

ANALYSIS OF THE IMPACT OF VOLTAGE IMBALANCE ON THE PERFORMANCE OF A MICROCONTROLLER-BASED CAGE ROTOR INDUCTION MOTOR

ANALISIS DAMPAK KETIDAKSEIMBANGAN TEGANGAN TERHADAP PERFORMA MOTOR INDUKSI ROTOR SANGKAR BERBASIS MIKROKONTROLER

Abdullah Avif Putra Buana^{1*}, Ruskardi², Rianda³

¹Program Studi Teknik Listrik, Jurusan Teknik Elektro, Politeknik Negeri Pontianak, Indonesia
Email: avifputra07@gmail.com

²Program Studi Teknik Listrik, Jurusan Teknik Elektro, Politeknik Negeri Pontianak, Indonesia
Email: ruskardi_polnep@yahoo.co.id

³Program Studi Teknik Listrik, Jurusan Teknik Elektro, Politeknik Negeri Pontianak, Indonesia
Email: riandafarhan@gmail.com³

Received: July 23, 2025 Revised: August 13, 2025 Published: October 30, 2025

DOI: <https://doi.org/10.24912/tesla.v27i1.34771>

Abstract

The three-phase induction motor is the most widely used alternating current (AC) electric motor in industrial applications, particularly for driving large-capacity loads. Its flexibility, efficiency, and ability to operate reliably under harsh environmental conditions make it the preferred choice in manufacturing, processing, and mining sectors, with an estimated 70% share of all industrial electric machines. However, one common technical issue encountered in the field is three-phase supply voltage unbalance. Even a small percentage of voltage unbalance can lead to increased phase current, torque fluctuations, higher operating temperatures, reduced efficiency, and instability in the overall power system. This study aims to analyze the impact of voltage unbalance on the performance of a squirrel-cage induction motor using a microcontroller-based monitoring system. Laboratory experiments were conducted by varying the degree of voltage unbalance in accordance with the NEMA MG 1-1993 standard. The monitoring system was designed with a microcontroller integrated with voltage and current sensors, enabling real-time data acquisition. The measured parameters included current, speed, slip, torque, and efficiency. Experimental results indicate that increasing the voltage unbalance from 0.53% to 5.22% led to a 4–7-fold increase in current unbalance, a slip rise of approximately 2%, and a reduction in efficiency from 90% to 82%. These findings demonstrate a direct correlation between supply voltage quality and motor performance. The results emphasize that controlling voltage unbalance—whether through proper distribution system maintenance or the use of compensation devices—is essential to maintaining optimal performance and extending the service life of three-phase induction motors in industrial environments.

Keywords: Voltage Unbalance, Monitoring, Three-Phase Induction Motor, AC

Abstrak

Motor induksi tiga fasa merupakan motor listrik arus bolak-balik (AC) yang paling banyak digunakan di industri, terutama sebagai penggerak beban berkapasitas besar. Fleksibilitas, efisiensi, dan ketahanannya terhadap kondisi lingkungan yang berat menjadikannya pilihan utama pada sektor manufaktur, pengolahan, dan pertambangan, dengan estimasi penggunaan mencapai 70% dari seluruh mesin listrik industri. Namun, salah satu permasalahan teknis yang sering ditemui di lapangan adalah ketidakseimbangan tegangan suplai tiga fasa. Ketidakseimbangan ini, meskipun hanya beberapa persen, dapat memicu kenaikan arus fasa, fluktuasi torsi, peningkatan suhu operasi, penurunan efisiensi, dan gangguan kestabilan sistem tenaga listrik. Penelitian ini bertujuan menganalisis dampak ketidakseimbangan tegangan terhadap performa motor induksi rotor sangkar menggunakan sistem monitoring berbasis mikrokontroler. Pengujian dilakukan di laboratorium dengan memvariasikan ketidakseimbangan tegangan sesuai standar NEMA MG 1-1993. Sistem monitoring dirancang menggunakan mikrokontroler yang terintegrasi dengan sensor tegangan dan

ANALYSIS OF THE IMPACT OF VOLTAGE IMBALANCE ON THE PERFORMANCE OF A MICROCONTROLLER-BASED CAGE ROTOR INDUCTION MOTOR

ANALISIS DAMPAK KETIDAKSEIMBANGAN TEGANGAN TERHADAP PERFORMA MOTOR INDUKSI ROTOR SANGKAR BERBASIS MIKROKONTROLER

arus, sehingga mampu merekam data secara real-time. Parameter yang diukur meliputi arus, kecepatan, slip, torsi, dan efisiensi. Hasil pengujian menunjukkan bahwa peningkatan ketidakseimbangan tegangan dari 0,53% hingga 5,22% menyebabkan ketidakseimbangan arus hingga 4–7 kali lipat, kenaikan slip sekitar 2%, serta penurunan efisiensi dari 90% menjadi 82%. Dampak ini menunjukkan korelasi langsung antara kualitas tegangan suplai dan kinerja motor. Temuan ini menegaskan bahwa pengendalian ketidakseimbangan tegangan, baik melalui pemeliharaan sistem distribusi maupun penggunaan perangkat kompensasi, sangat penting untuk mempertahankan performa optimal dan memperpanjang umur pakai motor induksi tiga fasa di lingkungan industri.

Kata Kunci: Ketidakseimbangan Tegangan, Monitoring, Motor Induksi Tiga Fasa, AC

PENDAHULUAN

Motor induksi merupakan salah satu perangkat listrik yang paling luas penggunaannya, terutama di sektor industri dan komersial. Diperkirakan sekitar 90% motor yang digunakan di lingkungan industri adalah motor induksi, terutama jenis motor induksi tiga fasa [1]. Hal ini disebabkan oleh keunggulan motor ini seperti konstruksinya yang sederhana dan kokoh, biaya perawatan yang rendah, harga yang relatif terjangkau, serta efisiensinya yang tinggi dalam menggerakkan beban-beban industri [2]. Sebagai motor arus bolak-balik (AC), motor induksi sangat tergantung pada kestabilan suplai tegangan tiga fasa dari sistem tenaga listrik agar dapat beroperasi secara optimal.

Salah satu permasalahan utama yang sering dijumpai di lapangan adalah ketidakseimbangan tegangan (*voltage unbalance*) pada suplai tiga fasa. Ketidakseimbangan ini dapat disebabkan oleh distribusi beban yang tidak merata, gangguan pada sistem kelistrikan, atau adanya koneksi fasa yang longgar. Ketidakseimbangan tegangan meskipun kecil, dapat memberikan dampak signifikan terhadap performa motor induksi, seperti peningkatan arus tidak seimbang, penurunan efisiensi, kenaikan suhu berlebih (*overheating*), fluktuasi torsi dan kecepatan, serta penurunan usia pakai motor secara keseluruhan. Kajian literatur menunjukkan bahwa ketidakseimbangan tegangan sebesar 3% saja dapat menurunkan efisiensi motor hingga 5% dan memicu fluktuasi kecepatan putar motor [3].

Kerugian industri hingga 40% terjadi akibat mesin produksi tidak beroperasi karena beban listrik yang berlebihan, yang menyebabkan gangguan tegangan lebih, penurunan tegangan, dan ketidakseimbangan tegangan [4]. Penelitian lain melalui simulasi di MATLAB/Simulink membuktikan bahwa tegangan tidak seimbang menyebabkan arus stator menjadi tidak simetris, osilasi torsi meningkat, dan efisiensi sistem menurun drastis [5]. Suplai tegangan tidak seimbang dan *non-sinusoidal* menyebabkan pemanasan lebih cepat dan peningkatan rugi-rugi pada motor induksi tiga fasa, yang berpotensi mempercepat kerusakan insulasi dan penurunan daya guna [6].

Meskipun banyak studi telah dilakukan untuk mengkaji pengaruh ketidakseimbangan tegangan terhadap kinerja motor, masih terdapat keterbatasan dalam hal pengembangan sistem pemodelan ketidakseimbangan yang fleksibel dan dapat diatur sesuai berbagai skenario, serta sistem *monitoring* yang mampu mendeteksi dan merespons kondisi ketidakseimbangan secara *real-time*. Selain itu, belum banyak penelitian yang secara eksplisit mengaitkan kondisi suplai tidak seimbang dengan strategi derating berdasarkan standar operasional seperti NEMA Standard MG 1-2016, yang menetapkan bahwa pengoperasian motor pada kondisi ketidakseimbangan di atas 5% tidak disarankan [7].

Ketidakseimbangan tegangan terjadi ketika terdapat ketidaksetaraan dalam besaran tegangan dan pergeseran fase, sedangkan fase tunggal terjadi ketika salah satu fase

menjadi terbuka selama pengoperasian motor [8]. Motor induksi merupakan salah satu jenis motor arus bolak balik yang banyak dipergunakan di industri, bahkan mencapai 30% dari total keseluruhan energi [9]. Namun, kinerjanya sangat bergantung pada kestabilan suplai tegangan tiga fasa. Ketidakseimbangan tegangan (*voltage unbalance*), bahkan sebesar 3%, dapat menurunkan efisiensi motor hingga 5% dan memicu fluktuasi kecepatan serta *overheating* [3]. Tegangan pada sistem tenaga listrik dapat mengalami variasi dan ketidakseimbangan yang dikategorikan menjadi empat jenis, yakni *Under Voltage Unbalance* (UVU), *Over Voltage Unbalance* (OVU), *Under Voltage Balance* (UVB), dan *Over Voltage Balance* (OVB). UVB dan OVB terjadi ketika ketiga fasa memiliki tegangan yang sama, namun secara keseluruhan berada di bawah atau di atas nilai nominal. Fenomena ketidakseimbangan lebih sering terjadi dibandingkan kondisi seimbang, akibat pembebanan tidak merata atau penggunaan kompensasi daya reaktif yang tidak seimbang [12].

Simulasi berbasis MATLAB atau Simulink oleh [5] memperkuat temuan ini, menunjukkan bahwa ketidakseimbangan tegangan menyebabkan arus stator asimetris, osilasi *torsi*, dan penurunan efisiensi hingga 14,14% (eksperimen) dan 31,34%. Pentingnya keseimbangan beban pada jaringan distirbusi tiga fasa untuk meminimalkan rugi daya dan jatuh tegangan. Perhitungan teoritis dan simulasi ETAP 12.6.0 mendapati hasil rugi daya mencapai 29,4 kW dan jatuh tegangan 20,3%, sedangkan hasil simulasi ETAP menunjukkan 23,1 kW dan 16,37%. Pada beban seimbang, rugi daya lebih rendah yaitu 20,9 kW (manual) dan 22,3 kW (simulasi) dengan jatuh tegangan 13,69% [13]. Sementara menurut [14], pengaruh system pendinginan pada motor induksi dapat terjadi karena kondisi umur dan kinerjanya. Penelitian akan melakukan pemantauan dan pengendalian ketidakseimbangan tegangan guna memastikan keandalan, efisiensi, dan umur operasional motor induksi dalam aplikasi industri dan sistem kelistrikan modern.

Berdasarkan latar belakang tersebut, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh ketidakseimbangan tegangan suplai tiga fasa terhadap kinerja motor induksi tiga fasa rotor sangkar. Penelitian ini juga bertujuan merancang dan mensimulasikan sistem suplai tegangan tidak seimbang yang dapat diatur secara fleksibel dalam berbagai skenario, serta mengembangkan sistem monitoring berbasis mikrokontroler dan perangkat ukur digital untuk mendeteksi serta merespons kondisi ketidakseimbangan secara real-time. Di samping itu, penelitian ini akan memberikan rekomendasi pengaturan derating motor induksi sesuai dengan standar NEMA guna menjaga efisiensi dan keandalan operasi motor serta membantu teknisi atau operator dalam membuat keputusan operasional yang tepat saat menghadapi gangguan suplai tegangan. Simulasi dan hasil pengujian akan digunakan untuk menunjukkan perubahan parameter seperti arus, suhu, kecepatan, dan efisiensi motor akibat variasi tegangan tidak seimbang. Dengan pendekatan ini, umur pakai motor diharapkan dapat diperpanjang dan kerusakan dini akibat suplai tegangan tidak stabil dapat diminimalkan.

METODE PENELITIAN

Bagian ini menguraikan kerangka konseptual dalam penelitian mengenai pengaruh ketidakseimbangan tegangan terhadap motor induksi tiga fasa rotor sangkar. Kerangka ini menjelaskan hubungan antara komponen pengukuran, sistem perancangan alat berbasis mikrokontroler, serta proses evaluasi terhadap performa motor akibat gangguan tegangan. Tujuannya adalah memberikan pemahaman struktural mengenai bagaimana data teknis dapat digunakan untuk menganalisis kondisi operasi motor, serta mengambil tindakan berdasarkan standar seperti NEMA MG 1.

ANALYSIS OF THE IMPACT OF VOLTAGE IMBALANCE ON THE PERFORMANCE OF A MICROCONTROLLER-BASED CAGE ROTOR INDUCTION MOTOR

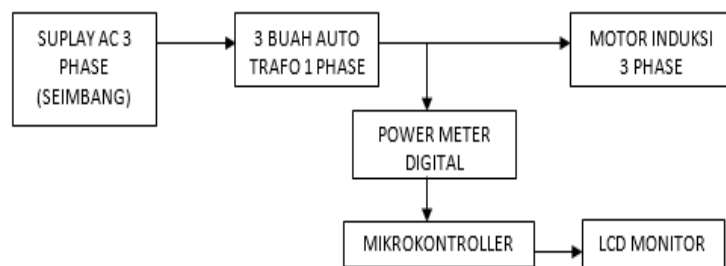
ANALISIS DAMPAK KETIDAKSEIMBANGAN TEGANGAN TERHADAP PERFORMA MOTOR INDUKSI ROTOR SANGKAR BERBASIS MIKROKONTROLER

Ketidakseimbangan tegangan (*voltage unbalance*) pada sistem tiga fasa adalah kondisi di mana besar tegangan antar fasa tidak sama atau sudut fasa tidak membentuk 120° , atau keduanya [15]. Ketidakseimbangan ini sering disebabkan oleh distribusi beban yang tidak merata, sambungan longgar, atau gangguan pada jaringan distribusi listrik. Ketidakseimbangan tegangan dan arus antar fasa, distribusi daya yang tidak merata, serta arus netral yang tinggi menyebabkan rugi daya meningkat dan pembebanan berlebih pada salah satu fasa, menurunkan efisiensi sistem. Diperlukan penataan ulang beban dan strategi kompensasi daya reaktif untuk menjaga keandalan sistem distribusi listrik gedung [16].

A. Desain Sistem

1) Skema Umum

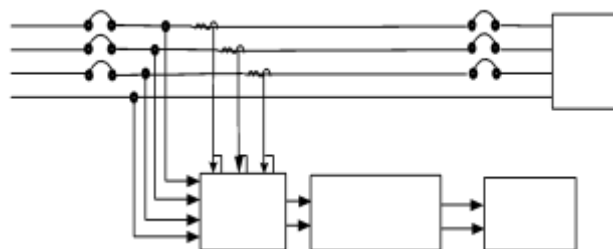
Penelitian ini menggunakan alat pengukuran berbasis mikrokontroler untuk memantau parameter kelistrikan dari motor induksi tiga fasa. Sistem terdiri atas sensor tegangan dan arus yang dihubungkan ke mikrokontroler, yang selanjutnya mengolah data untuk memperoleh nilai ketidakseimbangan tegangan (PVUR) dan ketidakseimbangan arus (PVIR). Hasil pengukuran ditampilkan secara *real-time* melalui LCD.



Gambar 1. Blok Diagram Perancangan dan Monitoring Alat

2) Arsitektur Sistem

Mikrokontroler digunakan untuk menghitung parameter kelistrikan seperti tegangan fasa (V_1, V_2, V_3), arus fasa (I_1, I_2, I_3), daya aktif (P), faktor daya (Pf), serta nilai PVUR dan PVIR. Data ini ditampilkan dan dianalisis untuk menentukan apakah kondisi motor normal, perlu di-*derated*, atau harus dihentikan (OFF), berdasarkan ambang batas yang ditetapkan oleh standar NEMA MG 1 ($<1\%$ = Normal, $>1\%$ = *Derated*, 5% = OFF).



Gambar 2. Wiring Diagram Alat Uji Ketidakseimbangan Tegangan dan Arus 3 Fasa

B. Model Evaluasi dan *Derating*

Model evaluasi ini menetapkan prosedur untuk menilai performa motor berdasarkan kondisi tegangan input yang tidak seimbang. Evaluasi dilakukan melalui perbandingan nilai-nilai parameter hasil pengukuran terhadap spesifikasi nominal motor. Apabila ketidakseimbangan ditemukan, sistem memberikan rekomendasi pengoperasian yang aman berdasarkan model *derating*.

C. Pemantauan dan Analisis Waktu Nyata

Sistem ini memungkinkan pemantauan real-time terhadap kondisi kelistrikan motor. Dengan menggunakan sensor dan mikrokontroler, parameter kelistrikan dapat dianalisis secara langsung, dan perubahan yang signifikan akibat ketidakseimbangan dapat segera dideteksi. Hasil pemantauan digunakan untuk menyimpulkan efek terhadap efisiensi, suhu kerja, dan keandalan motor induksi.

Motor induksi tiga fasa sangat sensitif terhadap ketidakseimbangan tegangan. Ketidakseimbangan ini dapat menyebabkan peningkatan arus pada salah satu fasa, penurunan efisiensi, getaran mekanis, peningkatan suhu, dan penurunan umur isolasi motor [17]. Bahkan, deviasi tegangan kecil (misalnya 3%) dapat meningkatkan arus fasa hingga 6-10 kali lebih besar dari deviasi tegangan tersebut [16]. NEMA MG 1-2016 menyarankan bahwa jika ketidakseimbangan tegangan melebihi 1%, motor harus *derated*, dan tidak boleh dioperasikan sama sekali jika melebihi 5% [7]. Artinya, daya maksimum motor harus dikurangi untuk mencegah kerusakan permanen.

Penelitian yang dilakukan menggunakan MATLAB Simulink menunjukkan bahwa ketidakseimbangan sebesar 5% menyebabkan osilasi pada torsi motor, arus stator tidak seimbang, dan fluktuasi pada kecepatan motor [5]. Efek ini berdampak langsung pada performa motor dalam sistem industri. Selain itu, juga membuktikan bahwa ketidakseimbangan tegangan mengurangi daya output dan efisiensi motor [18]. Oleh karena itu, deteksi dan mitigasi ketidakseimbangan sangat penting, terutama di sistem kelistrikan yang menggunakan motor induksi sebagai penggerak utama.

Ketidakseimbangan tegangan, menurut *Institute of Electrical and Electronics Engineers* (IEEE), terjadi ketika terdapat perbedaan nilai tegangan atau sudut fasa dalam sistem tenaga listrik. Umumnya, kondisi ini disebabkan oleh ketidaksamaan sudut antar ketiga fasa. Sementara itu, *National Electrical Manufacturers Association* (NEMA) mendefinisikan tingkat ketidakseimbangan tegangan melalui parameter yang dikenal sebagai *Line Voltage Unbalance Rate* (LVUR) [19].

$$LVUR = \frac{\text{Deviasi maksimum dari tegangan rata-rata}}{\text{Tegangan rata-rata}} \times 100\% \quad (1)$$

Tegangan pada ketiga fasa adalah 598V, 575V, dan 552V. Maka Tegangan rata-rata = $(598+575+552)/3 = 575V$. Kemudian Deviasi maksimum = $|598 - 575| = 23V$. sehingga hasil LVUR % Ketidakseimbangan = $(100 \times 23) / 575 \approx 4\%$. Dengan kondisi tersebut, motor dengan kapasitas 100 HP harus dikurangi dayanya menjadi sekitar 82 HP agar aman dioperasikan [5].

HASIL DAN DISKUSI

Hasil pengujian pengaruh ketidakseimbangan tegangan tiga fasa terhadap performa motor induksi rotor sangkar, mencakup pengaruh terhadap arus input, putaran motor, slip, dan efisiensi. Pengujian dilakukan menggunakan alat uji berbasis mikrokontroler dan sensor yang dikalibrasi, dengan variasi ketidakseimbangan tegangan antara 0% hingga 10%. Tujuan dari bagian ini adalah untuk memberikan gambaran teknis serta interpretasi

ANALYSIS OF THE IMPACT OF VOLTAGE IMBALANCE ON THE PERFORMANCE OF A MICROCONTROLLER-BASED CAGE ROTOR INDUCTION MOTOR

ANALISIS DAMPAK KETIDAKSEIMBANGAN TEGANGAN TERHADAP PERFORMA MOTOR INDUKSI ROTOR SANGKAR BERBASIS MIKROKONTROLER

terhadap bagaimana variasi tegangan dapat memengaruhi kinerja motor secara signifikan, yang menjadi dasar rekomendasi penggunaan dan perlindungan motor di lapangan industri.

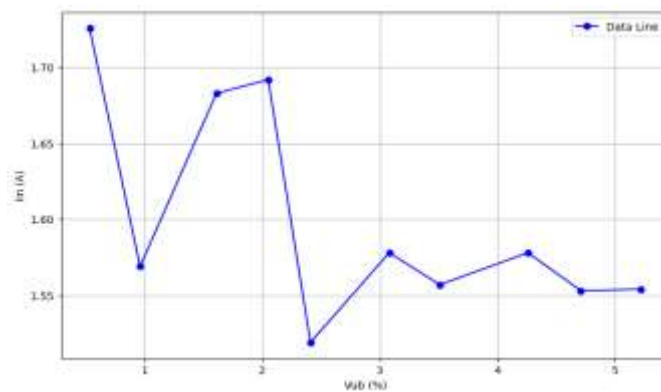
A. Spesifikasi Teknis Motor

Bagian ini menjelaskan konfigurasi teknis motor induksi rotor sangkar yang menjadi objek pengujian, di mana parameter-parameter ini penting untuk memahami kapasitas dan batas kerja motor sebelum dan saat dikenakan ketidakseimbangan tegangan. Motor yang digunakan adalah motor induksi tiga fasa dengan rotor sangkar, memiliki tegangan nominal 380 V, daya nominal sebesar 0,5 HP (± 370 Watt), frekuensi 50 Hz, arus nominal 1,8 A, kecepatan nominal 1390 rpm, dan jumlah kutub sebanyak 4. Motor ini umum digunakan dalam aplikasi industri ringan, dan dalam penelitian ini diuji dalam kondisi tanpa beban dengan variasi tegangan antar fasa yang diatur menggunakan *autotransformer*.

Motor ini digunakan dalam berbagai aplikasi industri ringan, dan uji coba dilakukan dalam kondisi tanpa beban dengan variasi tegangan antar fasa melalui *autotransformer*.

B. Pengaruh Ketidakseimbangan Tegangan terhadap Arus Input Motor

Bagian ini membahas bagaimana perubahan tegangan antar fasa memengaruhi arus input motor. Ketidakseimbangan menyebabkan distribusi arus antar fasa menjadi tidak merata, yang berdampak pada peningkatan arus total yang diserap motor.

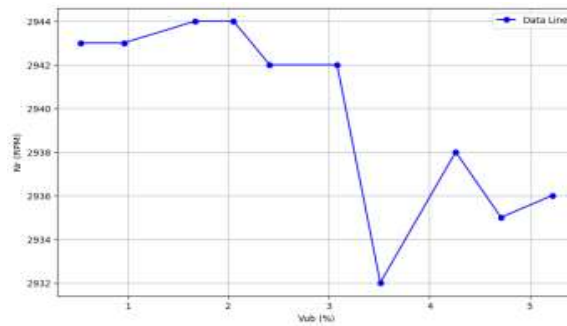


Gambar 3. Grafik Ketidakseimbangan Tegangan Suplai terhadap Arus Input Motor

Berdasarkan Gambar 3, arus input meningkat secara progresif seiring bertambahnya ketidakseimbangan. Kondisi ini berisiko menimbulkan overheating pada lilitan stator serta menurunkan umur isolasi motor. Terutama pada ketidakseimbangan di atas 5%, peningkatan arus menjadi signifikan, menunjukkan bahwa motor mulai bekerja dalam kondisi tidak efisien.

C. Pengaruh Ketidakseimbangan Tegangan terhadap Putaran Motor

Putaran motor dipengaruhi oleh kestabilan medan magnet putar. Ketidakseimbangan tegangan menyebabkan fluks magnet tidak merata, sehingga menghasilkan penurunan kecepatan putaran rotor.

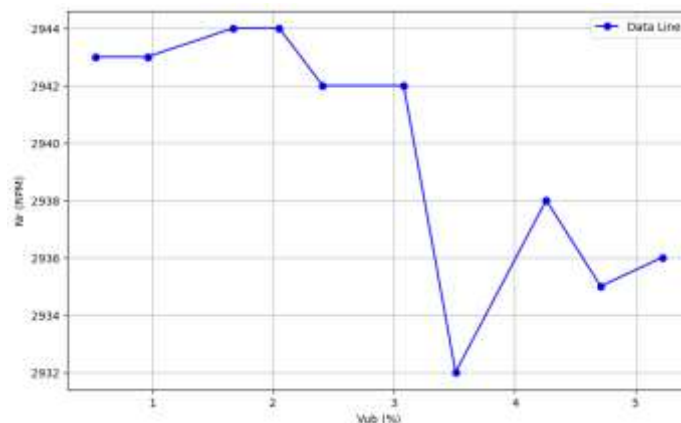


Gambar 4. Grafik Ketidakseimbangan Tegangan Suplai terhadap Putaran Motor

Seperti terlihat pada Gambar 4, kecepatan motor turun dari 1390 rpm pada kondisi normal menjadi sekitar 1320 rpm pada ketidakseimbangan 10%. Penurunan ini cukup signifikan karena dapat mengganggu proses produksi yang memerlukan kecepatan konstan. Ini juga merupakan indikasi awal bahwa slip meningkat.

D. Pengaruh Ketidakseimbangan Tegangan terhadap Slip Motor

Slip menggambarkan perbedaan antara kecepatan sinkron dan aktual rotor. Slip meningkat ketika putaran motor menurun, terutama akibat gangguan fluktuasi suplai tegangan antar fasa.



Gambar 5. Grafik Ketidakseimbangan Tegangan Suplai terhadap Slip Motor

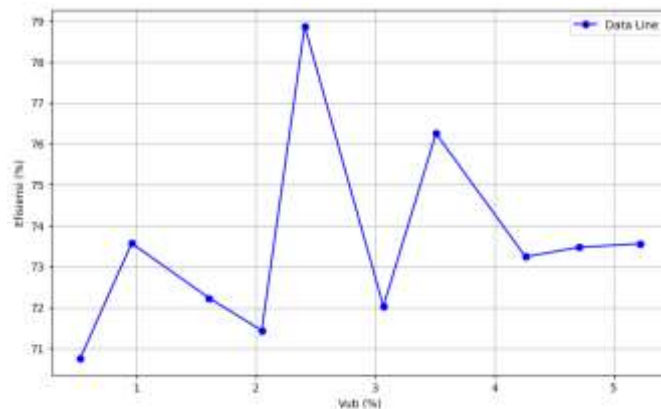
Gambar 5 menunjukkan bahwa slip yang semula berada pada nilai normal sekitar 0,7%, meningkat drastis menjadi lebih dari 2% pada kondisi tegangan tidak seimbang. Peningkatan slip ini berarti bahwa konversi energi elektromagnetik tidak berjalan optimal, serta memperbesar kemungkinan terjadinya rugi daya dan getaran.

E. Pengaruh Ketidakseimbangan Tegangan terhadap Efisiensi Motor

Efisiensi motor adalah perbandingan antara daya mekanik yang dihasilkan dengan daya listrik yang diserap. Ketidakseimbangan tegangan menyebabkan penurunan efisiensi karena sebagian besar energi digunakan untuk mengatasi arus dan torsi yang tidak merata.

ANALYSIS OF THE IMPACT OF VOLTAGE IMBALANCE ON THE PERFORMANCE OF A MICROCONTROLLER-BASED CAGE ROTOR INDUCTION MOTOR

ANALISIS DAMPAK KETIDAKSEIMBANGAN TEGANGAN TERHADAP PERFORMA MOTOR INDUKSI ROTOR SANGKAR BERBASIS MIKROKONTROLER



Gambar 6. Grafik Ketidakseimbangan Tegangan Suplai terhadap Efisiensi Motor

Dari Gambar 6 terlihat bahwa efisiensi menurun dari kisaran 75–80% menjadi di bawah 65% saat ketidakseimbangan mencapai 10%. Kondisi ini berbahaya dalam jangka panjang karena tidak hanya menyebabkan pemborosan energi, tetapi juga meningkatkan risiko kerusakan motor akibat beban tidak seimbang yang berkepanjangan.

F. Perbandingan Hasil Pengujian dengan Standar NEMA MG-1 dan Penelitian Terdahulu

Berdasarkan hasil pengujian, ketidakseimbangan tegangan suplai terbukti memiliki pengaruh signifikan terhadap kinerja motor induksi tiga fasa rotor sangkar. Standar NEMA MG-1 menetapkan batas maksimum ketidakseimbangan tegangan sebesar 1%, di mana setiap kenaikan 1% di atas batas tersebut dapat meningkatkan arus motor lebih dari 6–10%. Hasil uji menunjukkan bahwa peningkatan ketidakseimbangan dari 0% hingga 10% menyebabkan lonjakan arus input melebihi 150% dibanding kondisi normal, sejalan dengan prediksi NEMA MG-1. Kondisi ini berpotensi memicu pemanasan berlebih, penurunan efisiensi, serta kerusakan isolasi. Selain itu, efisiensi motor menurun tajam pada tingkat ketidakseimbangan di atas 5%, disertai peningkatan slip dan penurunan kecepatan putar. Hal ini mendukung pernyataan dalam NEMA MG-1 bahwa tegangan tidak seimbang dapat menyebabkan kehilangan daya sebesar 20% atau lebih, sekaligus memperpendek usia pakai motor secara signifikan. Temuan ini konsisten dengan sejumlah studi terbaru. Menurut Kastawan dkk. (2024) [20], bahwa ketidakseimbangan tegangan sebesar 3–5% meningkatkan suhu bantalan motor induksi secara signifikan dibandingkan permukaan bodi motor, menunjukkan pola kenaikan suhu yang konsisten dengan hasil pengujian ini, yang mengindikasikan peningkatan risiko termal pada bantalan. Penelitian Energies (2024) [21] menemukan bahwa kombinasi ketidakseimbangan tegangan dan gangguan subharmonik memicu getaran dan torsi berdenyut berlebih, yang sejalan dengan indikasi penurunan efisiensi dan kestabilan pada pengujian ini. Studi lain memperkenalkan metode evaluasi berbasis tegangan fase-netral yang mengonfirmasi hubungan langsung antara tingkat ketidakseimbangan dan degradasi performa motor [22], serta menunjukkan bahwa faktor unbalance tegangan meningkatkan total harmonic distortion (THD), torsi riak, dan penurunan efisiensi pada motor yang dikendalikan konverter, mendukung kesimpulan bahwa pengendalian tegangan seimbang mutlak diperlukan [23]. Secara keseluruhan, motor induksi rotor sangkar sangat rentan terhadap suplai tegangan yang tidak seimbang, terutama bila melampaui ambang 1% sebagaimana

ditetapkan NEMA MG-1. Oleh karena itu, penerapan sistem pemantauan dan proteksi seperti phase-unbalance relay menjadi penting untuk menjaga keandalan dan efisiensi operasi motor.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, alat pengukuran berbasis mikrokontroler yang dirancang terbukti mampu memantau parameter-parameter kinerja motor induksi rotor sangkar secara real-time dan menampilkannya melalui LCD monitor. Pengujian dengan variasi ketidakseimbangan tegangan suplai tiga fasa antara 0% hingga 10% menunjukkan bahwa ketidakseimbangan ini berdampak signifikan terhadap performa motor. Arus input meningkat secara progresif, bahkan pada ketidakseimbangan tertinggi (10%) mencapai lebih dari 150% dari kondisi normal, sejalan dengan prediksi standar NEMA MG-1 yang menyatakan bahwa setiap kenaikan 1% di atas ambang 1% dapat meningkatkan arus motor 6–10%. Selain itu, kecepatan motor menurun dari 1390 rpm menjadi ± 1320 rpm pada ketidakseimbangan 10%, yang berimplikasi pada peningkatan slip dari $\pm 0,7\%$ menjadi lebih dari 2%. Efisiensi juga menurun dari kisaran 75–80% menjadi di bawah 65%, yang menunjukkan degradasi kinerja signifikan. Kondisi ini mengindikasikan pemborosan energi, peningkatan rugi-rugi daya, risiko pemanasan berlebih pada lilitan stator, dan penurunan umur isolasi motor. Temuan ini konsisten dengan penelitian terbaru, di antaranya Kastawan dkk. (2024) yang melaporkan bahwa ketidakseimbangan 3–5% meningkatkan suhu bantalan motor secara signifikan dibandingkan bodi motor, serta studi *Energies* (2024) yang menemukan bahwa kombinasi ketidakseimbangan tegangan dan gangguan subharmonik memicu getaran serta torsi berdenyut berlebih. Penelitian lain juga menunjukkan hubungan linear antara tingkat ketidakseimbangan tegangan dengan peningkatan *total harmonic distortion* (THD), torsi riak, dan penurunan efisiensi pada motor berbasis konverter. Secara keseluruhan, motor induksi rotor sangkar sangat rentan terhadap suplai tegangan tidak seimbang, terutama bila melampaui batas 1% sesuai NEMA MG-1. Oleh karena itu, penerapan sistem pemantauan dan proteksi seperti *phase-unbalance relay*, serta penerapan *derating* saat tegangan tidak seimbang, mutlak diperlukan untuk menjaga efisiensi, mencegah kerusakan, dan memperpanjang umur pakai motor pada lingkungan industri.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] P. Harahap, “PENGARUH JATUH TEGANGAN TERHADAP KERJA MOTOR INDUKSI TIGA FASA MENGGUNAKAN SIMULINK MATLAB,” *Media Elekrika*, vol. 9, no. 2, 2016, doi: <https://doi.org/10.26714/me.v9i2.2440>.
- [2] I. N. B. I Made Parsa, *Motor-Motor Listrik untuk Mahasiswa dan Umum*, 1st ed. in 1. Jakarta: CV. Rasi Terbit, 2018. [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/323986635>
- [3] M. Z. Kurnia, I. M. W. Kastawan, and P. Raharjo, “Pengaruh ketidakseimbangan tegangan pada suplai daya listrik terhadap kecepatan putaran dan efisiensi motor induksi 3-fasa,” *JITEL*, vol. 3, no. 2, pp. 155–164, Aug. 2023, doi: 10.35313/jitel.v3.i2.2023.155-164.
- [4] M. Saifudin, S. Suryono, and I. Irianto, “Monitoring and Protection System for Overvoltage, Undervoltage and Unbalance Voltage,” *Jurnal Ecotipe*, vol. 9, no. 2, pp. 159–165, Oct. 2022, doi: 10.33019/jurnalecotipe.v9i2.3092.
- [5] A. Kamal and S. Bandri, “ANALISA PENGARUH KETIDAKSEIMBANGAN TEGANGAN MOTOR INDUKSI 3 FASA MENGGUNAKAN MATLAB

ANALYSIS OF THE IMPACT OF VOLTAGE IMBALANCE ON THE PERFORMANCE OF A MICROCONTROLLER-BASED CAGE ROTOR INDUCTION MOTOR

ANALISIS DAMPAK KETIDAKSEIMBANGAN TEGANGAN TERHADAP PERFORMA MOTOR INDUKSI ROTOR SANGKAR BERBASIS MIKROKONTROLER

- SIMULINK,” *RTJ*, vol. 6, no. 2, pp. 167–175, May 2023, doi: 10.31869/rtj.v6i2.4154.
- [6] B. Sahrul Lesmana, *Pengaruh Arus Tidak Seimbang Terhadap Kerja Motor Induksi Tiga Fasa*. in Tesis. Universitas Sumatera Utara: Repositori Institusi Universitas Sumatera Utara (RI-USU), 2018. [Online]. Available: <https://repositori.usu.ac.id/handle/123456789/9640>
- [7] NEMA, *ANSI/NEMA MG 1-2016 (Revision 1, 2018) Motors and Generators*. in Section IV Performance Standards Applying to All Machines Part 31 Definite Purpose Inverter-Fed Polyphase Motors. Rosslyn, Virginia 22209: National Electrical Manufacturers Association, 2021. [Online]. Available: www.nema.org
- [8] M. Altaira and A. Issa, “A Comparative Study of the Effect of Voltage Unbalance and Single Phasing on Three Phase Induction Motor Characteristics,” in *2023 IEEE 3rd International Maghreb Meeting of the Conference on Sciences and Techniques of Automatic Control and Computer Engineering (MI-STA)*, Benghazi, Libya: IEEE, May 2023, pp. 771–776. doi: 10.1109/MI-STA57575.2023.10169628.
- [9] M. Muhammad, E. Yuniarti, S. Sofiah, A. Saputra, and A. Pani, “Performa Motor Induksi Satu Fasa Sebagai Penggerak Mesin Pengereng,” *jtekno*, vol. 18, no. 2, pp. 1–10, Nov. 2021, doi: 10.33557/jtekno.v18i2.1469.
- [10] A.H. Abed, J. Rahebi, H. Sajir, A. Farzamnia, “Protection of sensitive loads from voltages fluctuations in Iraqi grids by DVR,” in *IEEE 2nd Int. Conf. on Automatic Control and Intelligent Systems (I2CACIS)*, 2017 IEEE 2nd International Conference on Automatic Control and Intelligent Systems (I2CACIS), Oct. 2017. doi: 10.1109/I2CACIS.2017.8239048.
- [11] T. H. Atyia, “Control Techniques of Torque Ripple Minimization for Induction Motor,” *Tikrit j. eng. sci.*, vol. 25, no. 4, pp. 57–63, Dec. 2018, doi: 10.25130/tjes.25.4.10.
- [12] J. A.-K. Mohammed, S. R. Al-Sakini, and A. A. Hussein, “Assessment of disturbed voltage supply effects on steady-state performance of an induction motor,” *IJECE*, vol. 10, no. 3, p. 2259, Jun. 2020, doi: 10.11591/ijece.v10i3.pp2259-2270.
- [13] Irawati Bursa, *ANALISIS RUGI-RUGI DAYA AKIBAT KETIDAKSEIMBANGAN BEBAN PADA JARINGAN DISTRIBUSI SEKUNDER DI PT. PLN (PERSERO) ULP WATANG SAWITTO*, Skripsi. in 1. PROGRAM STUDI D-4 TEKNIK LISTRIK JURUSAN TEKNIK ELEKTRO POLITEKNIK NEGERI UJUNG PANDANG MAKASSAR, 2021. [Online]. Available: <https://repository.poliupg.ac.id/id/eprint/9277/1/Analisis%20Rugi-Rugi%20Daya%20Akibat%20Ketidakseimbangan%20Beban%20Pada%20Jaringan%20Distribusi%20Sekunder%20Di%20Pt.%20Pln%20%28Persero%29.pdf>
- [14] Prasetyo, B., B., Wahyu, S, and Setiawan, D, “Sistem Pendinginan untuk Motor Induksi: Dampak terhadap Umur dan Kinerja,” *Jurnal Teknologi dan Rekayasa*, vol. 8, no. 3, pp. 78–85, 2022.
- [15] Y. Supri Hardi, “Peredaman Harmonisa dan Perbaikan Faktor Daya Aplikasi Beban Rumah Tangga,” *Jurnal Litek*, vol. 10, no. 1, pp. 35–42, 2013.
- [16] T. W. Nugroho, I. Mustaqim, and A. Sandria Jaya Wardhana, “STUDI KUALITAS DAYA LISTRIK (POWER QUALITY) DI BANGUNAN GEDUNG XYZ,” *JITET*, vol. 13, no. 2, Apr. 2025, doi: 10.23960/jitet.v13i2.6563.

- [17] I. A. Ibrahim and M. J. Hossain, "Low Voltage Distribution Networks Modeling and Unbalanced (Optimal) Power Flow: A Comprehensive Review," *IEEE Access*, vol. 9, pp. 143026–143084, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3120803.
- [18] M. Rosyidi, Sukendro Broto Sasongko, and Yuliyanto Agung Prabowo, "Analisa Pengaruh Ketidakseimbangan Tegangan Terhadap Motor Induksi Penggerak Hoisting Pada Portal Crane 30 Ton," *Seminar Nasional Sains dan Teknologi Terapan XII 2024 Institut Teknologi Adhi Tama Surabaya*, 2024, [Online]. Available: <https://ejournal.itats.ac.id/sntekpan/article/view/6609>
- [19] A. Kurniawan, *Analisa Ketidakseimbangan Arus Starting Soft Starter Pada Motor Induksi Tiga Fasa di PT Krakatau Tirta Industri*, 1st ed., vol. 1. in Skripsi, vol. 1. Serang: JURUSAN TEKNIK ELEKTRO FAKULTAS TEKNIK UNIVERSITAS SULTAN AGENG TIRTAYASA, 2025. [Online]. Available: https://eprints.untirta.ac.id/46919/1/Ari%20Kurniawan_3332200094_Fulltext.pdf
- [20] I. M. W. Kastawan, P. Raharjo, and M. Z. Kurnia, "Effect of voltage supply unbalance on temperature distribution of three-phase induction motor," *E3S Web of Conf.*, vol. 479, p. 01005, 2024, doi: 10.1051/e3sconf/202447901005.
- [21] P. Gnaciński, M. Pepliński, A. Muc, and D. Hallmann, "Induction Motors Under Voltage Unbalance Combined with Voltage Subharmonics," *Energies*, vol. 17, no. 24, p. 6324, Dec. 2024, doi: 10.3390/en17246324.
- [22] A. Touil and F. Babaa, "Studying of Unbalanced Supply Voltage Effects on Three-Phase Induction Motor Performances Based on Line Neutral Voltage Analytical Calculation," in *Proceedings of the 5th International Conference on Electrical Engineering and Control Applications–Volume 1*, vol. 1147, S. Ziani, M. Chadli, S. Bououden, and I. Zelinka, Eds., in Lecture Notes in Electrical Engineering, vol. 1147. , Singapore: Springer Nature Singapore, 2024, pp. 455–467. doi: 10.1007/978-981-97-0045-5_41.
- [23] N. Y. Do and X. C. Ngo, "Effects of Voltage Unbalance on Matrix Converter Induction Motor Drive," in *Advances in Engineering Research and Application*, vol. 602, D. C. Nguyen, N. P. Vu, B. T. Long, H. Puta, and K.-U. Sattler, Eds., in Lecture Notes in Networks and Systems, vol. 602. , Cham: Springer International Publishing, 2023, pp. 468–476. doi: 10.1007/978-3-031-22200-9_53.