa daya output hidrolik meningkat seiring dengan kenaikan kecepatan motor. Namun, peningkatan tersebut tetap berada dalam rentang operasi yang efisien karena daya input listrik dikendalikan oleh VSD. Hal ini mengindikasikan bahwa sistem pompa beroperasi mendekati *Best Efficiency Point* (BEP) pada rentang frekuensi yang diuji. Hubungan antara frekuensi, efisiensi, dan flow rate diperkuat melalui Gambar 2, yang menunjukkan bahwa peningkatan kecepatan motor menghasilkan peningkatan debit aliran tanpa penurunan efisiensi sistem yang signifikan.



Gambar 2. Grafik Hubungan Antara *Frequency-Efficiency-Flow Rate*

Grafik hubungan *frequency-efficiency-flow rate* pada Gambar 2 secara eksplisit memperlihatkan keterkaitan antara pengaturan kecepatan motor melalui VFD dengan peningkatan kinerja hidrolik dan efisiensi energi sistem, sehingga memperkuat analisis kuantitatif yang diperoleh dari hasil pengukuran dan perhitungan.

Hasil perhitungan efisiensi sistem dan daya output hidrolik menunjukkan implikasi yang signifikan terhadap kinerja keseluruhan *plant system* injeksi *produced water*. Efisiensi sistem pada kisaran 57,26%–59,34% menunjukkan bahwa sebagian besar daya input listrik berhasil dikonversikan menjadi daya hidrolik yang berguna. Peningkatan efisiensi ini secara langsung berdampak pada penurunan rugi-rugi energi dalam bentuk panas dan rugi-rugi listrik, sehingga konsumsi energi total *plant* menjadi lebih optimal.

Daya output hidrolik yang meningkat seiring kenaikan frekuensi kerja menunjukkan bahwa sistem pompa mampu memenuhi kebutuhan proses injeksi tanpa memerlukan kelebihan daya listrik. Hal ini sangat penting bagi *plant system* yang beroperasi dalam jangka panjang, karena efisiensi yang lebih tinggi akan menurunkan konsumsi energi per satuan volume fluida yang diinjeksi. Selain itu, operasi yang mendekati *best*

efficiency point berkontribusi terhadap kestabilan aliran dan tekanan, mengurangi fluktuasi operasi, serta menurunkan risiko *hydraulic shock* dan *mechanical stress* pada komponen pompa dan jaringan perpipaan.

Secara keseluruhan, penerapan *Variable Frequency Drive* pada motor induksi tiga fasa terbukti meningkatkan efisiensi energi, menurunkan beban start, serta meningkatkan keandalan dan keberlanjutan operasi *plant system*. Meskipun peningkatan efisiensi secara persentase relatif moderat, dampaknya menjadi sangat signifikan dalam konteks *industrial-scale operation*, di mana penghematan energi kecil sekalipun dapat menghasilkan manfaat ekonomi dan teknis yang besar dalam jangka panjang.

IV. KESIMPULAN

Penelitian ini membuktikan bahwa penggunaan *Variable Speed Drive* (VSD) pada motor induksi tiga fasa yang menggerakkan pompa sentrifugal dalam sistem injeksi produced water secara nyata meningkatkan efisiensi energi dan performa sistem. Hasil pengujian menunjukkan bahwa arus start berhasil ditekan dari 1650 A menjadi 116,3 A, dan daya start turun dari 923,07 kW menjadi hanya 65,06 kW, menunjukkan pengurangan lebih dari 90%. Selain itu, efisiensi sistem meningkat dari 57,26% menjadi 59,34% dengan penggunaan VSD, yang didukung oleh peningkatan daya hidrolis dan kontrol kecepatan yang presisi terhadap kebutuhan beban. Penerapan VSD tidak hanya menghemat energi tetapi juga meningkatkan kestabilan operasi, memperpanjang umur peralatan, serta mengurangi risiko lonjakan arus dan tekanan mekanik yang berlebihan. Hasil ini menguatkan pentingnya penggunaan VSD dalam sistem pompa industri, khususnya pada aplikasi dengan beban torsi variabel. Ke depan, pendekatan ini layak direkomendasikan sebagai strategi konservasi energi di sektor industri proses.

DAFTAR PUSTAKA

- Amin, M Saleh Al, Nita Nurdiana, and Emidiana. 2023. *Pengaturan Dan Penggunaan Motor Listrik*.
- Baranidharan, M, and R R Singh. 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>.
- Belaroussi, O, A Terki, A Ammar, and K V Fedorovich. 2022. "Developing and Implementing the Performance of Induction Motors Used in Well Pumping Systems." *European Journal of Electrical Engineering* 24 (5-6): 247-56. <https://doi.org/10.18280/ejee.245-603>.
- Choudhary, P. 2020. *Efficiency Analysis of Three-Phase Induction Motors: A Practical Approach*. New Delhi, India: Engineering Books India.
- Dems, M, and K Komez. 2022. "Influence of Inverter Supply on Energy Efficiency of Induction Motors under Partial Load Conditions." *Energies* 15 (4): 2153. <https://doi.org/10.3390/en15042153>.
- Elhussieny, H, O; Elbaksawi, and M Hassan. 2022. "Improving Energy Efficiency and Economics of Motor-Pump-System Using Electric Variable-Speed Drives for Automatic Transition of Working Points." *Computers & Electrical Engineering* 97: 107607. <https://doi.org/10.1016/j.compeleceng.2021.107607>.
- Fakhri, A B F, Y A; Deavy, and M Putri. 2021. "Analisis Pengaruh Kendali Putar Motor Induksi Tiga Fasa Menggunakan VFD Siemens." In *Prosiding Konferensi Nasional Sistem Dan Informatika*, 674-683. <https://doi.org/http://ojs.polmed.ac.id/index.php/KONSEP2021/article/view/894>.
- Fouda, Y M. 2023. "A Selection Method of Variable Speed Centrifugal Pumps for Maximum Hydraulic Efficiency." *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering* 45: 560. <https://doi.org/10.1007/s40430-023-04481-7>.
- Gevorkov, L, J L Dominguez-Garcia, A Rassolkin, and T Vaimann. 2022. "Comparative Simulation Study of Pump System Efficiency Driven by Induction and Synchronous Reluctance Motors." *Energies* 15 (11): 4068. <https://doi.org/10.3390/en15114068>.
- Multi, A, and E Febryane. 2020. "Pengaruh Efisiensi Motor Induksi Terhadap Konsumsi Energi Listrik Di Industri Manufaktur." *Jurnal Energi Dan Sistem Listrik* 5 (2): 12-18.
- Nasir, B A. 2022. "Determination of the Harmonic Losses in an Induction Motor Fed by an Inverter." *Engineering, Technology & Applied Science Research* 12 (6): 9536-45.

- <https://doi.org/10.48084/etasr.5012>.
- Parsa, I M. 2018. *Motor-Motor Listrik*. Yogyakarta, Indonesia: Andi Publisher.
- Salmasi, F, J Abraham, and A Salmasi. 2022. "Evaluation of Variable Speed Pumps in Pressurized Water Distribution Systems." *Applied Water Science* 12 (3): 51. <https://doi.org/10.1007/s13201-022-01577-8>.
- Syamsuri, T U, H Mukti, and R Duanaputri. 2022. "Analisis Penggunaan Variable Speed Drive (VSD) Pada Motor Kompresor." *ELPOSYS: Jurnal Sistem Kelistrikan* 8 (3): 72–75. <https://doi.org/10.33795/elposys.v8i3.82>.
- Utomo, B S, and I Irfan. 2022. "Efisiensi Energi Listrik Menggunakan Variable Speed Drive (VSD) Pada Motor Induksi 3 Phasa." *Jurnal EEICT (Electric Electronic Instrumentation Control Telecommunication* 5 (2): 35–39. <https://doi.org/10.31602/eeict.v5i2.9214>.
- Wang, G, D Bejar, T A Sevilla, and L Ding. 2025. "Preliminary Investigation of Overall Efficiency of Motor-Driven Pump Systems Powered by a Variable Frequency Drive with and without Impeller Trimming." *Science and Technology for the Built Environment*. <https://doi.org/10.1080/23744731.2025.2578988>.
- Yang, L, X Zhang, Y Wang, and H Li. 2022. "Development, Validation and Application of an Energy Model for Energy Efficient Operation of Parallel Pump Systems." *Journal of Building Engineering* 59: 105098. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2022.105098> .