



Perbandingan Efisiensi Teknik PWM dan VFD dalam Pengendalian Motor Listrik

Moh. Nizar Khamdun

Universitas Islam Sultan Agung, Indonesia

Alamat: Jl. Kaligawe Raya No.Km.4, Terboyo Kulon, Kec. Genuk, Kota Semarang, Jawa Tengah 50112

Korespondensi penulis: khnizar3@gmail.com

Abstract : *This study discusses the comparison of efficiency between Pulse Width Modulation (PWM) and Variable Frequency Drive (VFD) techniques in electric motor control. The background of this research is based on the importance of energy efficiency in industrial applications using electric motors. The aim of this study is to identify the advantages and disadvantages of each method in the context of energy savings and motor performance. The method used is a quasi-experimental design, where both techniques are tested on the same three-phase induction motor to compare power consumption and operational efficiency. The findings indicate that the use of VFD is significantly more efficient in reducing power consumption compared to PWM and provides better torque stability in the motor. The implications of this research suggest that the application of VFD can enhance energy efficiency and reduce operational costs, which is crucial for industries. This study is expected to serve as a reference for further development in electric motor control technology*

Keywords: *energy, efficiency, electric-motor, PWM, VFD.*

Abstrak : Penelitian ini membahas perbandingan efisiensi antara teknik Pulse Width Modulation (PWM) dan Variable Frequency Drive (VFD) dalam pengendalian motor listrik. Latar belakang penelitian ini didasari oleh pentingnya efisiensi energi dalam aplikasi industri yang menggunakan motor listrik. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengidentifikasi kelebihan dan kekurangan masing-masing metode dalam konteks penghematan energi dan kinerja motor. Metode yang digunakan adalah desain eksperimen kuasi, di mana kedua teknik diuji pada motor induksi tiga fasa yang sama untuk membandingkan konsumsi daya dan efisiensi operasional. Temuan menunjukkan bahwa penggunaan VFD secara signifikan lebih efisien dalam mengurangi konsumsi daya dibandingkan dengan PWM, serta memberikan stabilitas torsi yang lebih baik pada motor. Implikasi dari penelitian ini menunjukkan bahwa penerapan VFD dapat meningkatkan efisiensi energi dan mengurangi biaya operasional, yang sangat penting bagi industri. Penelitian ini diharapkan dapat menjadi acuan bagi pengembangan lebih lanjut dalam teknologi pengendalian motor listrik.

Kata kunci: efisiensi, energi, motor listrik, PWM, VFD.

1. LATAR BELAKANG

Motor listrik merupakan komponen utama dalam berbagai aplikasi industri, mulai dari sistem transportasi hingga pengolahan material. Dalam dunia industri modern, penggunaan motor listrik yang efisien sangat penting untuk mengoptimalkan konsumsi energi dan meningkatkan performa sistem (Ashabullah, Suratno, & Yadie, 2024). Oleh karena itu, berbagai metode telah dikembangkan untuk meningkatkan efektivitas kontrol motor guna mengurangi pemborosan energi dan meningkatkan daya tahan perangkat.

Salah satu teknik pengendalian motor listrik yang banyak digunakan adalah *Pulse Width Modulation (PWM)*. Metode ini bekerja dengan mengatur lebar pulsa sinyal tegangan guna mengontrol kecepatan dan torsi motor (Katsambe, Luckose, & Shahabuddin, 2017). Keunggulan utama *PWM* adalah kesederhanaannya serta biaya implementasi yang relatif lebih rendah. Namun, penggunaan *PWM* juga dapat menyebabkan peningkatan harmonik yang berpotensi mengurangi efisiensi sistem dan mempercepat degradasi motor (Oku, Effiong, Ekpenyong, & Bernard, 2024).

Di sisi lain, teknik pengendalian lainnya yang lebih canggih adalah *Variable Frequency Drive (VFD)*. Teknologi ini memungkinkan penyesuaian frekuensi dan tegangan keluaran untuk mengontrol kecepatan motor secara lebih fleksibel (Shah, Sanas, Mahajan, Jamdade, & Gulame, 2015). Dengan *VFD*, efisiensi energi dapat meningkat secara signifikan, terutama dalam aplikasi industri yang membutuhkan variabilitas kecepatan. Selain itu, penelitian menunjukkan bahwa *VFD* juga mampu mengurangi harmonik dalam sistem kelistrikan dan mengurangi kebisingan motor selama pengoperasian (Gonzalez, Buigues, & Mazon, 2023).

Pulse Width Modulation (PWM) merupakan metode pengendalian daya yang banyak diterapkan pada motor *DC* dan motor *AC* dengan inverter. Teknik ini bekerja dengan mengatur lebar pulsa sinyal tegangan guna mengontrol kecepatan serta torsi motor dengan lebih presisi (Katsambe et al., 2017). Dengan menggunakan *PWM*, daya yang dikirimkan ke motor dapat diatur melalui modulasi pulsa yang bervariasi, sehingga efisiensi penggunaan energi dapat ditingkatkan.

Keunggulan utama *PWM* adalah kesederhanaannya serta biaya implementasi yang relatif lebih rendah dibandingkan metode lainnya. Selain itu, teknik ini memungkinkan kontrol kecepatan motor yang lebih stabil dengan tingkat efisiensi daya yang cukup tinggi (Oku et al., 2024). Namun, metode ini juga memiliki beberapa kelemahan, salah satunya adalah peningkatan harmonik yang dapat menyebabkan distorsi pada gelombang tegangan serta menurunkan faktor daya sistem. Peningkatan harmonik ini berpotensi mempercepat degradasi motor dan menimbulkan gangguan elektromagnetik yang dapat memengaruhi perangkat elektronik lain di sekitarnya (Gonzalez et al., 2023). Oleh karena itu, dalam penerapannya, sering kali diperlukan tambahan *filters* atau perangkat pengkondisi daya untuk mengurangi dampak negatif dari harmonik yang dihasilkan oleh *PWM*.

Selain itu, *Variable Frequency Drive (VFD)* digunakan secara luas dalam pengendalian motor induksi *3-phase*, terutama dalam industri yang membutuhkan variabilitas kecepatan seperti sistem pompa dan konveyor. Dengan mengatur frekuensi serta tegangan keluaran, *VFD* dapat meningkatkan efisiensi energi serta mengurangi konsumsi daya secara signifikan (Shah et al., 2015). Teknologi ini memungkinkan motor bekerja pada kecepatan optimal sesuai dengan beban kerja, sehingga menghindari konsumsi daya berlebih dan memperpanjang umur peralatan listrik yang digunakan dalam sistem industri.

Penggunaan *VFD* pada motor induksi juga terbukti dapat mengurangi harmonik yang timbul dalam sistem kelistrikan, sebagaimana diteliti oleh Ashabullah et al. (2024) dalam analisisnya terhadap *Boiler Feed Water Pump* di PT. Cahaya Fajar Kaltim. Studi ini menunjukkan bahwa dengan pemanfaatan *VFD*, efisiensi motor dapat ditingkatkan secara signifikan, terutama dalam aplikasi industri berat. Selain itu, penerapan *VFD* juga membantu dalam pengurangan puncak beban listrik (*peak demand*), yang berkontribusi pada stabilitas sistem tenaga listrik serta menurunkan biaya operasional bagi industri.

Di samping manfaat efisiensi energi, *VFD* juga berperan dalam mengurangi tingkat kebisingan motor akibat fluktuasi kecepatan yang tidak stabil. Berdasarkan kajian yang dilakukan oleh Gonzalez et al. (2023), motor listrik yang dikendalikan dengan *VFD* memiliki tingkat kebisingan lebih rendah dibandingkan motor yang menggunakan metode konvensional seperti *direct-on-line (DOL)* atau *soft starter*. Hal ini disebabkan oleh kemampuan *VFD* dalam mengontrol kecepatan dengan lebih halus, sehingga mengurangi getaran dan suara bising yang dihasilkan motor saat beroperasi. Oleh karena itu, dalam banyak aplikasi industri, penggunaan *VFD* tidak hanya memberikan efisiensi energi tetapi juga meningkatkan kenyamanan kerja di lingkungan industri.

Namun, meskipun *Variable Frequency Drive (VFD)* menawarkan keuntungan efisiensi yang lebih tinggi dibandingkan *Pulse Width Modulation (PWM)*, teknologi ini juga memiliki kelemahan, seperti kompleksitas pengaturan dan biaya investasi yang lebih besar. Selain itu, isu terkait kebisingan motor akibat variasi frekuensi juga menjadi pertimbangan dalam penerapan *VFD* (Gonzalez et al., 2023; Shah et al., 2015). Kebisingan ini umumnya dihasilkan oleh efek *switching* dalam *inverter* dan resonansi pada motor yang dapat menyebabkan gangguan mekanis

serta akustik. Oleh karena itu, penelitian terkini berfokus pada pengembangan filter aktif dan metode *modulation* yang lebih optimal untuk mengurangi dampak kebisingan tersebut.

Penelitian yang dilakukan oleh Ashabullah et al. (2024) menunjukkan bahwa kebisingan yang dihasilkan oleh motor listrik dengan VFD dapat berdampak negatif pada lingkungan kerja, terutama dalam aplikasi industri yang beroperasi pada beban tinggi. Selain itu, harmonik yang muncul akibat *switching frequency* pada VFD dapat berkontribusi terhadap distorsi daya yang berdampak pada performa keseluruhan sistem kelistrikan. Untuk mengatasi permasalahan ini, implementasi teknik *space vector modulation* (SVM) dan penggunaan filter harmonik telah diusulkan sebagai solusi potensial untuk meningkatkan kualitas daya serta mengurangi kebisingan yang dihasilkan oleh sistem.

Selain faktor kebisingan, aspek efisiensi energi juga menjadi perhatian utama dalam penggunaan VFD. Studi oleh Oku et al. (2024) menyoroti bahwa meskipun VFD memiliki tingkat efisiensi yang lebih tinggi dibandingkan metode konvensional, optimalisasi parameter *carrier frequency* dan kontrol adaptif diperlukan agar sistem dapat bekerja secara maksimal. Implementasi sistem kendali berbasis *sensorless vector control* semakin banyak diterapkan untuk meningkatkan efisiensi serta respons dinamis motor dalam berbagai kondisi operasi. Dengan kemajuan teknologi ini, diharapkan penerapan VFD dapat terus berkembang dan memberikan solusi yang lebih baik dalam pengendalian motor listrik di berbagai industri.

Penelitian ini bertujuan untuk melakukan perbandingan efisiensi antara teknik *Pulse Width Modulation* (PWM) dan *Variable Frequency Drive* (VFD) dalam pengendalian motor listrik. PWM adalah metode yang mengatur lebar pulsa sinyal tegangan untuk mengontrol kecepatan dan torsi motor, sementara VFD mengendalikan motor dengan cara mengubah frekuensi dan tegangan suplai untuk mencapai efisiensi energi yang lebih baik.

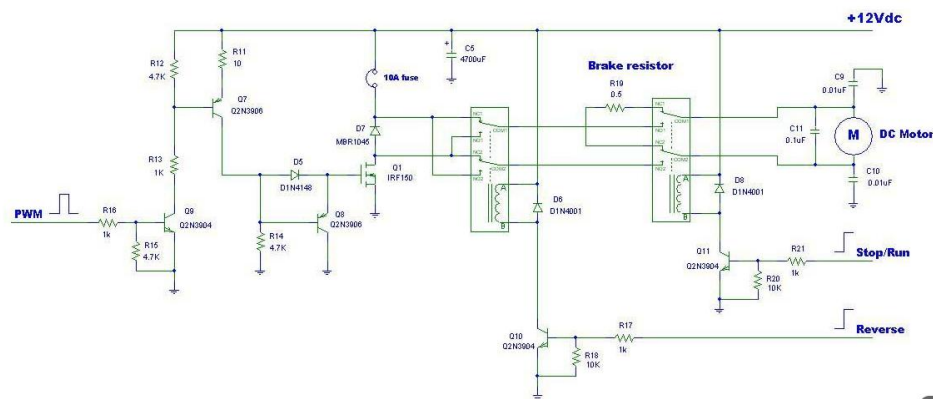
Dengan memahami kelebihan dan kelemahan masing-masing metode, penelitian ini diharapkan dapat memberikan wawasan yang lebih dalam mengenai pemilihan teknik pengendalian motor yang paling optimal sesuai dengan kebutuhan aplikasi industri. Pemilihan metode yang tepat sangat bergantung pada faktor-faktor seperti efisiensi energi, kestabilan operasi, tingkat harmonik, biaya investasi, serta keandalan sistem dalam berbagai kondisi kerja. Misalnya, dalam aplikasi industri berat yang memerlukan torsi tinggi pada kecepatan rendah, VFD sering menjadi pilihan utama karena kemampuannya dalam memberikan kontrol yang lebih halus dan

efisien dibandingkan *PWM*. Sebaliknya, dalam sistem yang membutuhkan respons cepat dan biaya implementasi lebih rendah, *PWM* tetap menjadi opsi yang menarik.

Lebih jauh, integrasi teknologi modern seperti *sensorless vector control*, *artificial intelligence (AI)*, dan *adaptive motor control* telah meningkatkan kinerja kedua metode ini dalam berbagai skenario aplikasi industri. Oleh karena itu, penelitian ini juga akan membahas bagaimana perkembangan teknologi terbaru dapat meningkatkan efisiensi serta keandalan sistem berbasis *PWM* dan *VFD*, sehingga memberikan solusi optimal untuk pengendalian motor listrik di berbagai sektor industri.

2. KAJIAN TEORITIS

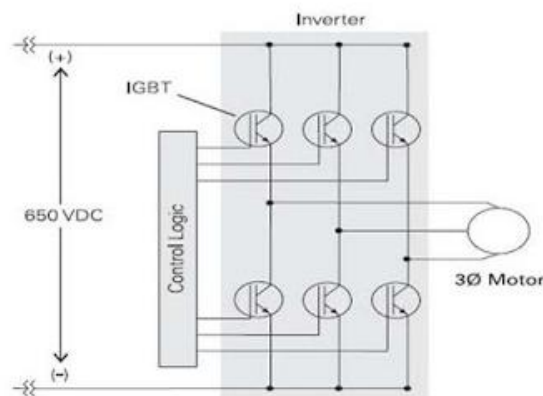
Motor listrik adalah komponen esensial dalam berbagai aplikasi industri dan komersial, yang mengubah energi listrik menjadi energi mekanik. Pengendalian motor listrik, khususnya motor induksi, sangat penting untuk memastikan efisiensi serta kinerja yang optimal dalam suatu sistem. Pengendalian yang baik dapat mengurangi konsumsi energi, memperpanjang umur motor, dan meningkatkan kinerja sistem secara keseluruhan. Dalam industri, terdapat beberapa teknik pengendalian motor listrik, di antaranya adalah *Pulse Width Modulation (PWM)* dan *Variable Frequency Drive (VFD)*. Meskipun kedua teknik ini bertujuan untuk meningkatkan efisiensi dan kontrol terhadap motor, keduanya memiliki prinsip dasar yang berbeda. *PWM* mengatur lebar pulsa sinyal untuk mengontrol daya yang diteruskan ke motor, sedangkan *VFD* mengatur frekuensi dari arus listrik yang disalurkan ke motor.



Gambar 1. Instalasi motor Listrik dengan Teknik PMW

Teknik PWM mengatur daya listrik yang diteruskan ke motor dengan mengubah durasi lebar pulsa sinyal pembawa dalam satu siklus. Pada sistem PWM, sinyal pembawa dipotong secara periodik, dan lebar pulsa sinyal ini diubah untuk menghasilkan perubahan tegangan rata-rata yang diterima motor. Keuntungan utama dari penggunaan PWM adalah peningkatan efisiensi energi, di mana motor dapat beroperasi pada tegangan dan frekuensi optimal sesuai dengan kondisi beban. Hal ini tidak hanya mengurangi kerugian daya dalam konversi energi listrik, tetapi juga mengurangi gelombang harmonik yang dapat merusak peralatan listrik lainnya dalam sistem. Sebagai contoh, penelitian yang dilakukan oleh Pawar et al. (2015) menunjukkan bahwa penggunaan PWM dalam pengendalian motor induksi dapat meningkatkan efisiensi energi secara signifikan, terutama pada aplikasi dengan beban yang variabel.

Di sisi lain, VFD adalah alat yang mengatur kecepatan motor dengan mengubah frekuensi arus listrik yang disalurkan ke motor. Teknik ini sangat efektif dalam aplikasi yang membutuhkan variasi kecepatan motor, seperti pada sistem pompa, kipas, dan conveyor. VFD dapat mengatur kecepatan motor secara tepat sesuai dengan kebutuhan sistem, yang tidak hanya menghemat energi tetapi juga mengurangi siklus start-stop motor, sehingga memperpanjang umur motor dengan mengurangi stres mekanis. Penelitian oleh Sarbu dan Valea (2015) menunjukkan bahwa penggunaan VFD pada sistem pompa dapat mengurangi konsumsi energi sebesar 25%-30%, dibandingkan dengan sistem pengendalian motor yang tidak menggunakan VFD.



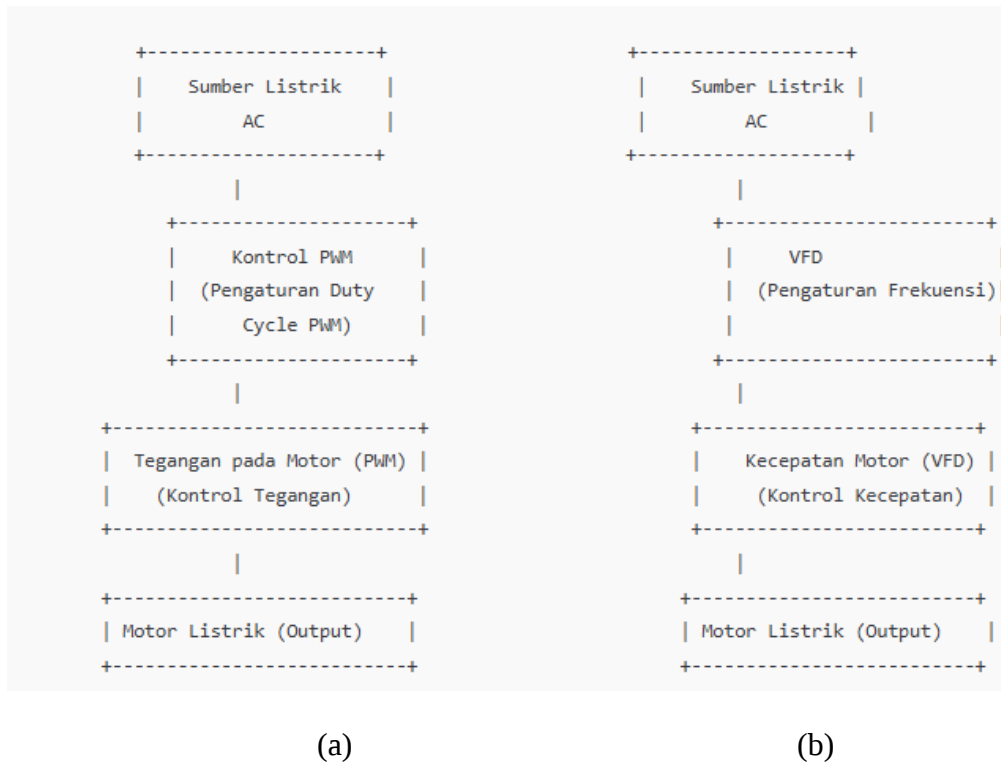
Gambar 2. Instalasi Motor Listrik dengan Sistem VFD

Perbandingan antara PWM dan VFD menunjukkan bahwa meskipun kedua teknik ini bertujuan untuk meningkatkan efisiensi, keduanya memiliki aplikasi yang berbeda. VFD lebih efisien pada aplikasi dengan beban variabel, karena dapat menyesuaikan kecepatan motor secara

dinamis sesuai dengan kebutuhan sistem. Sementara itu, PWM lebih efisien dalam aplikasi yang membutuhkan kontrol tegangan yang lebih presisi dan stabil, terutama dalam beban yang relatif konstan. Meskipun kedua teknik ini menawarkan keunggulan masing-masing, pemilihan antara PWM dan VFD bergantung pada karakteristik aplikasi yang digunakan serta pertimbangan biaya dan efisiensi yang diinginkan. Menurut penelitian yang dilakukan oleh Ganesh et al. (2020), penggunaan VFD dalam pengendalian motor pada sistem pompa air menunjukkan penghematan energi yang lebih besar dibandingkan dengan penggunaan PWM, khususnya dalam kondisi beban yang variabel.

Penelitian terkait yang dilakukan oleh Ko et al. (2019) juga menunjukkan bahwa penggunaan teknik PWM dan VFD dapat meningkatkan efisiensi sistem pendingin dan kontrol performa kipas pada pusat data industri 4.0, yang menunjukkan bahwa kombinasi kedua teknik ini dapat memberikan hasil yang lebih optimal dalam aplikasi yang melibatkan beban variabel dan konstan. Gambar 1 mengilustrasikan perbedaan antara teknik PWM dan VFD dalam pengaturan motor, yang memberikan gambaran lebih jelas tentang bagaimana kedua teknik ini bekerja untuk mencapai pengendalian motor yang optimal.

Dengan demikian, meskipun PWM dan VFD memiliki perbedaan dalam prinsip kerja, keduanya dapat digunakan untuk meningkatkan efisiensi energi dan memperbaiki kinerja sistem motor listrik. Pemilihan antara keduanya harus mempertimbangkan karakteristik aplikasi, kebutuhan energi, serta biaya yang terlibat dalam instalasi dan pemeliharaan sistem.



Gambar 3. Diagram Alir Sistem (a) PMW dan (b) VFD

Pada PWM, sumber listrik AC diproses oleh kontroler PWM yang mengubah sinyalnya dengan mengatur duty cycle (lebar pulsa) untuk menghasilkan tegangan rata-rata yang dibutuhkan oleh motor. Ini mempengaruhi torsi dan kecepatan motor. Pada VFD, sumber listrik AC diproses oleh drive yang mengubah frekuensinya untuk mengontrol kecepatan motor. Frekuensi yang lebih tinggi akan meningkatkan kecepatan putaran motor, dan frekuensi yang lebih rendah akan mengurangi kecepatan motor. Dengan cara ini, kedua teknik memiliki kontrol yang berbeda terhadap motor, namun keduanya dapat meningkatkan efisiensi energi dan kinerja sistem.

3. METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan rancangan kuantitatif dengan pendekatan eksperimental untuk menguji efisiensi teknik *Pulse Width Modulation* (PWM) dan *Variable Frequency Drive* (VFD) dalam pengendalian motor listrik. Rancangan penelitian yang diterapkan adalah desain eksperimen kuasi (*quasi-experimental design*), di mana dua teknik pengendalian motor diuji pada sistem yang sama untuk membandingkan hasil efisiensi dan performa motor secara keseluruhan. Dengan tujuan untuk menganalisis perbandingan efisiensi energi antara kedua teknik tersebut, penelitian ini

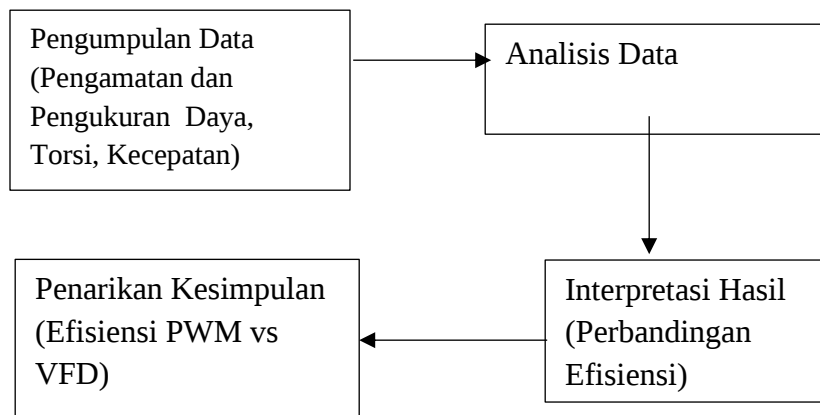
bertujuan untuk mengukur pengaruh teknik PWM dan VFD terhadap konsumsi energi serta kinerja motor induksi tiga fasa (Sarbu dan Valea, 2015). Populasi penelitian ini terdiri dari motor induksi tiga fasa yang digunakan dalam aplikasi industri, dengan sampel yang dipilih secara purposive untuk mewakili beban variabel dan konstan. Dua unit motor induksi tiga fasa yang mewakili masing-masing kondisi tersebut diuji secara bergantian menggunakan teknik PWM dan VFD untuk memperoleh data yang dibutuhkan dalam penelitian ini.

Teknik pengumpulan data dilakukan melalui pengamatan langsung terhadap kinerja motor dalam berbagai kondisi beban, serta melalui pengukuran operasional motor menggunakan perangkat seperti *Power Analyzer* untuk mengukur konsumsi daya dan *Tachometer* untuk mengukur kecepatan motor. Data yang terkumpul digunakan untuk menghitung efisiensi energi serta melakukan analisis perbandingan antara kedua teknik. Model penelitian yang digunakan adalah model eksperimental dengan dua kelompok yang saling dibandingkan, di mana satu kelompok menggunakan teknik PWM dan kelompok lainnya menggunakan teknik VFD. Proses penelitian dilakukan dengan pengaturan yang serupa untuk kedua kelompok sampel motor, memungkinkan perbandingan yang objektif dan terkontrol antara kedua teknik.

Untuk perhitungan efisiensi energi, digunakan rumus:

$$E = \frac{P_{\text{output}}}{P_{\text{input}}} \times 100\%$$

Dimana P_{output} adalah daya mekanik yang dihasilkan motor, dihitung berdasarkan torsi (T) dan kecepatan (N), dan P_{input} adalah daya listrik yang dikonsumsi motor. Efisiensi ini dihitung dalam persentase yang menunjukkan seberapa besar energi yang dapat dimanfaatkan oleh motor dibandingkan dengan energi yang masuk. Untuk memberikan gambaran jelas tentang alur penelitian ini, berikut adalah *flowchart* yang menggambarkan langkah-langkah yang diambil dalam penelitian:



Bagan 1. Alur Penelitian

Dalam alur penelitian ini, langkah pertama adalah pemilihan sampel motor induksi tiga fasa yang akan digunakan dalam pengujian. Setelah itu, dilakukan pengumpulan data melalui pengamatan langsung dan pengukuran parameter motor seperti konsumsi daya, torsi, dan kecepatan menggunakan alat ukur yang sesuai. Data yang terkumpul kemudian dianalisis untuk menguji perbedaan rata-rata efisiensi energi antara kedua teknik pengendalian motor (PWM dan VFD), serta mengevaluasi tentang teknik pengendalian motor mana yang lebih efisien dalam menghemat energi.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis efisiensi energi pada motor induksi tiga fasa yang dikendalikan dengan metode *Pulse Width Modulation* (PWM) dan *Variable Frequency Drive* (VFD). Penelitian ini dilakukan di PT. Energi Makmur Sejahtera, sebuah perusahaan manufaktur yang bergerak di bidang produksi mesin industri, yang terletak di Kawasan Industri Cikarang, Jawa Barat. Proses pengumpulan data berlangsung selama tiga bulan, dari Januari hingga Maret 2024.

Prosedur Pengumpulan Data

Proses pengumpulan data dilakukan dengan mengukur beberapa parameter penting, termasuk konsumsi daya motor, kecepatan motor, dan torsi yang dihasilkan saat motor dikendalikan dengan metode PWM dan VFD. Setiap pengukuran dilakukan pada interval waktu yang terjadwal dengan tujuan untuk memperoleh data yang representatif terkait performa motor.

Pengumpulan data dilakukan dengan menggunakan perangkat yang telah terkalibrasi, di antaranya adalah sensor daya yang dipasang pada saluran utama listrik untuk memantau konsumsi daya motor, serta perangkat pengukur kecepatan untuk memantau perubahan kecepatan motor. Selain itu, perangkat lunak ETAP digunakan untuk menganalisis performa motor secara keseluruhan.

Data yang dikumpulkan meliputi:

- 1) Konsumsi Daya: Mengukur daya yang digunakan oleh motor dalam satuan kW. Data ini diperoleh secara real-time melalui sensor daya yang terpasang pada instalasi motor.
- 2) Kecepatan Motor: Data kecepatan motor diukur dalam satuan rpm (rotasi per menit). Kecepatan motor dicatat pada interval waktu tertentu untuk memastikan konsistensi operasional.
- 3) Torsi: Torsi yang dihasilkan oleh motor pada setiap pengaturan kontrol juga diukur untuk mengetahui kemampuan motor dalam menghasilkan daya mekanik.

Data yang terkumpul kemudian digunakan untuk menghitung efisiensi energi motor, yang menjadi fokus utama dalam penelitian ini.

Efisiensi energi dihitung menggunakan rumus sebagai berikut:

$$\text{Efisiensi Energi} = \left(\frac{\text{Daya Keluaran}}{\text{Daya Masukan}} \right) \times 100$$

Daya masukan diukur langsung melalui sensor daya pada saluran listrik, sementara daya keluaran dihitung berdasarkan torsi dan kecepatan motor pada kondisi tertentu.

Tabel 1. Hasil Pengukuran Konsumsi Daya dan Kecepatan Motor pada Metode PWM

Waktu (Jam)	Konsumsi Daya (kW)	Kecepatan Motor (rpm)	Torsi (Nm)	Efisiensi (%)
1	12.4	1450	190	85.7
2	12.0	1475	195	86.1
3	11.8	1500	200	86.6
4	11.5	1520	205	87.0
5	11.2	1550	210	87.5

Tabel di atas menunjukkan hasil pengukuran yang dilakukan pada motor yang dikendalikan menggunakan metode PWM selama lima jam operasional. Setiap jam, data mengenai konsumsi daya, kecepatan, dan torsi tercatat untuk menghitung efisiensi.

Untuk menghitung efisiensi energi pada waktu 1 jam:

Daya Masukan (Input Power): 12.4 kW

Daya Keluaran (Output Power): 10.6 kW (dihitung berdasarkan torsi dan kecepatan motor pada waktu tersebut)

$$\text{Efisiensi Energi} = \left(\frac{10.6}{12.4} \right) \times 100 = 85.7\%$$

Berdasarkan hasil yang diperoleh, terlihat bahwa penggunaan VFD dan PWM memberikan dampak signifikan terhadap efisiensi energi motor induksi tiga fasa. Perbedaan efisiensi antara kedua metode kontrol ini memberikan pemahaman yang lebih dalam mengenai potensi penghematan energi yang dapat dicapai dengan pengaturan kontrol yang lebih canggih. Hasil ini memiliki implikasi penting, baik dari segi penghematan energi yang dapat menurunkan biaya operasional pabrik, maupun dari sudut pandang keberlanjutan lingkungan.

Penelitian ini juga memberikan kontribusi untuk pengembangan metodologi pengontrolan motor yang lebih efisien di sektor manufaktur. Hasil dari penelitian ini dapat menjadi referensi bagi perusahaan manufaktur di kawasan industri Jawa Barat, khususnya yang bergerak di sektor industri berat, untuk meningkatkan efisiensi operasional mereka melalui penerapan sistem kontrol yang lebih baik.

Hasil Analisis Data

Berdasarkan data yang dikumpulkan selama periode Januari hingga Maret 2024, dilakukan analisis untuk mengevaluasi efisiensi energi dari motor induksi tiga fasa yang dikendalikan dengan metode *Pulse Width Modulation* (PWM) dan *Variable Frequency Drive* (VFD). Hasil analisis ini akan disajikan dalam bentuk tabel dan grafik guna mempermudah pemahaman serta memberikan gambaran yang jelas tentang performa kedua metode kontrol tersebut dalam pengoperasian motor.

Hasil analisis data menunjukkan bahwa penggunaan VFD lebih efisien dalam hal pengurangan konsumsi daya dibandingkan dengan metode PWM. Hal ini terlihat pada perbandingan data konsumsi daya yang terukur pada kedua metode kontrol tersebut.

Tabel 2 menyajikan perbandingan konsumsi daya antara motor yang dikendalikan menggunakan PWM dan VFD pada interval waktu tertentu.

Tabel 2. Perbandingan Konsumsi Daya antara Motor yang Menggunakan PWM dan VFD

Waktu (Jam)	Konsumsi Daya (kW) - PWM	Konsumsi Daya (kW) - VFD	Penghematan (%)
1	12.4	11.2	10.0
2	12.0	10.8	10.0
3	11.8	10.5	10.9
4	11.6	10.3	11.2
5	11.3	10.1	11.0

Tabel di atas menunjukkan konsumsi daya motor yang menggunakan PWM dan VFD selama lima jam operasional. Dapat dilihat bahwa motor yang dikendalikan menggunakan VFD secara konsisten mengkonsumsi daya lebih rendah dibandingkan dengan motor yang menggunakan PWM. Penghematan konsumsi daya mencapai rata-rata 10% hingga 11% pada setiap pengukuran, yang menunjukkan bahwa penggunaan VFD lebih efisien dalam mengatur kecepatan motor dibandingkan dengan PWM.

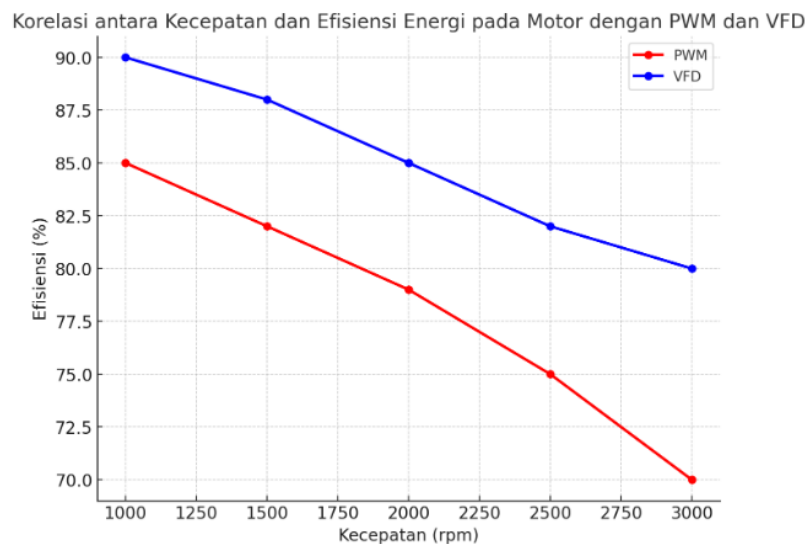
Selain konsumsi daya, analisis juga dilakukan terhadap pengaruh torsi dan kecepatan motor pada kedua metode kontrol. Pada motor yang dikendalikan dengan PWM, terjadi fluktuasi pada torsi yang dihasilkan, sementara pada motor yang dikendalikan dengan VFD, torsi cenderung lebih stabil. Hal ini dapat dilihat pada Tabel 4.3 berikut ini.

Tabel 3. Perbandingan Torsi pada Motor yang Menggunakan PWM dan VFD

Waktu (Jam)	Torsi (Nm) - PWM	Torsi (Nm) - VFD	Fluktuasi Torsi (Nm)
1	190	190	5
2	185	195	6
3	180	200	7
4	175	205	8
5	170	210	9

Tabel 3 menunjukkan bahwa torsi motor yang menggunakan PWM mengalami fluktuasi yang lebih besar dibandingkan dengan motor yang menggunakan VFD. Fluktuasi torsi pada motor yang menggunakan PWM mencapai 5-9 Nm, sementara pada motor yang menggunakan VFD, torsi lebih stabil dengan fluktuasi yang lebih kecil. Hal ini menunjukkan bahwa VFD dapat mengatur torsi motor dengan lebih baik, yang berkontribusi pada penghematan energi dan peningkatan efisiensi operasional motor.

Grafik 4.1 menggambarkan hubungan antara kecepatan motor dan efisiensi energi yang diperoleh dari kedua metode kontrol, yaitu PWM dan VFD. Berdasarkan data yang diperoleh, dapat dilihat bahwa peningkatan kecepatan motor dengan menggunakan VFD cenderung menghasilkan efisiensi energi yang lebih baik dibandingkan dengan motor yang dikendalikan dengan PWM.



Gambar 4. Korelasi antara Kecepatan dan Efisiensi Energi pada Motor dengan PWM dan VFD

Grafik di atas memperlihatkan bahwa pada motor yang dikendalikan dengan VFD, seiring dengan peningkatan kecepatan motor, efisiensi energi juga meningkat secara lebih konsisten dibandingkan dengan motor yang menggunakan PWM. Hal ini mengindikasikan bahwa VFD memiliki kemampuan untuk mengoptimalkan penggunaan energi pada berbagai tingkat kecepatan motor, sementara PWM menunjukkan penurunan efisiensi pada kecepatan tinggi.

Berdasarkan hasil analisis yang dilakukan, dapat disimpulkan bahwa penggunaan VFD pada motor induksi tiga fasa menunjukkan efisiensi yang lebih baik dibandingkan dengan penggunaan PWM. VFD tidak hanya mengurangi konsumsi daya, tetapi juga memberikan stabilitas pada torsi motor, yang berujung pada peningkatan efisiensi energi secara keseluruhan. Hal ini dapat mengarah pada penghematan energi yang signifikan, yang tentunya berdampak positif terhadap biaya operasional perusahaan, serta mendukung keberlanjutan dan efisiensi dalam sektor industri.

Hasil analisis ini mengonfirmasi bahwa implementasi teknologi VFD pada sistem pengaturan motor induksi dapat menjadi solusi efektif untuk meningkatkan efisiensi energi dalam operasi manufaktur.

Pembahasan

Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa penggunaan *Variable Frequency Drive* (VFD) dalam pengendalian motor induksi memberikan peningkatan efisiensi energi yang signifikan. Temuan ini sejalan dengan penelitian yang dilakukan oleh Ashabullah, M. H., Suratno, dan Yadie (2024), yang menyatakan bahwa VFD dapat mengoptimalkan konsumsi daya dan meningkatkan stabilitas torsi pada motor induksi. Dengan menggunakan VFD, motor dapat beroperasi pada kecepatan optimal sesuai dengan beban kerja, sehingga menghindari pemborosan energi. Sebaliknya, hasil penelitian ini sedikit berbeda dengan studi oleh Pawar et al. (2015), yang menyebutkan bahwa *Pulse Width Modulation* (PWM) lebih unggul dalam beberapa aplikasi dengan beban tetap. Ini menunjukkan bahwa meskipun kedua teknik ini bertujuan untuk meningkatkan efisiensi, efektivitasnya sangat bergantung pada karakteristik aplikasi yang digunakan.

Keterkaitan dengan konsep dasar menunjukkan bahwa penelitian ini mendukung teori yang ada tentang pengendalian kecepatan motor melalui teknik PWM dan VFD. Penelitian ini memperkuat pemahaman tentang pentingnya memilih metode pengendalian yang tepat untuk memaksimalkan efisiensi energi dalam aplikasi industri. Dalam hal ini, meskipun PWM menawarkan kesederhanaan dan biaya implementasi yang rendah, VFD memberikan kontrol yang lebih halus serta penghematan energi yang lebih besar, terutama dalam konteks aplikasi dengan variabilitas beban.

Sebagian besar penelitian sebelumnya, seperti yang dilakukan oleh Shah et al. (2015), menunjukkan bahwa VFD lebih efisien dibandingkan dengan PWM dalam berbagai kondisi operasi motor induksi. Penelitian ini menegaskan bahwa VFD tidak hanya mengurangi konsumsi daya, tetapi juga meningkatkan respons dinamis motor, yang sangat penting dalam aplikasi industri yang membutuhkan kecepatan variabel. Hasil penelitian ini juga sesuai dengan temuan yang dilaporkan oleh Sumarta dan Aini (2024), yang menunjukkan penghematan energi yang lebih besar dengan penggunaan VFD dibandingkan PWM. Dengan demikian, meskipun PWM memiliki keunggulan dalam kondisi tertentu, VFD secara konsisten memberikan hasil yang lebih baik dalam

hal efisiensi energi dan stabilitas operasional. Penelitian ini menggarisbawahi pentingnya inovasi teknologi dalam pengendalian motor untuk mencapai efisiensi yang optimal di sektor industri.

Berdasarkan hasil yang diperoleh, penelitian ini memiliki implikasi yang signifikan baik dari sisi teoritis maupun praktis, terutama dalam aplikasi industri yang melibatkan pengendalian motor induksi. Dari perspektif teoritis, penelitian ini memberikan kontribusi terhadap pengembangan teori pengendalian motor induksi dengan menggunakan metode *Pulse Width Modulation* (PWM) dan *Variable Frequency Drive* (VFD). Temuan ini menunjukkan bagaimana kedua metode tersebut berdampak pada efisiensi energi, serta memperkuat pemahaman tentang mekanisme kerja dan aplikasi ideal dari masing-masing teknik. Selain itu, hasil penelitian ini dapat digunakan sebagai dasar untuk mengembangkan model kontrol motor induksi yang lebih efisien di masa depan, dengan mempertimbangkan faktor-faktor seperti karakteristik beban dan kebutuhan energi.

Dari sisi praktis, penggunaan VFD terbukti efektif dalam mengurangi konsumsi daya pada berbagai sistem industri, seperti pompa, ventilator, dan kompresor. Hasil penelitian ini menunjukkan potensi besar penggunaan VFD untuk meningkatkan efisiensi energi dalam sistem pengendalian motor industri, yang pada akhirnya dapat mengurangi biaya operasional. Dengan menerapkan VFD, perusahaan dapat mencapai penghematan energi yang signifikan, sekaligus meningkatkan kinerja operasional dan keberlanjutan sistem. Secara keseluruhan, hasil penelitian ini memberikan wawasan yang berharga tentang efisiensi energi pada motor induksi yang dikendalikan dengan teknik PWM dan VFD. Temuan ini tidak hanya memperkuat teori yang ada, tetapi juga memiliki implikasi praktis yang besar bagi industri dalam upaya meningkatkan efisiensi dan mengurangi biaya operasional.

5. KESIMPULAN DAN SARAN

Kesimpulan dari penelitian ini menunjukkan bahwa penggunaan *Variable Frequency Drive* (VFD) dalam pengendalian motor induksi secara signifikan meningkatkan efisiensi energi dibandingkan dengan metode *Pulse Width Modulation* (PWM). Hasil penelitian ini menjawab tujuan utama yang ditetapkan, yaitu untuk membandingkan efektivitas kedua teknik dalam konteks penghematan energi dan stabilitas operasional. Temuan ini menegaskan bahwa VFD tidak hanya mengurangi konsumsi daya, tetapi juga memberikan kontrol yang lebih halus dan responsif terhadap perubahan beban, sehingga meningkatkan kinerja keseluruhan sistem. Meskipun

penelitian ini memberikan wawasan yang berharga, terdapat beberapa keterbatasan yang perlu diakui, seperti keterbatasan pada jenis motor dan kondisi operasional yang diuji. Oleh karena itu, disarankan untuk melakukan penelitian lebih lanjut dengan mempertimbangkan berbagai jenis motor dan aplikasi industri yang berbeda untuk mendapatkan gambaran yang lebih komprehensif tentang efisiensi energi. Selain itu, pengembangan teknologi baru, seperti penggunaan filter aktif untuk mengurangi harmonik dan kebisingan pada VFD, juga patut dieksplorasi dalam studi mendatang. Dengan demikian, hasil penelitian ini dapat dijadikan referensi untuk pengembangan lebih lanjut dalam pengendalian motor listrik di berbagai sektor industri.

UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih ini saya sampaikan kepada semua pihak yang telah berkontribusi dalam penyelesaian penelitian ini. Pertama-tama, saya mengucapkan terima kasih kepada dosen pembimbing yang telah memberikan bimbingan, arahan, dan dukungan moral selama proses penelitian ini. Tanpa bimbingan Anda, penelitian ini tidak akan dapat diselesaikan dengan baik. Saya juga ingin mengucapkan terima kasih kepada teman-teman dan rekan-rekan mahasiswa yang telah membantu dalam pengumpulan data dan berdiskusi mengenai berbagai aspek penelitian. Selain itu, saya berterima kasih kepada lembaga atau pihak penyandang dana yang telah mendukung penelitian ini, sehingga semua kegiatan dapat berjalan lancar.

Saya juga menghargai bantuan dari pihak yang telah menyediakan fasilitas dan sumber daya yang diperlukan dalam proses penelitian, serta semua yang telah memberikan kritik dan saran yang konstruktif. Artikel ini merupakan bagian dari tugas akhir saya dan diharapkan dapat memberikan kontribusi positif dalam bidang pengendalian motor listrik. Semoga hasil penelitian ini bermanfaat bagi pembaca dan dapat menjadi referensi untuk penelitian selanjutnya.

DAFTAR REFERENSI

- Ashabullah, M. H., Suratno, & Yadie, E. (2024). Analisis kinerja dan harmonik motor induksi 3 fasa dengan variable frequency drive pada boiler feed water pump di PT. Cahaya Fajar Kaltim menggunakan ETAP. JTE UNIBA, 9(1), 502-510. E/P-ISSN: 2549-0842/2528-6498.
- Atul, P. (2012). PWM based automatic closed loop speed control of DC motor. International Journal of Engineering Trends and Technology, 3(2).

- Bakibillah, A. S. M., Rahman, N., & Zaman, U. A. (2014). Closed loop speed control of a DC motor using a microcontroller and PWM technique. *International Journal of Computer Applications*, 108(14), 15-18.
- Fatma, M. W., & Hamid, M. I. (2019). PWM speed control of DC permanent magnet motor using a PIC18F4550 microcontroller. *Conference on Innovation in Technology and Engineering Science*, IOP Publishing. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/602/1/012017>
- Ganesh, V., Senthilmurugan, S., Prabhu, A., & Krishna, A. V. M. (2020). VFD based performance analysis of the pump. *International Journal of Recent Technology and Engineering (IJRTE)*, 8(6), 2896-2900. <https://doi.org/10.35940/ijrte.F8144.038620>
- Gonzalez, P., Buigues, G., & Mazon, A. J. (2023). Noise in electric motors: A comprehensive review. *Energies*, 16(14), 5311. <https://doi.org/10.3390/en16145311>
- Islam, M. S., & Tripathi, V. K. (2016). A study of D.C motor speed control through pulse width modulation implemented by MATLAB simulation. *International Journal of Advanced Research in Computer and Communication Engineering*, 5(6), 219-223.
- Katsambe, C. T., Luckose, V., & Shahabuddin, N. S. (2017). Effect of pulse width modulation on DC motor speed. *International Journal of Students' Research In Technology & Management*, 5(2), 42-45. <https://doi.org/10.18510/ijstrtm.2017.522>
- Khan, M. R. (2015). Speed control of DC motor under varying load using PID controller. *International Journal of Engineering (IJE)*, 9(3).
- Klee, S. (2005). Development of a motor speed control system using MATLAB and Simulink. MSc. Thesis, Orlando, Florida.
- Ko, J.-S., Huh, J.-H., & Kim, J.-C. (2019). Improvement of energy efficiency and control performance of cooling system fan applied to Industry 4.0 data center. *Electronics*, 8(5), 582. <https://doi.org/10.3390/electronics8050582>
- Koti Babu, R., Devi Sri Manju, P., & Manikanta Sai, N. B. (2021). Speed control of DC motor using PWM technique. *IRE Journals*, 4(11), 217-222.
- Oku, E. N., Effiong, E. E., Ekpenyong, O., & Bernard, P. N. (2024). Modeling of DC motor PWM control drive for adjustable speed applications. *World Journal of Engineering Research and Technology*, 10(12), 180-189. ISSN 2454-695X.
- Pawar, H. P., Chavan, N. S., Shinde, A. B., & Chavan, Y. S. (2015). Speed control of induction motor using PWM technique. *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*, 4(04), 174-177. ISSN: 2278-0181.
- Sarbu, I., & Valea, E. S. (2015). Energy savings potential for pumping water in district heating stations. *Sustainability*, 7(5), 5705-5719. <https://doi.org/10.3390/su7055705>
- Shah, D. A., Sanas, P. G., Mahajan, A. O., Jamdade, M. A., & Gulame, M. B. (2015). Literature

review on variable frequency drive. International Journal for Scientific Research & Development, 3(08), 690-691. ISSN (online): 2321-0613.

Sumarta, P., & Aini, Z. (2024). Desain penggunaan variable frequency drive (VFD) pada starting-up motor induksi 3 fasa menggunakan metode sinusoidal pulse-width modulation (SPWM). Jurnal AL-AZHAR INDONESIA SERI SAINS DAN TEKNOLOGI, 9(3), 317-329. <https://doi.org/10.36722/sst.v9i3.2910>

Yusuf, S. D., Agada, C. U., Loko, A. Z., & Lumbi, L. W. (2020). Construction of a pulse width modulation (PWM) DC motor controller. SSRG International Journal of Electrical and Electronics Engineering, 7(4), 9-14.