Jurnal Teknik Indonesia

Volume 5 Nomor 3 September 2026

https://jti.publicascientificsolution.com/index.php/rp

Optimasi Efisiensi Motor Induksi 3 Fasha melalui Pemodelan dan Simulasi Berbasis Matlab

Sutria*, Muhamad Riyad Ariwibowo

Universitas Swadaya Gunung Jati, Indonesia

Email: sutria.122220018@ugj.ac.id*, riyad_ariwibowo@ugj.ac.id

Keywords:

Induction Motor; MATLAB; Optimization; Efficiency; Overvoltage; VFD.

Abstract

Three-phase induction motors are widely applied in industrial sectors due to their simple construction, high reliability, and robust operational capability. However, variations in voltage, frequency, and mechanical loading conditions can affect motor efficiency due to increased energy losses. This study aimed to model and optimize the efficiency of a three-phase induction motor using a Variable Frequency Drive (VFD) and Pulse Width Modulation (PWM)-based control system through MATLAB/Simulink, while determining the optimal operating parameters to improve motor performance. The research method employed a simulation approach using a 7.5 kW three-phase Asynchronous Machine model with voltage variations of 380 V and 400 V, frequency variations of 50 Hz and 60 Hz, and different mechanical load conditions. Optimization was performed by adjusting internal motor parameters, including stator resistance (Rs), rotor resistance (Rr), stator leakage inductance (Lls), and rotor leakage inductance (Llr). The simulation results indicated that internal parameter optimization improved motor efficiency compared with the default MATLAB parameters. The highest efficiency was achieved at 380 V supply voltage, 60 Hz frequency, and 20 N.m load condition, reaching 82.35%. Meanwhile, the 400 V overvoltage condition reduced efficiency due to increased core losses. This study concludes that VFD-PWM implementation combined with internal parameter optimization provides an effective approach for improving energy efficiency and operational performance of three-phase induction motors.

Kata Kunci:

Motor Induksi; MATLAB; Optimasi; Efisiensi; Tegangan Berlebih; VFD

Abstrak

Motor induksi tiga fasa banyak digunakan pada sektor industri karena memiliki konstruksi sederhana, keandalan tinggi, dan kemampuan operasi yang baik. Namun, perubahan kondisi tegangan, frekuensi, dan pembebanan dapat memengaruhi efisiensi kerja motor akibat meningkatnya rugi-rugi daya. Penelitian ini bertujuan untuk memodelkan dan mengoptimalkan efisiensi motor induksi tiga fasa berbasis *Variable Frequency Drive* (VFD) dan *Pulse Width Modulation* (PWM) menggunakan MATLAB/Simulink, serta menentukan kombinasi parameter operasi terbaik untuk meningkatkan kinerja motor. Metode penelitian dilakukan melalui simulasi model Asynchronous Machine tiga fasa berkapasitas 7,5 kW dengan variasi tegangan 380 V dan 400 V, frekuensi 50 Hz dan 60 Hz, serta variasi beban mekanis. Optimasi dilakukan melalui penyesuaian parameter internal motor berupa *resistansi stator* (Rs), *resistansi rotor* (Rr), dan induktansi bocor stator serta rotor (Lls dan Llr). Hasil simulasi

menunjukkan bahwa optimasi parameter internal mampu meningkatkan efisiensi motor dibandingkan parameter standar MATLAB. Efisiensi tertinggi diperoleh pada kondisi tegangan 380 V, frekuensi 60 Hz, dan beban 20 N.m dengan nilai sebesar 82,35%. Sebaliknya, kondisi tegangan berlebih 400 V menyebabkan penurunan efisiensi akibat peningkatan rugi-rugi inti. Penelitian ini menyimpulkan bahwa pengaturan VFD-PWM dan optimasi parameter internal dapat menjadi strategi efektif dalam meningkatkan efisiensi energi motor induksi tiga fasa.

PENDAHULUAN

Motor induksi adalah satu jenis motor listrik yang bekerja dengan prinsip elektromagnetik. Di dunia industri yang umum digunakan adalah motor induksi tiga fasa, beberapa pemanfaatannya digunakan sebagai penggerak blower, kompresor, pompa, proses produksi, dan lainnya. Motor jenis ini banyak digunakan di industri karena perawatannya yang mudah dengan desain yang simple, efisiensi yang tinggi serta memiliki keandalan yang baik dan mempunyai kelebihan yang mampu menggerakkan konstruksi yang kuat (Muratno, 2020). Namun, disamping kelebihan motor induksi ini juga memiliki kelemahan yang perlu diperhatikan yaitu sulitnya mengatur kecepatan karena karakteristik motor yang bersifat linear. Adapun cara untuk mengantisipasi kelemahan dari motor induksi ini dengan penambahan alat, salah satunya dengan *Variable Frequency Drive* (VFD) yang berfungsi untuk mengatur kecepatan motor induksi yang sistem kerjanya juga dikendalikan dengan *Pulse Width Modulation* (PWM), yaitu mengubah frekuensi dan tegangan melalui VFD maka tegangan motor juga akan berubah, sehingga hubungan antara frekuensi dan tegangan itu berbanding lurus dengan kecepatan dan efisiensi motor (Diantoro et al., 2024).

Variable Frequency Drive (VFD) merupakan suatu perangkat yang terdiri dari rangkaian penyearah (*rectifier*), filter, inverter, serta panel kontrol yang berfungsi untuk mengatur nilai keluaran. Parameter utama yang dapat dikendalikan oleh VFD adalah frekuensi tegangan output yang disalurkan ke motor induksi. Sistem pengaturan kecepatan motor induksi menggunakan VFD pada dasarnya serupa dengan penggunaan inverter, karena tegangan keluaran VFD dihasilkan dalam bentuk sinyal *Pulse Width Modulation* (PWM) yang dibangkitkan oleh bagian inverter di dalamnya. Keunggulan inverter PWM dibandingkan jenis inverter lain adalah kemampuannya menghasilkan distorsi harmonik yang lebih rendah pada tegangan keluaran. Selain itu, teknologi PWM lebih praktis dan ekonomis untuk digunakan, terutama dengan perkembangan komponen semikonduktor yang memiliki kecepatan *switching* tinggi (Sufrianti, n.d.). Dalam pengaturan kecepatan motor induksi, metode PWM mampu menghasilkan putaran motor yang lebih halus dengan rentang pengaturan yang luas (Pambudi et al., 2026).

Efisiensi motor induksi merupakan ukuran yang menunjukkan seberapa besar kemampuan motor dalam mengubah energi listrik yang diserap dari sumber menjadi energi mekanik pada poros motor secara efektif, dengan memperhitungkan seluruh rugi-rugi daya yang terjadi selama proses konversi energi (Prabowo et al., 2019). Efisiensi ini dihitung berdasarkan perbandingan antara daya keluaran mekanik terhadap daya masukan

listrik yang digunakan motor dalam kondisi operasi tertentu. Kondisi tegangan suplai memiliki pengaruh yang signifikan terhadap performa dan efisiensi motor induksi tiga fasa, di mana pada kondisi *under voltage* motor cenderung menarik arus lebih besar untuk mempertahankan torsi, sehingga menyebabkan peningkatan rugi-rugi tembaga pada stator dan rotor (Saputra et al., 2026). Sebaliknya, pada kondisi *over voltage* juga terjadi peningkatan rugi-rugi inti besi dan pemanasan berlebih yang berdampak pada penurunan efisiensi motor (Teguh & Zambak, 2022). Penelitian ini difokuskan pada pemodelan dan simulasi mesin listrik menggunakan *software* MATLAB dengan objek utama *Asynchronous Machine* tiga fasa guna menentukan parameter atau kondisi operasi optimal yang menghasilkan efisiensi tertinggi.

Sejumlah penelitian terdahulu telah membahas penggunaan pemodelan dan sistem kendali untuk memperbaiki kinerja motor induksi. Suda et al. (2022) mengembangkan model kendali motor induksi tiga fasa melalui metode Direct Torque Control berbasis neuro-fuzzy dan menunjukkan bahwa MATLAB/Simulink dapat digunakan untuk menganalisis respons dinamis kecepatan dan torsi. Harahap et al. (2023) juga memodelkan pengendalian kecepatan motor induksi dengan matrix converter berbasis vector control, sedangkan Andriami et al. (2023) menerapkan Field-Oriented Control dengan pengendali PI untuk memperoleh respons kecepatan yang lebih stabil. Penelitian-penelitian tersebut memperlihatkan bahwa pendekatan simulasi mampu merepresentasikan hubungan antara sistem kendali, karakteristik listrik, dan respons mekanis motor. Namun, orientasi kajiannya lebih banyak diarahkan pada kestabilan kecepatan dan kualitas respons kendali daripada optimasi efisiensi berdasarkan perubahan parameter internal motor.

Dalam konteks efisiensi, Susilo et al. (2023) menganalisis motor induksi tiga fasa hasil rewinding melalui pemodelan finite element, sedangkan Barus et al. (2024) mengkaji efisiensi daya motor induksi berkapasitas 150 kW dengan inverter sebagai pengatur kecepatan. Diantoro et al. (2024) secara lebih spesifik menggunakan MATLAB/Simulink untuk menguji pengaruh perubahan tegangan dan frekuensi terhadap kecepatan, slip, dan efisiensi motor induksi tiga fasa. Penelitian tersebut menemukan bahwa perubahan frekuensi berpengaruh terhadap kecepatan, slip, dan efisiensi, dengan efisiensi tertinggi diperoleh sebesar 97% pada frekuensi 50 Hz dan beban torsi 5 N.m. Temuan tersebut menegaskan pentingnya pengaturan frekuensi dan pembebanan, tetapi belum memberikan penjelasan yang memadai mengenai pengaruh simultan tegangan nominal dan overvoltage, frekuensi, beban dinamis, serta perubahan resistansi dan induktansi bocor terhadap rugi-rugi motor.

Perkembangan penelitian mutakhir menunjukkan bahwa optimasi efisiensi motor induksi tidak cukup dilakukan hanya melalui pengaturan kecepatan. Identifikasi resistansi stator, resistansi rotor, dan induktansi bocor diperlukan karena ketepatan parameter tersebut menentukan akurasi model serta kinerja sistem penggerak. Penelitian mengenai estimasi parameter motor asinkron oleh Youness et al. (2023), misalnya, membandingkan metode Trust Region dan Pattern Search untuk mengidentifikasi parameter motor secara optimal, sedangkan kajian optimasi rugi-rugi berbasis model menunjukkan bahwa

pengendalian fluks dan torsi dapat digunakan untuk menekan rugi-rugi serta memperbaiki efisiensi pada berbagai kondisi beban. Meskipun demikian, pendekatan-pendekatan tersebut cenderung menggunakan algoritma kendali atau optimasi yang relatif kompleks dan belum secara khusus membandingkan pengaruh optimasi parameter internal pada motor induksi 7,5 kW dalam kombinasi tegangan 380 V dan 400 V, frekuensi 50 Hz dan 60 Hz, serta beberapa variasi beban mekanis.

Kesenjangan tersebut menunjukkan perlunya penelitian yang mengintegrasikan pengaturan VFD-PWM dengan optimasi parameter internal motor dalam satu model simulasi yang terukur. Perbandingan antara tegangan nominal dan kondisi overvoltage penting dilakukan karena peningkatan tegangan tidak selalu menghasilkan peningkatan kinerja. Tegangan yang terlalu tinggi dapat meningkatkan fluks magnetik hingga mendekati kondisi saturasi, memperbesar rugi-rugi inti, dan menaikkan temperatur motor, terutama ketika motor bekerja pada frekuensi dan beban tinggi. Di sisi lain, perubahan resistansi stator, resistansi rotor, serta induktansi bocor dapat mengubah distribusi rugi-rugi dan titik efisiensi motor. Dengan demikian, penelitian yang mengevaluasi interaksi tegangan, frekuensi, pembebanan, dan parameter internal diperlukan untuk menentukan kondisi operasi yang tidak hanya menghasilkan kecepatan sesuai kebutuhan, tetapi juga mempertahankan efisiensi energi.

Kebaruan penelitian ini terletak pada pengembangan model motor induksi tiga fasa tipe sangkar tupai berkapasitas 7,5 kW pada MATLAB/Simulink yang menggabungkan VFD, inverter PWM, variasi beban konstan dan step load, serta optimasi resistansi stator, resistansi rotor, induktansi bocor stator, dan induktansi bocor rotor. Berbeda dari penelitian terdahulu yang umumnya hanya mengevaluasi perubahan tegangan dan frekuensi atau berfokus pada respons sistem kendali, penelitian ini membandingkan secara simultan kondisi suplai 380 V dan overvoltage 400 V pada frekuensi 50 Hz dan 60 Hz. Analisis tersebut digunakan untuk mengidentifikasi pergeseran titik efisiensi tertinggi sekaligus menjelaskan konsekuensi kondisi overvoltage terhadap rugi-rugi motor ketika pembebanan mekanis meningkat.

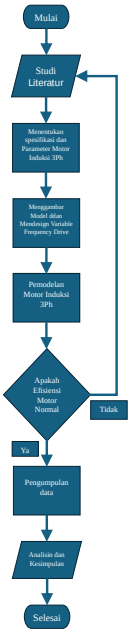
Berdasarkan uraian tersebut, penelitian ini bertujuan memodelkan dan menyimulasikan motor induksi tiga fasa berbasis VFD-PWM, menganalisis pengaruh variasi tegangan, frekuensi, dan beban terhadap karakteristik operasinya, serta menentukan kombinasi parameter internal yang menghasilkan efisiensi terbaik. Secara teoretis, penelitian ini diharapkan memperkaya kajian mengenai hubungan antara parameter rangkaian ekuivalen, kondisi suplai, pembebanan, dan efisiensi motor induksi. Secara praktis, hasilnya dapat menjadi dasar dalam menentukan pengaturan tegangan dan frekuensi yang lebih tepat, menghindari pengoperasian overvoltage yang merugikan, serta mendukung penerapan strategi penghematan energi pada sistem penggerak motor industri. Model yang dihasilkan juga dapat digunakan sebagai sarana evaluasi awal sebelum pengujian eksperimental sehingga proses perancangan sistem menjadi lebih aman, efisien, dan ekonomis.

METODE PENELITIAN

Metode penelitian ini menggunakan pendekatan simulasi berbasis perangkat lunak MATLAB untuk menganalisis dan mengoptimalkan kinerja motor induksi tiga fasa (Harahap et al., 2023). Penggunaan *Variable Frequency Drive* (VFD) atau inverter pada motor induksi diimplementasikan untuk memungkinkan pengaturan frekuensi dan tegangan, sehingga dapat berpengaruh secara langsung terhadap nilai efisiensi, arus, dan kecepatan motor (Susilo et al., 2023). Pengaturan kecepatan berbasis inverter ini ditujukan untuk meningkatkan efisiensi energi agar motor dapat bekerja sesuai dengan kebutuhan beban tanpa adanya pemborosan daya (Barus et al., 2024).

Tahapan dalam penelitian ini diawali dengan studi literatur mengenai karakteristik motor induksi, efisiensi energi, inverter *Pulse Width Modulation* (PWM), serta pemodelan sistem berbasis MATLAB. Selanjutnya, dilakukan pengumpulan data parameter motor asli seperti daya nominal, tegangan, frekuensi, resistansi stator dan rotor, induktansi, torsi, slip, dan kecepatan rotor yang digunakan sebagai landasan dalam pembuatan model simulasi. Proses pemodelan disusun menggunakan blok didalam MATLAB yang terdiri atas komponen sumber tegangan tiga fasa, inverter PWM, motor induksi, sistem kontrol, serta beban mekanik, sehingga karakteristik dinamis motor dapat diamati secara visual melalui grafik arus, tegangan, torsi, dan kecepatan rotor (SUDA et al., 2022).

Tahap berikutnya adalah melaksanakan proses simulasi secara berulang dengan memvariasikan parameter operasi meliputi variasi tegangan, frekuensi, serta beban mekanik motor induksi . Pengujian variasi parameter ini ditujukan untuk mengamati pengaruhnya secara mendalam terhadap tingkat efisiensi dan performa motor induksi (Aulia et al., 2017). Data yang dikumpulkan dari hasil simulasi ini meliputi parameter efisiensi motor, arus stator, torsi elektromagnetik, dan kecepatan rotor. Tahap akhir dari penelitian ini adalah melakukan analisis untuk menentukan kombinasi frekuensi dan tegangan optimal yang mampu menghasilkan nilai efisiensi terbaik pada motor induksi tiga fasa. Alur penelitian atau metode yang dilakukan adalah dengan melakukan studi literatur dan pemodelan pada MATLAB, dapat dilihat pada Gambar 1 dibawah ini.



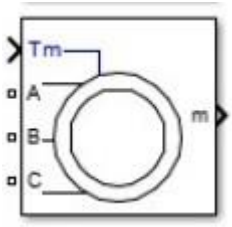
Gambar 1. Diagram Alur Penelitian

Objek atau Subjek Penelitian

Objek utama dalam penelitian ini menggunakan sebuah motor induksi tiga fasa tipe sangkar tupai (*squirrel cage*) yang diintegrasikan dari komponen *library* MATLAB. Model mesin listrik spesifik yang dijadikan sebagai acuan objek simulasi adalah jenis *Asynchronous Machine* dengan spesifikasi rating daya sebesar 7,5 kW, tegangan nominal 380 V (10 HP), frekuensi nominal 50 Hz, dan kecepatan nominal 1440 rpm. Dalam jalannya simulasi, objek motor induksi ini diberikan beban torsi mekanik (T_m) yang divariasikan secara bertahap mulai dari beban konstan awal 10 N.m, 15 N.m, hingga 20 N.m, serta dikombinasikan dengan pemberian perubahan step beban dinamis. Guna melakukan pengaturan nilai frekuensi dan parameter tegangan masukan motor, sistem memanfaatkan rangkaian VFD yang terdiri dari blok penyearah (*rectifier*), filter, rangkaian inverter, serta modul pengendali PWM digital. Dari hasil simulasi tersebut, perilaku dinamis kerja motor yang meliputi besaran arus dan tegangan yang mengalir, kecepatan putar, slip, torsi elektromagnetik, hingga persentase tingkat efisiensinya akan direkam dan dianalisis secara mendalam (Sri Muntiah Andriami et al., 2023), (Suda et al., 2021).

Pemodelan Sistematis

Pemodelan dalam penelitian ini menggunakan pemodelan dinamis dari motor induksi tiga fasa tipe sangkar dengan kondisi ketiga fasa pada rotor dihubung singkat. Model visual motor induksi tiga fasa pada perangkat lunak MATLAB dapat dilihat pada Gambar 2.

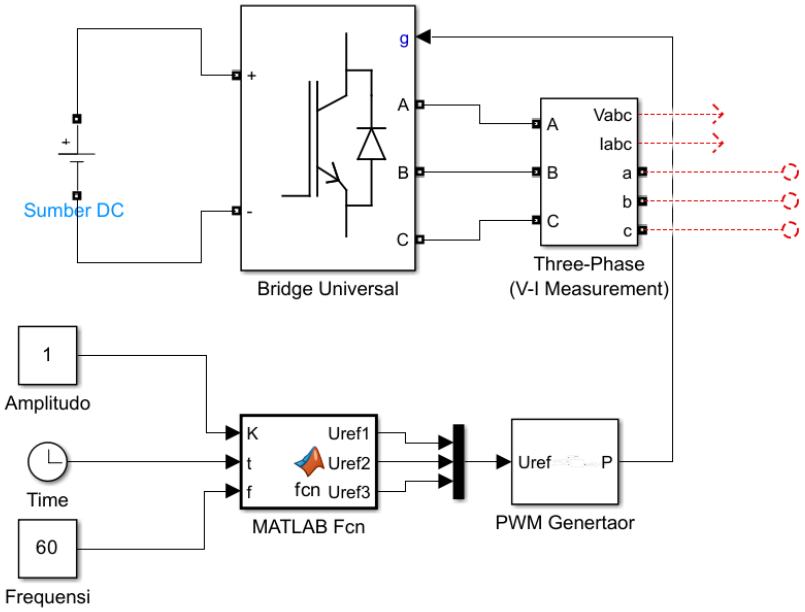


Gambar 2. Model Motor Induksi Pada MATLAB

Pada pemodelan blok motor induksi di dalam Simulink, parameter masukan mekanis yang disuplai disimbolkan sebagai torsi mekanik (T_m). Sementara untuk suplai energi listriknya, blok motor menerima masukan berupa tegangan tiga fasa yang direpresentasikan melalui simbol terminal A, B, dan C. Di sisi keluaran, terminal bertanda 'm' (*measurement*) dimanfaatkan untuk menyalurkan sinyal hasil pengukuran internal motor secara *real-time*, seperti parameter kecepatan sudut putaran motor (ωm), besarnya torsi elektromagnetik yang dibangkitkan (T_e), serta karakteristik arus pada sisi rotor maupun stator.

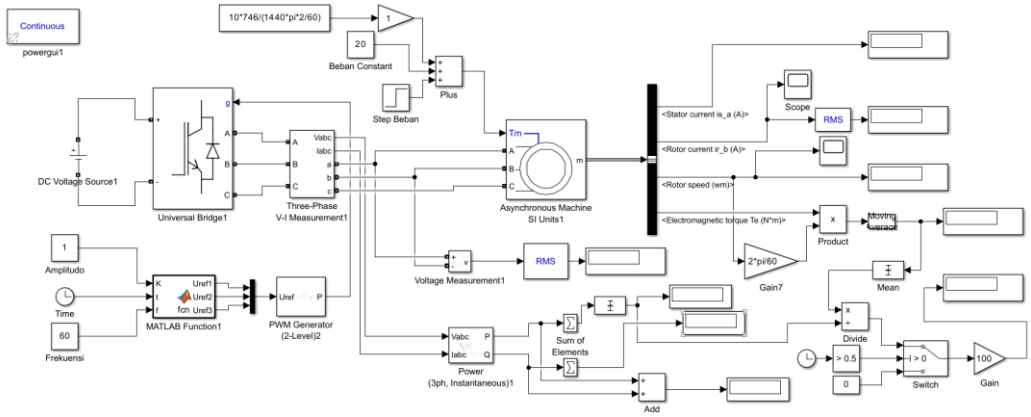
Rangkaian Sistem VFD dan Pengendai PWM

Rangkaian kontrol kecepatan dirancang untuk menjembatani kekurangan motor induksi konvensional yang sulit diatur kecepatannya. Rangkaian VFD dan PWM terintegrasi berfungsi mengontrol putaran motor dengan cara memanipulasi frekuensi dan tegangan suplai AC melalui pin keluaran (a, b, dan c) dari komponen *Three-Phase* (*V-I Measurement*) dan adapt dilihat pada Gambar 3 dibawah.



Gambar 3. Rangkaian VDF dan PWM

Struktur sistem simulasi ini dibagi ke dalam empat tahapan interkoneksi utama berdasarkan dari design dan pemodelan pada MATLAB dalam penelitian ini dapat di dilihat pada Gambar 4 dibawah ini.



Gambar 4. Design dan Pemodelan Simulasi MATLAB

1. **Pembangkitan Sinyal Kontrol (PWM Generator)**

   Proses diawali dengan menentukan parameter nilai amplitudo (K) dan frekuensi (f) sebagai acuan dasar simulasi. Parameter input amplitudo, waktu (t), dan frekuensi diproses oleh blok *MATLAB Function* untuk menghasilkan tiga sinyal gelombang sinus seimbang yang bergeser fasa sebesar 120 derajat (*Uref1*, *Uref2*, *Uref3*). Sinyal referensi tersebut diteruskan menuju blok PWM Generator (2-Level) untuk dikonversi menjadi pulsa digital penggerak gerbang pensaklaran (*firing pulses*) komponen semikonduktor.

2. **Konversi Daya (Inverter)**

   Sumber daya utama yang bersumber dari *DC Voltage Source* dialirkan ke blok Universal Bridge yang dikonfigurasi sebagai perangkat inverter 3-fasa berbasis komponen IGBT/Dioda. Inverter memicu pensaklaran berdasarkan pulsa PWM untuk mengubah tegangan DC menjadi tegangan AC 3-fasa variabel yang kemudian disalurkan langsung menuju terminal stator (A, B, C) motor induksi.

3. **Pembebanan Mekanis Motor**

   Motor induksi (*Asynchronous Machine SI Units*) menerima suplai daya listrik AC dari inverter. Pada bagian poros mekanisnya, parameter torsi input (T_m) yang masuk disimulasikan sebagai hasil penjumlahan matematika dari tiga komponen beban, yaitu blok konstanta perhitungan konversi daya ke torsi nominal, blok Beban Constant untuk beban mula saat motor pertama dihidupkan, serta blok Step Beban untuk menyimulasikan perubahan beban mekanis dinamis pada detik operasi tertentu.

4. **Komputasi Efisiensi Sistem**

   Data pengukuran tegangan dan arus dari terminal *Three-Phase V-I Measurement* disalurkan melalui pin V_{abc} dan Iabc menuju blok Power (*3ph, Instantaneous*) guna menghitung besaran daya masukan aktif (P_{in}). Di sisi mekanis, parameter kecepatan putar motor (ωm) dikalikan dengan torsi

elektromagnetik (T_e) melalui blok Product untuk menghasilkan parameter daya keluaran mekanis (P_{out}). Nilai rata-rata sinyal daya dihitung secara kontinu menggunakan blok Moving Average dan Mean. Untuk menghindari distorsi data akibat lonjakan arus mula saat *starting*, sistem kanan bawah menggunakan komparator waktu dan blok *Switch* yang memprogram perhitungan pembagian efisiensi baru aktif beroperasi setelah simulasi berjalan melewati waktu 1 detik saat kondisi motor telah mencapai kestabilan (*steady state*).

Untuk mengukur tingkat efisiensi motor induksi secara akurat dari data berbasis putaran mesin, parameter kecepatan sudut (ω) dihitung terlebih dahulu dengan mengonversi nilai putaran mekanis dari satun *Revolutions Per Minute* (RPM) melalui persamaan matematika berikut:

$$rad/s = RPM \times \frac{2\pi}{60} \quad (1)$$

Di mana (ω)melambangkan kecepatan sudut motor (*rad/s*), RPM adalah kecepatan putaran motor per menit, 2π menyatakan nilai radian dalam satu putaran penuh 360°, dan angka 60 adalah konstanta konversi waktu dari satuan menit ke detik. Setelah kecepatan sudut didapatkan, perhitungan nilai daya keluaran mekanik (P_{out}) pada poros motor dapat diselesaikan menggunakan rumus hubungan torsi:

$$\text{Pout} = \omega \times T \quad (2)$$

Di mana (P_{out}) menyatakan total daya keluaran motor (*Watt*) dan T menyatakan nilai torsi mekanik yang dihasilkan (N.m). Berdasarkan nilai parameter di atas, persentase nilai efisiensi motor induksi (η) secara matematis diperoleh melalui perbandingan fungsi:

$$\eta = \frac{Pout}{Pin} \times 100 \quad (3)$$

Di mana (η)melambangkan persentase efisiensi kerja mesin (%), sedangkan Pin melambangkan total daya masukan listrik (*Watt*) yang diserap oleh sistem dari sumber jala-jala.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada table 1 dibawah menunjukan parameter yang digunakan sebagai patokan awal simulasi dari standar motor induksi 3phase didalam MATLAB yang sudah sesuai dengan parameter pabrikannya, dengan sumber tegangan 7,5 kW (380V 10 HP 50 Hz 1440 Rpm) untuk memulai simulasi awal. Parameter tersebut digunakan untuk membangun model motor induksi pada penelitian ini.

Table 1. Parameter Internal Motor Induksi dalam MATLAB

Nama Parameter	Simbol	Nilai Input Simulink	Satuan
Resistansi Stator	R_s	0.370	Ohm (Ω)
Resistansi Rotor	R_r	0.325	Ohm (Ω)
Induktansi Bocor Stator	L_{ls}	0.0031	Henry (H)
Induktansi Bocor Rotor	L_{lr}	0.0031	Henry (H)
Induktansi Magnetisasi	L_m	0.114	Henry (H)

Sumber: MATLAB

Validasi keandalan model dilakukan melalui pengujian awal menggunakan beban konstan 10 Nm yang dikombinasikan dengan step beban hingga akumulasi total torsi pembebanan mencapai 75 Nm. Hasil pembacaan parameter kecepatan mekanis menunjukkan indikator operasional yang normal.

1. Pada frekuensi 50 Hz, rotor berputar dengan kecepatan sudut 147,6 rad/s atau setara dengan 1410 rpm.
2. Pada frekuensi 60 Hz, rotor berputar dengan kecepatan sudut 153,1 rad/s atau setara dengan 1463 rpm.

Setelah karakteristik model dinyatakan valid dan berada dalam batas operasional normal, tahapan riset dilanjutkan dengan proses optimasi parameter. Optimasi parameter bertujuan mencari nilai variabel hambatan serta induktansi bocor (R_s, R_r, Ll_s, Ll_r) yang paling ideal guna menekan persentase rugi-rugi tembaga (*copper losses*) dan rugi-rugi inti besi (*core losses*), sehingga dicapai nilai efisiensi konversi daya yang optimal.

Hasil Simulasi dan Optimasi

Berdasarkan simulasi yang telah dilakukan dengam design atau pemodelan yang telah dijelaskan pada point sebelumnya, diperoleh hasil optimasi parameter dari motor induksi 3phase agar menurunkan atau meminimalisir rugi-rugi motor induksi sehingga dapat meningkatkan efisiensinya. Pada table 2 dibawah adalah parameter motor induksi yang dipakai untuk pengujian awal.

Table 2. Parameter Motor Induksi

Nama Parameter	Nilai	Satuan
Sumber Tegangan	380 & 400	Volt (V)
Amplitudo	1	Volt (V)
Horse Power	10	Horse Power (HP)
Rpm	1440	rpm
Frekuensi	50-60	Hertz (Hz)
Step Beban	55, 60, 65	Newton Meter (N.m)
Beban Constant	10, 15, 20	Newton Meter (N.m)

Sumber: Penelitian 2026

Pada tabel di atas adalah parameter motor induksi dan nilai beban yang digunakan dalam penelitian ini. Pengujian dilakukan dengan variasi tegangan 380V dan 400V dengan frekuensi 50 Hz dan 60 Hz secara berulang kali. Hasil penhujia itu dapat kita liah pada tabel 3 dan 4 dibawah ini.

Table 3. Hasil Simulasi Tegangan 380V

Beban Constant	Step Beban	Percobaan	Rs (Ohm)	Rr (Ohm)	LLs (Henry/mH)	LLr (Henry/mH)	Lm (Henry)	J	F	Pole	Efisiensi
		Pertama	0.370	0.325	0.0031	0.0031	0.114	0.4	0.02187	4	30,22 %
10	65	Kedua	0.235	0.175	0.0030	0.0030	0.114	0.4	0.02187	4	76,03 %
		Ketiga	0.280	0.225	0.0039	0.0039	0.114	0.4	0.02187	4	79,45 %
		Pertama	0.370	0.325	0.0031	0.0031	0.114	0.4	0.02187	4	35,64 %
15	60	Kedua	0.285	0.210	0.0039	0.0039	0.114	0.4	0.02187	4	79,58 %
		Ketiga	0.225	0.195	0.0033	0.0033	0.114	0.4	0.02187	4	23,91 %
		Pertama	0.370	0.325	0.0031	0.0031	0.114	0.4	0.02187	4	30,25 %
20	55	Kedua	0.210	0.145	0.0030	0.0030	0.114	0.4	0.02187	4	82,35 %
		Ketiga	0.215	0.155	0.0031	0.0031	0.114	0.4	0.02187	4	49,88 %
		Pertama	0.370	0.325	0.0031	0.0031	0.114	0.4	0.02187	4	47,24 %
10	65	Kedua	0.195	0.115	0.0042	0.0042	0.114	0.4	0.02187	4	55,27 %
		Ketiga	0.235	0.170	0.0033	0.0033	0.114	0.4	0.02187	4	73,41 %
		Pertama	0.370	0.325	0.0031	0.0031	0.114	0.4	0.02187	4	48,29 %
15	60	Kedua	0.235	0.175	0.0027	0.0027	0.114	0.4	0.02187	4	33,36 %
		Ketiga	0.250	0.150	0.0033	0.0033	0.114	0.4	0.02187	4	73,23 %
		Pertama	0.370	0.325	0.0031	0.0031	0.114	0.4	0.02187	4	39,32 %
20	55	Kedua	0.200	0.170	0.0032	0.003	0.114	0.4	0.02187	4	61,49 %
		Ketiga	0.235	0.195	0.0033	0.0033	0.114	0.4	0.02187	4	73,03 %

Sumber 1: Penelitian 2026

Table 4. Hasil Simulasi Tegangan 380V

Beban Constant	Step Beban	Percobaan	Rs (Ohm)	Rr (Ohm)	LLs (Henry/mH)	LLr (Henry/mH)	Lm (Henry)	J	F	Pole	Efisiensi
		Pertama	0.370	0.325	0.0031	0.0031	0.114	0.4	0.02187	4	36,82 %
10	65	Kedua	0.330	0.300	0.0033	0.0033	0.114	0.4	0.02187	4	55,72 %
		Ketiga	0.200	0.115	0.0033	0.0033	0.114	0.4	0.02187	4	77,27 %
		Pertama	0.370	0.325	0.0031	0.0031	0.114	0.4	0.02187	4	60,34 %
15	60	Kedua	0.380	0.240	0.0032	0.0032	0.114	0.4	0.02187	4	80,38 %
		Ketiga	0.200	0.150	0.0040	0.0040	0.114	0.4	0.02187	4	62,85 %
		Pertama	0.370	0.325	0.0031	0.0031	0.114	0.4	0.02187	4	45,39 %
20	55	Kedua	0.165	0.105	0.0034	0.0034	0.114	0.4	0.02187	4	55,16 %
		Ketiga	0.235	0.195	0.0033	0.0033	0.114	0.4	0.02187	4	70,97 %
		Pertama	0.370	0.325	0.0031	0.0031	0.114	0.4	0.02187	4	39,32 %
10	65	Kedua	0.200	0.160	0.0030	0.0030	0.114	0.4	0.02187	4	55,70 %
		Ketiga	0.270	0.150	0.0035	0.0035	0.114	0.4	0.02187	4	73,27 %
		Pertama	0.370	0.325	0.0031	0.0031	0.114	0.4	0.02187	4	39,32 %
15	60	Kedua	0.135	0.100	0.0033	0.0033	0.114	0.4	0.02187	4	58,54 %
		Ketiga	0.260	0.155	0.0035	0.0035	0.114	0.4	0.02187	4	73,65 %
		Pertama	0.370	0.325	0.0031	0.0031	0.114	0.4	0.02187	4	39,32 %
20	55	Kedua	0.235	0.195	0.0033	0.0033	0.114	0.4	0.02187	4	54,24 %
		Ketiga	0.195	0.150	0.0035	0.0035	0.114	0.4	0.02187	4	76,89 %

Sumber: Penelitian 2026

Pada tabel 3 dan 4 menunjukan hasil dari simulasi motor induksi tegangan 380V and 400V dengan beberapa variasi beban, untuk setiap beban kita melakukan 3 kali pengujian dan pengujian pertama kita mencoba dengan parameter internal motor induksi dalam MATLAB itu sendiri, lalu untuk percobaan selanjutnya kita optimasi parameter itu untuk dapat meningkatkan efisiensi motor agar beroperasi dengan lebih maksimal. Setelah dilakukan optimasi dari setiap percobanan dengan variasi beban dan frekuensi berbeda tampak dari hasil yang di dapat nilai efisiensi di setiap percobaan nya berbeda.

Setelah dilakukan nya optimasi dari percobaan pengujian tersebut diambil hasil atau nilai efisiensi tertinggi dari setiap pengujiannya. Data hasil atau nilai efisiensi tertinggi dijabarkan secara rinci pada tabel 5 dan 6 dibawah ini.

Table 5. Data Hasil Simulasi Tertinggi 380V

Frekuensi	Step Beban	Beban Constant	Efisiensi
60 Hz	65	10	79,45%
	60	15	79,58%
	55	20	82,35%
50 Hz	65	10	73,41%
	60	15	73,23%
	55	20	73,03%

Sumber: Penelitian 2026

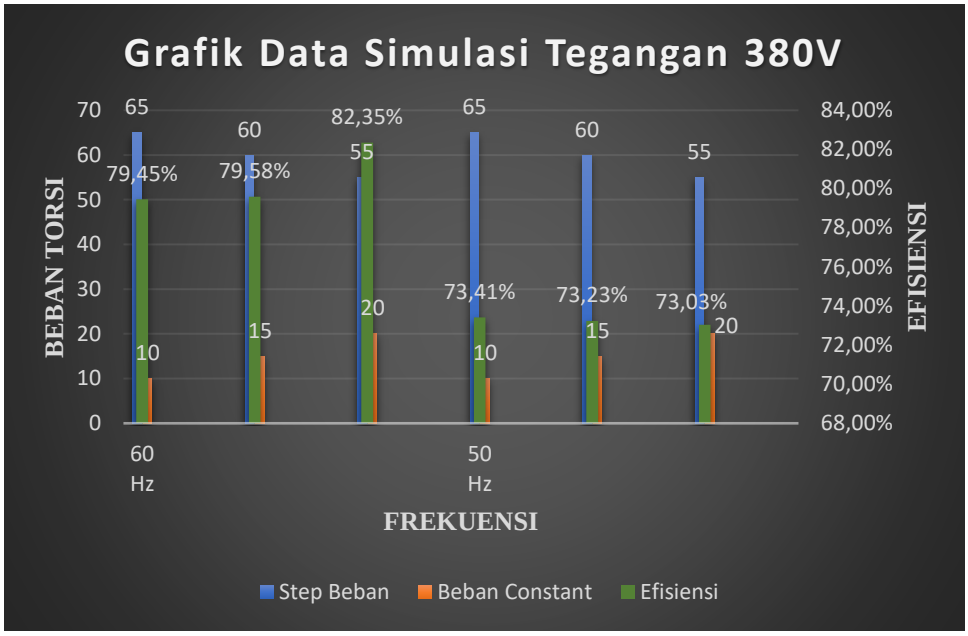
Table 6. Data Hasil Simulasi Tertinggi 400V

Frekuensi	Step Beban	Beban Constant	Efisiensi
60 Hz	65	10	77,27%
	60	15	80,38%
	55	20	70,97%
50 Hz	65	10	73,27%
	60	15	73,65%
	55	20	76,89%

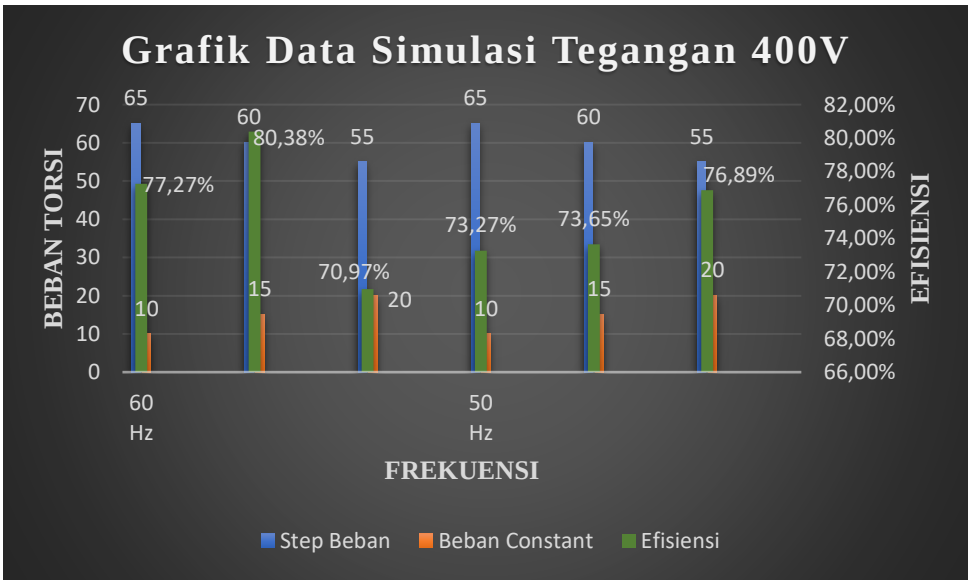
Sumber: Penelitian 2026

Berdasarkan pada tabel 5 dan 6 hasil simulasi pemodelan motor induksi 3phase pada tegangan 400V, diperoleh hasil data tertinggi dari setiap percobaan dan setiap variabel pembebanan (Step Beban dan Beban Constant) yang ditentukan, bahwa optimasi pada R_s, R_r, Ll_s dan Ll_r sangat berpengaruh pada peningkatan efisiensi motor induksi.

Adapun grafik dari data yang di dapat dari tabel 5 dan 6 dengan tengang 380V dan 400V dijelaskan dengan rinci pada gambar 5 dan 6 dibawah ini.



Gambar 5. Grafik Data Hasil Simulasi 380V



Gambar 6. Grafik Data Hasill Simulasi 400V

Berdasarkan data visual pada grafik data simulasi tegangan 380V, nilai efisiensi tertinggi menunjukkan perbedaan karakteristik yang jelas pada setiap frekuensi dan kondisi pembebanan. Pada frekuensi dasar 50 Hz dengan parameter yang telah dioptimasi, motor beroperasi mencapai titik optimal pada kondisi Beban Constant 10 N.m dengan (Step Beban 65 N.m) yang menghasilkan nilai efisiensi sebesar 73,41%. Saat nilai Beban Constant ditingkatkan menjadi 15 N.m (Step Beban 60 N.m), efisiensi mengalami sedikit penurunan yang stabil ke angka 73,23%, dan terus berada di angka 73,03% pada saat beban dinaikkan ke level maksimal sebesar 20 N.m (Step Beban 55 N.m). Sebaliknya, peningkatan frekuensi menjadi 60 Hz menggunakan *Variable Frequency*

Drive (VFD) memberikan dampak peningkatan efisiensi yang sangat signifikan. Pada kondisi Beban Constant 10 N.m dan 15 N.m, nilai efisiensi masing-masing menunjukkan angka 79,45% dan 79,58%. Titik optimal tertinggi pada pengujian frekuensi 60 Hz ini diraih saat Beban Constant ditingkatkan menjadi 20 N.m, di mana efisiensi melonjak hingga mencapai 82,35%, membuktikan bahwa peningkatan frekuensi pada tegangan nominal mampu menggeser titik operasional optimal motor ke area pembebanan mekanis yang lebih berat.

Sementara itu, pada kondisi tegangan berlebih (*overvoltage*) 400V, respon karakteristik efisiensi motor menunjukkan tren yang berbeda. Pada pengujian frekuensi 50 Hz, nilai efisiensi yang dihasilkan pada Beban Constant 10 N.m berada pada angka 73,27%. Ketika variabel Beban Constant diubah menjadi 15 N.m, efisiensi mengalami kenaikan menjadi 73,65%, dan mencapai titik optimal tertingginya di angka 76,89% saat beban ditingkatkan ke posisi maksimal 20 N.m. Karakteristik kenaikan ini menunjukkan bahwa pasokan tegangan yang tinggi memerlukan torsi mekanis yang besar agar motor dapat beroperasi mendekati kapasitas nominalnya. Namun, ketika frekuensi dinaikkan menjadi 60 Hz pada level tegangan 400V ini, terjadi fluktuasi efisiensi di mana nilai awal sebesar 77,27% pada beban 10 N.m sempat meningkat hingga mencapai titik optimal 80,38% pada beban 15 N.m. Ketika beban terus dipaksa naik hingga Beban Constant 20 N.m, nilai efisiensi justru menurun secara signifikan menjadi hanya 70,97%.

Perbandingan Data Hasil dan Grafik

Perbandingan kedua grafik tersebut memperlihatkan bahwa pengoperasian motor induksi pada tegangan nominal 380V memberikan performa yang jauh lebih tangguh dan efisien, khususnya saat dipadukan dengan frekuensi tinggi (60 Hz) untuk menarik beban berat. Sebaliknya, grafik dengan tegangan 400V merepresentasikan dampak buruk dari kondisi tegangan berlebih (*overvoltage*). Akibat adanya akumulasi rugi-rugi besi karena saturasi fluks magnetik pada inti besi, kinerja motor langsung mengalami penurunan drastis menjadi hanya 70,97% saat dipaksa bekerja pada frekuensi tinggi 60 Hz dengan beban mekanis yang tinggi (Beban Constant 20 N.m).

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil pemodelan, pengujian simulasi, dan analisis data mengenai optimasi efisiensi motor induksi tiga fasa menggunakan software MATLAB, dapat disimpulkan bahwa penerapan metode optimasi parameter internal melalui penyesuaian nilai hambatan kumparan resistansi stator (R_s), resistansi rotor (R_r), serta nilai induktansi bocor (Ll_s dan Ll_r) terbukti secara signifikan mampu mereduksi akumulasi total rugi-rugi konversi energi, baik *copper losses* maupun *core losses*, guna meningkatkan performa efisiensi motor induksi tiga fasa jika dibandingkan dengan parameter standar bawaan pabrikan. Di samping itu, pengoperasian motor induksi tiga fasa kapasitas 7,5 kW pada kondisi suplai tegangan nominal 380V dengan memanfaatkan kendali *Variable Frequency Drive* (VFD) pada frekuensi tinggi 60 Hz menghasilkan kinerja paling tangguh, di mana titik efisiensi puncak bergeser ke zona pembebanan mekanis yang lebih berat sebesar 20 N.m dengan capaian persentase efisiensi tertinggi mencapai 82,35%.

Sebaliknya, kondisi tegangan berlebih (*overvoltage*) sebesar 400V memberikan pengaruh buruk terhadap performa motor akibat rusaknya rasio proporsional V/f yang memicu terjadinya saturasi fluks magnetik pada inti besi, sehingga mengakibatkan akumulasi rugi-rugi besi (*iron losses*) melonjak dalam bentuk disipasi panas dan membatasi batas atas efisiensi puncak keseluruhan hanya berada di kisaran 70% hingga 80%, bahkan menurun drastis hingga menyentuh angka 70,97% pada beban tinggi 20 N.m dengan frekuensi 60 Hz.

REFERENSI

Aulia, R., Zarlis, M., & Nasution, M. K. M. (2017). Optimasi Kontrol Motor Induksi Menggunakan Metode Fuzzy Dan Algoritma Genetika. *Sinkron: Jurnal Dan Penelitian Teknik …*, *1*(April 2017), 52–57. http://polgan.ac.id/jurnal/index.php/sinkron/article/view/38%0Ahttp://polgan.ac.id/jurnal/index.php/sinkron/article/download/38/14

Barus, M. J. T., Tharo, Z., & Wibowo, P. (2024). Analisis efisiensi daya motor induksi 3 phase 150 kW dengan inverter sebagai pengatur speed. *Journal of Information Technology and Computer Science (INTECOMS)*, *7*(5), 1685–1690.

Diantoro, S., Nugroho, D., & Nugroho, A. A. (2024). Analisa pengaruh perubahan frekuensi dan tegangan terhadap efisiensi motor induksi tiga fasa menggunakan MATLAB Simulink. *Elektrika*, *16*(2), 127–137. https://doi.org/10.26623/elektrika.v16i2.8852

Harahap, C. R., Komalasari, E., & Prasojo, B. (2023). Pemodelan dan simulasi pengendalian kecepatan motor induksi tiga fasa dengan matrix converter berbasis vector control menggunakan MATLAB/Simulink. *Seminar Nasional Teknik Elektro*, *3*(1), 1–6. https://snte.fortei.org/list/index.php/snte/article/view/22

Mencou, S., Ben Yakhlef, M., & Tazi, E. B. (2025). Advanced control of induction motors (2019–2025): A comprehensive review of strategies, algorithms and sensorless techniques. *e-Prime – Advances in Electrical Engineering, Electronics and Energy*, *14*, 101098. https://doi.org/10.1016/j.prime.2025.101098

Muratno, M. (2020). Pengujian dan analisis motor asinkron tiga fasa pada laboratorium elektro. *Jurnal Teknik Mesin*, *9*(1), 27–34.

Pambudi, W. S., Widyantoro, D., Prabowo, Y. A., Munir, M., & Putra, N. P. U. (2026). Analisa pengaturan kecepatan motor induksi 3 phasa dengan variable frequency drive menggunakan kontrol PID pada pompa booster. *Jurnal Informatika dan Teknik Elektro Terapan*, *14*(1). https://doi.org/10.23960/jitet.v14i1.8375

Prabowo, S. A., Dwiono, W., & Taufiq, A. J. (2019). Analisis efisiensi motor induksi 3 fasa 1 HP kondisi under voltage dan over voltage dengan simulasi PSIM. *Jurnal Riset Rekayasa Elektro*, *1*(2), 92–99.

Rohadi, N., Men, L. K., & Hidayat, A. (2026). Fuzzy control of three-phase induction motor using Mitsubishi PLC: Experimental study. *Jurnal Nasional Teknik Elektro dan Teknologi Informasi*, *15*(1), 26–33. https://doi.org/10.22146/jnteti.v15i1.22694

Salama, M. A. E., El-Naggar, N. M., & Abu-Zaid, S. (2024). Energy saving analysis for pump-motor set in water purification plant using variable speed drive. *Scientific Reports*, *14*(1), 27728. https://doi.org/10.1038/s41598-024-75601-z

Saputra, B., Dani, A., & Satria, B. (2026). Analisis kinerja dan efesiensi sistem kontrol motor induksi 3 fasa menggunakan variable speed drive pada pompa proses fatty acid di PT. Permata Hijau Palm Oleo. *[Nama jurnal belum tercantum]*, *6*, 559–570.

Sivaraju, S. S., Senthilkumar, T., Sankar, R., Anuradha, T., Usha, S., & Musirin, I. B. (2024). Improving the efficiency of induction motor drive by flux and torque control: A hybrid LSE-RERNN approach. *ISA Transactions, 147*, 215–226. https://doi.org/10.1016/j.isatra.2024.01.034

Suda, K. R. S., Purwanto, E., Sumantri, B., Fakhruddin, H. H., Muntashir, A. A., & Rusli, M. R. (2021). Pengaturan kecepatan motor induksi 3 fasa dengan menggunakan pemodelan sistem (DTC) direct torque control. *Jurnal Pendidikan Teknologi dan Kejuruan, 18*(2), 237–248.

Suda, K. R. S., Purwanto, E., Sumantri, B., Muntashir, A. A., & Hendra, R. (2022). Pemodelan sistem kendali motor induksi tiga fasa menggunakan pengendali neuro-fuzzy melalui metode direct torque control. *ELKOMIKA: Jurnal Teknik Energi Elektrik, Teknik Telekomunikasi, & Teknik Elektronika, 10*(4), 888. https://doi.org/10.26760/elkomika.v10i4.888

Sufrianti, A. H. J. (n.d.). *Simulasi dan deteksi gangguan belitan stator motor induksi tiga fasa menggunakan arus starting dengan MATLAB/Simulink*.

Susilo, J. T., Dinata, S., Setiawan, J., & Santoso, E. (2023). Analisa efisiensi motor induksi 3 phasa hasil rewinding dengan pemodelan finite element. *EPIC Journal of Electrical Power Instrumentation and Control, 6*(1), 82. https://doi.org/10.32493/epic.v6i1.30752

Suwarni, S., & Prasetia, A. M. (2022). Pengaturan kecepatan motor induksi tiga fasa dengan direct torque control menggunakan jaringan saraf tiruan. *Jurnal ELTEK, 20*(2), 24–32. https://doi.org/10.33795/eltek.v20i2.336

Teguh, P. P., & Zambak, M. F. (2022). Optimalisasi kecepatan putaran motor listrik sebagai beban pada PLTS 5 kWp (Aplikasi: Laboratorium Balai Besar Pengembangan dan Penjamin Mutu Pendidikan Vokasi Bidang Bangunan dan Listrik Medan). *RELE (Rekayasa Elektrikal dan Energi): Jurnal Teknik Elektro, 5*(1). https://doi.org/10.30596/rele.v5i1.10784