

ANALISIS PENGARUH KETIDAK SEIMBANGAN BEBAN TERHADAP UMUR PAKAI KOMPONEN ELEKTRIKAL DI SISTEM PRODUKSI INDUSTRI GARMEN

Muhammad Sahhal Aliffuddin¹⁾, dan Agus Adhi Nugroho²⁾

^{1,2)}Teknik Elektro,Fakultas Teknologi Industri, Univesritas Islam Sultan Agung
Jl. Kaligawe Raya No.4, Terboyo Kulon, Kec. Genuk, Kota Semarang, Jawa Tengah 50112
e-mail: sahhahln@std.unissula.ac.id¹⁾, dan agusadhi@unissula.ac.id²⁾

ABSTRACT

Load imbalance in a three-phase power system can cause increased power losses, temperature increases, and reduced electrical component lifespan. This study aims to analyze the effect of load imbalance on the lifespan of electrical components in a garment industry power distribution system. Data were obtained through current and voltage measurements using a Digital Power Analyzer, then analyzed using the NEMA method. The results showed an average load imbalance of 11.69%, caused by uneven distribution of single-phase loads between phases. This condition has the potential to increase operating temperatures, accelerate insulation degradation, and increase the frequency of electrical component failures. Load balancing simulations showed that redistributing the load between phases can reduce the imbalance value to near-balanced conditions. The results indicate that load balancing is an effective measure to improve the reliability of the power distribution system and extend the lifespan of electrical components. This study contributes to a practical load balancing strategy to improve the reliability of electrical components in industrial distribution systems. The results demonstrate that load balancing is an effective measure for improving the reliability of electrical distribution systems and extending the service life of electrical components.

Keywords: load imbalance, NEMA, three-phase system, electrical components, garment industry

ABSTRAK

Ketidakseimbangan beban pada sistem tenaga tiga fasa dapat menyebabkan peningkatan kehilangan daya, peningkatan temperatur suhu, dan pengurangan umur pakai komponen listrik. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh ketidakseimbangan beban terhadap umur pakai komponen listrik pada sistem distribusi listrik di industri garmen. Data diperoleh melalui pengukuran arus dan tegangan menggunakan Digital Power Analyzer, kemudian dianalisis menggunakan metode NEMA. Hasil penelitian menunjukkan ketidakseimbangan beban rata-rata sebesar 11,69%, yang disebabkan oleh distribusi beban satu fasa yang tidak merata antar fasa. Kondisi ini berpotensi meningkatkan suhu temperatur operasional mesin, mempercepat degradasi isolasi, dan meningkatkan frekuensi kerusakan komponen listrik. Simulasi penyeimbangan beban digunakan untuk menunjukkan bahwa redistribusi beban antar fasa dapat mengurangi nilai ketidakseimbangan hingga mendekati kondisi seimbang. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penyeimbangan beban merupakan langkah efektif untuk meningkatkan keandalan sistem distribusi daya dan memperpanjang umur pakai komponen listrik. Studi ini memberikan kontribusi pada strategi penyeimbangan beban praktis untuk meningkatkan keandalan komponen listrik dalam sistem distribusi industri. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penyeimbangan beban merupakan langkah efektif untuk meningkatkan keandalan sistem distribusi daya dan memperpanjang umur pakai komponen listrik.

Kata Kunci: ketidakseimbangan beban, NEMA, sistem tiga fasa, komponen listrik, industri garmen

1.PENDAHULUAN

Sistem distribusi tenaga listrik tiga fasa merupakan salah satu komponen penting dalam menunjang keberlangsungan proses produksi di sektor industri karena mampu menyalurkan daya listrik secara efisien dan andal untuk melayani berbagai jenis beban. Pada industri garmen, sebagian besar peralatan produksi menggunakan motor dan peralatan satu fasa yang disuplai dari sistem distribusi tiga fasa melalui panel distribusi atau *power pole*. Kondisi tersebut menuntut pembagian beban yang merata pada setiap fasa agar sistem dapat beroperasi secara optimal dan memiliki tingkat keandalan yang tinggi.

Permasalahan yang sering dijumpai pada sistem distribusi tenaga listrik industri adalah

ketidakseimbangan beban (*load unbalance*). Ketidakseimbangan ini terjadi ketika pembagian beban satu fasa pada masing-masing fasa tidak merata sehingga menyebabkan perbedaan arus antar fasa. Selain disebabkan oleh distribusi beban yang tidak seimbang, kondisi tersebut juga dapat dipengaruhi oleh penambahan beban tanpa perencanaan, karakteristik beban yang berbeda, maupun kerusakan pada peralatan listrik. Keseimbangan beban pada sistem tiga fasa sangat penting untuk menjaga efisiensi dan keandalan operasi sistem tenaga listrik [1]-[6].

Sebagian besar mesin produksi pada industri garmen menggunakan motor listrik satu fasa, seperti mesin jahit single needle, double needle, mesin PLK, mini boiler, serta blower ironing. Mesin-mesin tersebut

memperoleh suplai listrik dari salah satu fasa dan penghantar netral sehingga distribusi jumlah beban pada setiap fasa menjadi faktor yang sangat penting. Apabila pembagian beban antar fasa tidak dilakukan secara merata, maka salah satu fasa akan menerima arus yang lebih besar dibandingkan fasa lainnya sehingga menimbulkan kondisi ketidakseimbangan beban pada sistem distribusi tenaga listrik [1].

Pada industri garmen yang menjadi objek penelitian, hasil pengamatan menunjukkan bahwa sebagian besar mesin produksi menggunakan beban satu fasa dengan pola penggunaan yang berubah-ubah sesuai kebutuhan operasional. Akibatnya, distribusi beban pada masing-masing fasa menjadi tidak merata dan menimbulkan ketidakseimbangan arus pada sistem distribusi tenaga listrik. Berdasarkan data operasional yang diperoleh selama pengamatan, nilai rata-rata ketidakseimbangan beban mencapai 11,69%, yang menunjukkan bahwa kondisi sistem berada jauh di atas batas rekomendasi standar internasional [7].

Dalam kondisi ideal, sistem tenaga tiga fasa menunjukkan nilai tegangan dan arus yang sama di setiap fasa, dengan perbedaan sudut 120° . Namun, dalam kondisi nyata, distribusi beban yang tidak merata menyebabkan arus di setiap fasa tidak seimbang. Ketidakseimbangan ini menghasilkan komponen arus urutan negatif, yang mengakibatkan kerugian tambahan pada motor listrik. Akibatnya, suhu operasi motor meningkat, sehingga menurunkan efisiensi sistem dan memperpendek umur isolasi motor. Jika situasi ini berlanjut, keandalan sistem distribusi daya listrik akan menurun, dan risiko kerusakan peralatan akan meningkat [3], [4], [8].

Standar National Electrical Manufacturers Association (NEMA) dan Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) merekomendasikan agar tingkat ketidakseimbangan pada sistem tenaga listrik dijaga pada batas yang rendah untuk mempertahankan keandalan operasi, khususnya pada motor induksi tiga fasa. Ketidakseimbangan yang melebihi batas rekomendasi dapat menyebabkan peningkatan arus pada salah satu fasa, kenaikan rugi-rugi daya, serta peningkatan temperatur kerja pada motor dan peralatan listrik lainnya. Kondisi tersebut berpotensi mempercepat degradasi isolasi, meningkatkan stres termal dan mekanis, serta memperpendek umur pakai komponen elektrikal sehingga berdampak pada menurunnya keandalan sistem dan meningkatnya biaya pemeliharaan [2], [7].

Selain berdampak pada peralatan listrik, ketidakseimbangan beban juga dapat menyebabkan terjadinya *downtime* produksi yang tidak direncanakan. Gangguan tersebut menghambat proses produksi, menurunkan produktivitas, serta menimbulkan kerugian ekonomi yang tidak sedikit bagi perusahaan. Kerusakan dini pada motor listrik, panel distribusi, transformator, maupun perangkat proteksi sering kali

berkaitan dengan kondisi operasi yang tidak seimbang, sehingga pengendalian terhadap ketidakseimbangan beban menjadi salah satu aspek penting dalam manajemen sistem kelistrikan industri [8]-[10].

Berbagai penelitian sebelumnya umumnya berfokus pada pengaruh ketidakseimbangan terhadap performa motor induksi, seperti efisiensi, kenaikan temperatur, dan perubahan karakteristik arus. Namun, kajian yang menghubungkan tingkat ketidakseimbangan beban dengan penurunan umur pakai komponen elektrikal pada sistem distribusi industri masih relatif terbatas. Oleh karena itu, penelitian ini dilakukan untuk menganalisis tingkat ketidakseimbangan beban pada sistem distribusi tenaga listrik tiga fasa menggunakan metode *National Electrical Manufacturers Association* (NEMA) serta mengkaji dampaknya terhadap umur pakai komponen elektrikal pada industri garmen [7], [11].

Ketidakseimbangan beban tidak hanya menyebabkan peningkatan suhu pada motor listrik, tetapi juga menghasilkan arus yang lebih tinggi pada netral. Arus ini meningkatkan kehilangan daya pada konduktor, karena besarnya berbanding lurus dengan kuadrat arus yang mengalir. Peningkatan kerugian daya menyebabkan kenaikan suhu pada kabel dan peralatan pelindung, yang dapat mempercepat degradasi isolasi dan mengurangi umur komponen listrik. Oleh karena itu, penyeimbangan beban antar fase merupakan langkah penting dalam menjaga efisiensi dan keandalan sistem distribusi tenaga listrik [3], [12].

Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan gambaran mengenai kondisi ketidakseimbangan beban yang terjadi pada sistem distribusi tenaga listrik serta menjadi dasar dalam penyusunan strategi redistribusi beban, penerapan pemeliharaan preventif, dan pengembangan sistem pemantauan (*monitoring*) secara real-time. Dengan demikian, keandalan sistem kelistrikan dapat ditingkatkan, risiko kerusakan peralatan dapat diminimalkan, dan umur pakai komponen elektrikal dapat dioptimalkan sehingga mendukung keberlangsungan proses produksi industri secara lebih efisien.

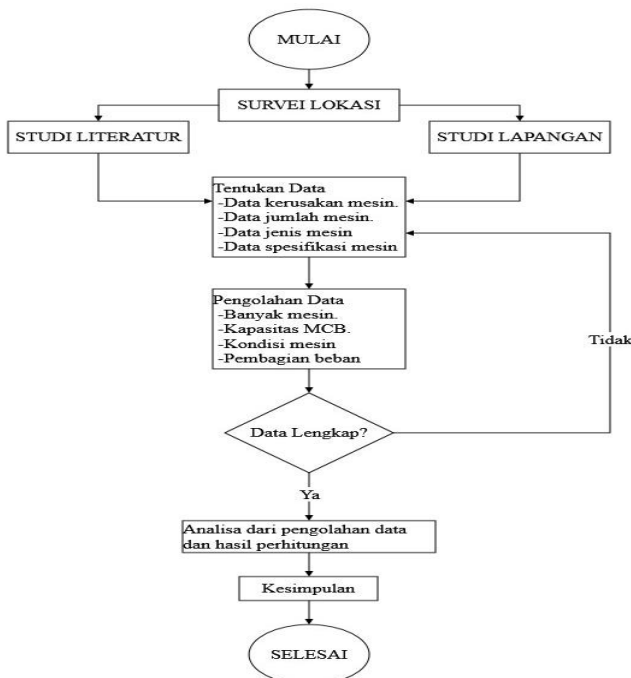
Berbeda dengan penelitian sebelumnya yang umumnya berfokus pada pengaruh ketidakseimbangan tegangan terhadap performa motor induksi atau analisis kualitas daya, penelitian ini menganalisis ketidakseimbangan beban berdasarkan metode NEMA menggunakan data pengukuran arus selama 31 hari dan mengaitkannya dengan data kerusakan komponen elektrikal selama satu tahun pada industri garmen. Dengan demikian, penelitian ini memberikan gambaran mengenai hubungan antara tingkat ketidakseimbangan beban dengan potensi penurunan umur pakai komponen elektrikal pada kondisi operasional nyata.

Selain menyebabkan peningkatan suhu pada motor listrik, ketidakseimbangan beban juga dapat menghasilkan arus pada konduktor netral. Dalam sistem

tiga fasa yang seimbang, arus yang dihasilkan pada fasa ketiga cenderung mendekati nol, sehingga menghasilkan arus netral minimal atau nol. Namun, jika beban pada setiap fasa tidak sama, arus netral akan muncul, yang besarnya bergantung pada perbedaan arus antar fasa. Arus netral yang tinggi dapat meningkatkan kehilangan daya pada konduktor, menyebabkan kabel netral menjadi panas, mengurangi efisiensi sistem, dan meningkatkan risiko kerusakan pada instalasi listrik dan peralatan yang terhubung. Oleh karena itu, menyeimbangkan beban antar fasa sangat penting untuk menjaga kualitas daya dan meningkatkan efisiensi sistem distribusi daya listrik di lingkungan industri [3].

Berdasarkan berbagai permasalahan tersebut, diperlukan analisis terhadap tingkat ketidakseimbangan beban yang terjadi pada sistem distribusi tenaga listrik industri. Analisis ini penting dilakukan untuk mengetahui kondisi pembebanan pada masing-masing fasa serta mengevaluasi dampaknya terhadap temperatur kerja, rugi-rugi daya, dan umur pakai komponen elektrik. Metode *National Electrical Manufacturers Association* (NEMA) dipilih karena mampu memberikan gambaran tingkat ketidakseimbangan berdasarkan penyimpangan arus pada masing-masing fasa dan lebih mudah diterapkan pada pengukuran lapangan dibandingkan metode komponen simetris yang membutuhkan data fasor lengkap [11], [12].

II. METODE PENELITIAN



Gambar 1. FLOW Chart

Penelitian ini menerapkan metode kuantitatif deskriptif, yang merupakan teknik penelitian untuk menilai suatu permasalahan berdasarkan angka melalui tahapan pengukuran, pengolahan, dan analisis data. Data yang diperoleh dalam penelitian ini dikumpulkan secara langsung melalui observasi di lapangan serta

pengukuran pada sistem distribusi listrik di sektor garmen sebagai objek penelitian.

A. Observasi Lapangan

Observasi lapangan dilakukan secara langsung pada sistem distribusi tenaga listrik di salah satu industri garmen yang berlokasi di Kawasan Industri Wijaya Kusuma sebagai objek penelitian.

Tujuan dari tahap observasi ini adalah untuk mengetahui kondisi sistem saat ini, konfigurasi jaringan, pola pembebanan, dan titik pengukuran yang digunakan selama proses pengambilan data.

Pada titik ini, komponen utama sistem distribusi tenaga listrik diidentifikasi. Ini termasuk panel distribusi utama, penghantar tiga fasa, dan beban utama yang terhubung ke sistem. Selain itu, observasi dilakukan untuk mengidentifikasi kemungkinan ketidakseimbangan beban yang disebabkan oleh distribusi beban pada masing-masing fasa [1].

Dalam penelitian ini, metode pengukuran, titik pengambilan data, dan analisis ketidakseimbangan beban didasarkan pada hasil observasi lapangan.

data arus dan tegangan selama 1 bulan				
No.	Fasa R (A)	Fasa S (A)	Fasa T (A)	Tegangan (V)
1	1472	1232	1273	407
2	1496	1225	1301	403
3	1489	1246	1284	408
4	1496	1244	1290	402
5	1499	1224	1293	401
6	1479	1206	1304	409
7	1487	1221	1255	406
8	1499	1252	1291	410
9	1487	1211	1315	406
10	1499	1202	1314	406
11	1485	1231	1250	405
12	1487	1242	1278	408
13	1485	1260	1266	403
14	1490	1234	1290	403
15	1473	1233	1266	405
16	1490	1219	1261	401
17	1482	1243	1273	409
18	1492	1201	1313	407
19	1499	1208	1294	403
20	1494	1251	1265	409
21	1492	1208	1311	409
22	1499	1237	1279	409
23	1464	1206	1253	401
24	1492	1236	1260	404
25	1449	1206	1255	400
26	1478	1231	1250	403
27	1461	1214	1261	404
28	1500	1243	1301	400
29	1492	1209	1313	407
30	1485	1235	1266	407
31	1568	1265	1323	408
AVG	1483	1228	1282	405

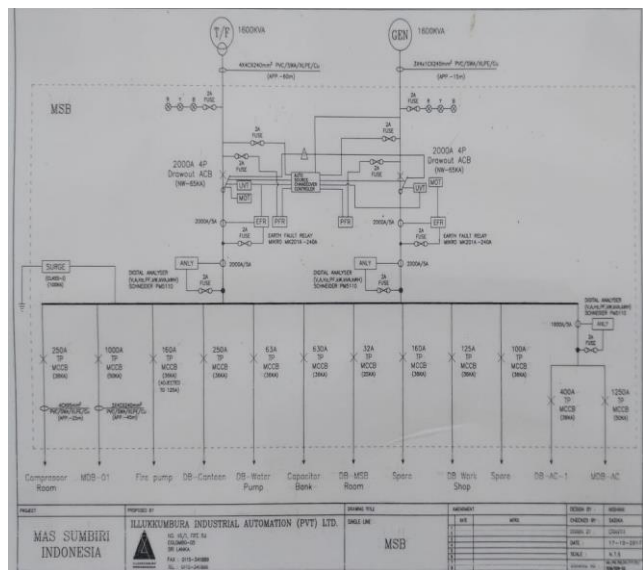
Gambar 2. Tabel pengukuran arus selama 1 bulan

Berdasarkan hasil pengukuran selama 31 hari, total rata-rata arus pada sistem menunjukkan nilai sebesar 1333,15 A, dengan rincian rata-rata arus fasa R sebesar 1489,03 A, fasa S sebesar 1228,23 A, dan fasa T sebesar 1282,19 A. Data tersebut menunjukkan adanya distribusi beban yang belum merata pada masing-masing fasa, sehingga berpotensi menimbulkan peningkatan rugi-rugi daya, kenaikan temperatur peralatan, dan penurunan umur pakai komponen elektrik.

B. Single Line Diagram

Single Line Diagram (SLD) pada penelitian ini digunakan untuk menggambarkan konfigurasi sistem

distribusi tenaga listrik pada objek penelitian secara keseluruhan. Diagram ini menunjukkan alur distribusi daya listrik mulai dari sumber utama sampai ke beban, sehingga memudahkan dalam identifikasi jalur distribusi serta penentuan titik pengukuran pada proses penelitian [1].



Gambar 3. Single Line Diagram Sistem Distribusi Tenaga Listrik Pada Objek Penelitian

Berdasarkan Single Line Diagram pada Gambar 3, sumber listrik utama berasal dari transformator berkapasitas 1600 kVA yang terhubung ke *Main Switch Board* (MSB) melalui *Air Circuit Breaker* (ACB) 2000 A. Selain sumber utama dari transformator sistem juga dilengkapi dengan generator berkapasitas 1600 kVA sebagai sumber cadangan yang terhubung melalui sistem *Automatic Transfer Switch* (ATS) untuk menjaga keberlangsungan suplai listrik ketika terjadi gangguan pada sumber utama.

Dari panel *Main Switch Board* (MSB) daya Listrik kemudian di distribusikan ke beberapa panel beban seperti MDB-01, *Fire Pump*, DB *canteen*, DB *Water Pump*, *Capasitor Bank*, DB *Workshop*, DB AC,serta beban lainnya sesuai kebutuhan operasional pada area penelitian.

C. Pengambilan Data

Selanjutnya, data penelitian dikumpulkan melalui beberapa langkah, yaitu:

- Mengumpulkan informasi tentang kerusakan mesin dari catatan pemeliharaan tahunan, yang mencakup jenis mesin, waktu terjadinya kerusakan, jenis kerusakan, dan tindakan perbaikan yang dilakukan.
- Pengukuran tegangan dan arus listrik pada mesin produksi menggunakan multimeter dan tang amper untuk mengidentifikasi adanya ketidakseimbangan [3].
- Pengukuran suhu motor dan komponen listrik menggunakan termometer inframerah untuk mengidentifikasi indikasi overheating yang

- disebabkan oleh ketidakseimbangan beban listrik [5].
- Pengamatan kondisi sistem kelistrikan secara langsung dilakukan pada kabel, MCB, kontaktor, panel kontrol, dan sambungan listrik untuk menemukan kerusakan fisik yang disebabkan oleh arus berlebih atau distribusi beban yang tidak seimbang.
 - Untuk menentukan jenis kerusakan yang paling dominan, data kerusakan dikelompokkan berdasarkan jenis mesin dan kerusakan. Selanjutnya, dihitung frekuensi dan persentase kerusakan.
 - Untuk mengetahui bagaimana ketidakseimbangan beban berdampak pada kerusakan mesin produksi, analisis dan penarikan kesimpulan dilakukan secara deskriptif dengan membandingkan hasil pengukuran dengan standar operasional kelistrikan yang berlaku.

D. Data Kerusakan Mesin

Data yang diambil merupakan data kerusakan mesin jahit dan mesin support garment di pabrik dalam kurun waktu kurang lebih dalam satu tahun sebagai berikut:

No	Jenis Mesin	Jenis Kerusakan	Penyebab Ketidakseimbangan Listrik	Jumlah Kasus	Persentase (%)
1	Mesin Jahit single needle	Motor cepat panas	Arus pada salah satu fasa lebih tinggi akibat pembagian beban tidak merata	14	28
2	Mesin Jahit double needle	Lilitan motor terbakar	Beban berlebih pada fasa tertentu menyebabkan arus kerja meningkat	10	20
3	Mesin Jahit PLK	Kecepatan tidak stabil	Pembebanan sistem yang tidak merata menyebabkan penurunan performa motor	8	16
4	Mesin Jahit obras	MCB sering trip	Arus berlebih pada salah satu fasa akibat akumulasi beban	6	12
5	Mesin Jahit fusing	Inverter rusak	Pemanasan komponen akibat arus kerja yang tinggi secara terus-menerus	5	10
6	Blower Ironing	Motor overload	Ketidakseimbangan pembebanan menyebabkan salah satu jalur suplai bekerja lebih berat	12	30
7	Blower PLK	Bearing rusak	Temperatur motor meningkat akibat arus kerja berlebih	9	23
8	Blower Ironing	Kontaktor terbakar	Arus tinggi pada rangkaian menyebabkan pemanasan kontak kontaktor	7	18
9	Blower Industri	Lilitan motor rusak	Overheating akibat pembebanan listrik yang tidak merata	6	15
10	Blower fusing	Panel listrik panas	Konsentrasi beban pada satu fasa menyebabkan kenaikan temperatur panel	4	10
11	Mini Boiler Ironing	Elemen pemanas putus	Konsentrasi beban pada satu fasa menyebabkan kenaikan temperatur panel	8	32
12	Mini Boiler Ironing	Motor pompa overheating	Beban berlebih pada fasa tertentu meningkatkan arus motor	6	24
13	Mini Boiler Ironing	Thermostat rusak	Temperatur panel dan peralatan meningkat akibat arus tinggi	4	16
14	Mini Boiler Ironing	MCB sering trip	Ketidakseimbangan beban menyebabkan salah satu fasa mengalami overcurrent	3	12
15	Mini Boiler Ironing	Panel kontrol panas	Distribusi beban yang tidak merata meningkatkan rugi-rugi dan temperatur panel	2	8
Total				149	±85

Gambar 4. tabel data kerusakan mesin

Berdasarkan data kerusakan mesin yang dikumpulkan dari divisi perawatan dari Januari hingga Desember 2025, sejumlah jenis kerusakan, penyebab, jumlah kasus, dan persentase kejadian ditemukan terkait dengan kerusakan sistem kelistrikan. Di area produksi industri, data kerusakan ini digunakan untuk menganalisis hubungan antara ketidakseimbangan beban listrik dan umur pakai komponen listrik.

Tabel pada gambar 4 menunjukkan bahwa kerusakan yang paling umum terjadi pada mesin yang menggunakan motor induksi tiga fasa,[10] seperti mesin pengering setrika dan mesin jahit industri. Data ini dijelaskan lebih lanjut di Bab III untuk menentukan

pengaruh penyeimbangan beban terhadap frekuensi kerusakan komponen listrik.

Selanjutnya dilakukan pengukuran arus dan tegangan selama 1 bulan untuk mengetahui tingkat ketidakseimbangan bebannya.

E. Pengolahan Data

Untuk memudahkan proses analisis, data yang diperoleh dari pengukuran lapangan selanjutnya diolah. Data arus bulanan dan data kerusakan komponen elektrikal diproses selama satu tahun [13].

Nilai arus untuk masing-masing fasa (R, S, dan T) diperoleh melalui proses rekapitulasi data arus. Kemudian, nilai arus rata-rata sistem tiga fasa digunakan sebagai referensi untuk menentukan deviasi maksimum dari masing-masing fasa terhadap nilai rata-rata.

Selain itu, data kerusakan komponen elektrik selama satu tahun dikategorikan menurut jenis komponen dan frekuensi kerusakan. Kemudian persentase kerusakan dihitung untuk menentukan komponen yang paling sering mengalami kerusakan.

Selanjutnya, hasil pengolahan data tersebut digunakan untuk mempelajari bagaimana tingkat ketidakseimbangan beban dan umur pakai komponen elektrikal pada sistem distribusi tenaga listrik industri berhubungan satu sama lain.

F. Analisis Menggunakan Metode NEMA

Secara teoritis, ketidakseimbangan pada sistem tenaga listrik tiga fasa dapat dianalisis menggunakan metode komponen simetris (*symmetrical components*) yang terdiri atas urutan positif, urutan negatif, dan urutan nol. Impedansi urutan positif merepresentasikan kondisi operasi normal sistem, impedansi urutan negatif menunjukkan adanya ketidakseimbangan antar fasa yang dapat menimbulkan pemanasan berlebih pada motor induksi, sedangkan impedansi urutan nol berkaitan dengan arus yang mengalir melalui jalur netral atau pembumian. Analisis menggunakan komponen simetris memerlukan data sudut fasa dan parameter impedansi sistem sehingga lebih sesuai untuk studi gangguan dan analisis sistem tenaga secara mendalam.

Namun, penelitian ini tidak menggunakan pendekatan tersebut karena tujuan penelitian adalah mengevaluasi tingkat ketidakseimbangan beban berdasarkan data pengukuran arus lapangan serta mengkaji pengaruhnya terhadap umur pakai komponen elektrikal. Oleh karena itu, metode NEMA dipilih karena mampu menghitung persentase ketidakseimbangan beban secara sederhana melalui deviasi arus antar fasa tanpa memerlukan data sudut fasa maupun parameter impedansi sistem. Penelitian ini menggunakan metode *National Electrical Manufacturers Association* (NEMA) untuk menganalisis tingkat ketidakseimbangan beban karena lebih mudah dan banyak digunakan untuk menilai ketidakseimbangan arus pada sistem distribusi tenaga

listrik industri. Khususnya, metode ini digunakan untuk menilai dampak ketidakseimbangan arus terhadap kinerja dan umur pakai motor listrik [7].

Metode NEMA lebih spesifik dalam mengevaluasi dampak ketidakseimbangan terhadap peralatan listrik, terutama motor induksi. Ini berbeda dengan standar IEEE, yang biasanya digunakan untuk analisis kualitas daya yang lebih luas, seperti harmonisa, *flicker*, dan *voltage sag* [14].

Oleh karena itu, metode NEMA dianggap paling sesuai untuk penelitian ini karena mampu memberikan hasil analisis yang lebih relevan dengan tujuan penelitian, yaitu mengetahui pengaruh ketidakseimbangan beban terhadap umur pakai komponen elektrikal pada sistem distribusi tenaga listrik industri.

Berikut perhitungan ketidakseimbangan beban pakai metode NEMA dengan persamaan (1):

$$\%Unbalance = \frac{\Delta I_{max}(|I_R - I_{AVG}|, |I_S - I_{AVG}|, |I_T - I_{AVG}|)}{I_{AVG}} \times 100\% \quad (1)$$

Dimana:

- ΔI_{max} Selisih (deviasi) arus terbesar terhadap arus rata-rata (Ampere)
- I_R = arus fasa R (A)
- I_S = arus fasa S (A)
- I_T = arus fasa T (A)
- I_{avg} = arus rata-rata (A)

Sebelum melakukan perhitungan persentase ketidakseimbangan, maka dilakukan perhitungan $I_{rata-rata}$ dengan persamaan (2)

$$I_{AVG} = \frac{I_R + I_S + I_T}{3} \quad (2)$$

Dimana:

- I_R = arus fasa R (A)
- I_S = arus fasa S (A)
- I_T = arus fasa T (A)
- I_{avg} = arus rata-rata (A)

Setelah mendapatkan nilai arus rata rata, maka dilakukan perhitung deviasi tiap fasa, digunakan persamaan (3)

- $|I_R - I_{AVG}| =$
- $|I_S - I_{AVG}| =$
- $|I_T - I_{AVG}| =$

Dimana:

- I_R = arus fasa R (A)
- I_S = arus fasa S (A)
- I_T = arus fasa T (A)

Setelah mendapatkan nilai deviasi tiap fasa, maka diketahui deviasi terbesar, lalu dapat dilakukan

perhitungan persentase ketidakseimbangan beban, digunakan persamaan (4).

$$\%_{unbalance} = \frac{\Delta I_{max}}{I_{AVG}} \times 100\% \quad (4)$$

$$= \frac{\Delta I_{max}}{I_{AVG}} \times 100\%$$

Dimana:

- $\%_{unbalance}$ = Persentase ketidakseimbangan beban (*Unbalance Load Percentage*) (%)
- ΔI_{MAX} = Selisih (deviasi) arus terbesar terhadap arus rata-rata (Ampere)
- I_{AVG} = Arus rata-rata dari ketiga fasa (Ampere)

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Kondisi sistem Distribusi Tenaga Listrik

1. Analisis Data Kerusakan Mesin

Data tahunan menunjukkan bahwa kerusakan umum termasuk panas berlebih pada motor, beban berlebih, lilitan terbakar, dan pemutus sirkuit utama yang sering mati; sebagian besar kerusakan mesin produksi disebabkan oleh beban listrik yang tidak seimbang dalam sistem tiga fasa. Mesin seperti mesin jahit industri, mini boiler, dan blower ironing sering mengalami masalah ini.

Hasil penyelidikan menunjukkan bahwa mesin jahit single needle mengalami 14 kejadian motor overheat akibat arus antar fasa yang tidak seimbang, sedangkan unit blower ironing mengalami kerusakan sebanyak 12 kali akibat motor overload. Selain itu, mini boiler mengalami kerusakan karena motor pompa yang overheat dan elemen pemanas yang rusak, yang disebabkan oleh tegangan yang tidak stabil. Ini menekankan bahwa peralatan yang bergantung pada motor dan pemanas sangat sensitif terhadap variasi distribusi arus listrik.

Ketidakseimbangan beban menyebabkan salah satu fasa menanggung beban yang lebih besar dari fasa lainnya, sehingga meningkatkan suhu kerja peralatan listrik. Peningkatan suhu terus-menerus dapat mempercepat degradasi isolasi, mengurangi efisiensi motor, dan memperpendek umur pakai komponen listrik.[8]) Kondisi ini sesuai dengan karakteristik dampak ketidakseimbangan beban pada standar NEMA MG-1

Secara keseluruhan, data kerusakan mesin menunjukkan adanya ketidakseimbangan beban yang tinggi dan peningkatan frekuensi kerusakan komponen listrik pada area produksi industri. Oleh karena itu, distribusi beban yang merata dan pemantauan kondisi listrik secara berkala diperlukan untuk menjaga keandalan sistem distribusi daya.[8]

2. Perhitungan Ketidakseimbangan Beban (Metode NEMA)

Metode National Electrical Manufacturers Association (NEMA) digunakan untuk menganalisis ketidakseimbangan beban berdasarkan deviasi arus

maksimum terhadap arus rata-rata pada tiga fasa.[7] Perhitungan ini dilakukan menggunakan persamaan (1). Perhitungan ketidakseimbangan beban diambil dari data Gambar 2 Tabel 5 pada arus rata-rata.

1) Hitung arus rata-rata

Perhitungan ini dilakukan untuk menghitung nilai arus rata-rata dari sistem tiga fasa. Nilai ini akan digunakan sebagai referensi untuk menghitung besarnya deviasi tiap fasa terhadap kondisi ideal sistem tiga fasa. Perhitungan ini dilakukan menggunakan persamaan (2).

$$I_{AVG} = \frac{I_R + I_S + I_T}{3}$$

$$I_{AVG} = \frac{1489 \text{ A} + 1228 \text{ A} + 1282 \text{ A}}{3} = 1333 \text{ A}$$

2) Hitung deviasi tiap fasa:

Untuk menentukan fasa mana yang memiliki penyimpangan terbesar, perhitungan deviasi dilakukan untuk menghitung perbedaan antara arus rata-rata dan masing-masing fasa. Perhitungan ini dilakukan menggunakan persamaan (3).

- $|I_R - I_{AVG}| =$
- $|I_S - I_{AVG}| =$
- $|I_T - I_{AVG}| =$
- Fasa R: $|1489,03 - 1333,15| = 155,88$
- Fasa S: $|1228,23 - 1333,15| = 104,92$
- Fasa T: $|1282,19 - 1333,15| = 50,96$

Deviasi maksimum didapat sebesar: 155,88

3) Hitung Ketidakseimbangan:

Dengan menggunakan metode NEMA, perhitungan ini dilakukan untuk menghitung persentase ketidakseimbangan beban dengan menggunakan deviasi maksimum terhadap arus rata-rata. Perhitungan ini dilakukan menggunakan persamaan (4).

$$\%_{unbalance} = \frac{\Delta I_{max}}{I_{AVG}} \times 100\%$$

$$\%_{unbalance} = \frac{155,88}{1333,15} \times 100\% = 11,69\%$$

3. Data pengukuran tegangan dan beban

Berdasarkan hasil pengukuran pada sistem kelistrikan tiga fasa di area produksi industri, diperoleh data arus dan tegangan pada Gambar 2 Tabel pengukuran arus selama 1 bulan.

Merujuk model penelitian pada Gambar 5, hasil data diambil data dari hasil pengamatan dan dicatat di logbook yang berisi beban pada fasa R, fasa S, fasa T, dan tegangan. Setelah itu dihitung persentase

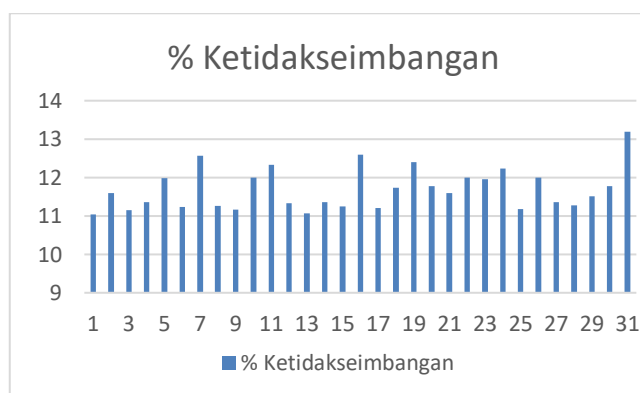
ketidakseimbangannya, lalu perhitungan lainnya dilakukan melalui excel.

data ketidakseimbangan beban perhitungan nema						
No.	Fasa R (A)	Fasa S (A)	Fasa T (A)	I Rata-rata	% Ketidakseimbangan	Tegangan (V)
1	1472	1232	1273	1325.67	11.04	407
2	1496	1225	1301	1340.67	11.59	403
3	1489	1246	1284	1339.67	11.15	408
4	1496	1244	1290	1343.33	11.36	402
5	1499	1224	1293	1338.67	11.98	401
6	1479	1206	1304	1329.67	11.23	409
7	1487	1221	1255	1321.00	12.57	406
8	1499	1252	1291	1347.33	11.26	410
9	1487	1211	1315	1337.67	11.16	406
10	1499	1202	1314	1338.33	12.00	406
11	1485	1231	1250	1322.00	12.33	405
12	1487	1242	1278	1335.67	11.33	408
13	1485	1260	1266	1337.00	11.07	403
14	1490	1234	1290	1338.00	11.36	403
15	1473	1233	1266	1324.00	11.25	405
16	1490	1219	1261	1323.33	12.59	401
17	1482	1243	1273	1332.67	11.21	409
18	1492	1201	1313	1335.33	11.73	407
19	1499	1208	1294	1333.67	12.40	403
20	1494	1251	1265	1336.67	11.77	409
21	1492	1208	1311	1337.00	11.59	409
22	1499	1237	1279	1338.33	12.00	409
23	1464	1206	1253	1307.67	11.96	401
24	1492	1236	1260	1329.33	12.24	404
25	1449	1206	1255	1303.33	11.18	400
26	1478	1231	1250	1319.67	12.00	403
27	1461	1214	1261	1312.00	11.36	404
28	1500	1243	1301	1348.00	11.28	400
29	1492	1209	1313	1338.00	11.51	407
30	1485	1235	1266	1328.67	11.77	407
31	1568	1265	1323	1385.33	13.19	408
AVG	1489.03	1228.23	1282.19	1333.15	11.69	405

Gambar 5. Tabel Data Ketidakseimbangan Beban Perhitungan

Dari data tersebut terlihat bahwa nilai arus pada masing-masing fasa tidak sama, sedangkan tegangan relatif stabil. Hal ini menunjukkan adanya ketidakseimbangan beban pada sistem kelistrikan tiga fasa.

Saat terjadinya ketidakseimbangan beban fasa R, fasa S, fasa T, dan tegangan dari hasil Gambar 5, maka di peroleh gambar grafik sebagai berikut.



Gambar 6. Grafik % ketidakseimbangan beban selama 1 bulan

Ketidakseimbangan arus yang terjadi secara terus menerus dapat menyebabkan peningkatan temperatur kerja motor dan menurunkan efisiensi sistem distribusi tenaga listrik industri [10].

Selain grafik persentase ketidakseimbangan beban, distribusi arus pada masing-masing fasa juga dipelajari untuk menemukan pola pembebanan selama periode pengamatan [12]. Grafik arus fasa R, S, dan T digunakan untuk menunjukkan perbedaan arus yang signifikan antar fasa, dan fasa yang mengalami pembebanan paling besar diidentifikasi sebagai penyebab utama ketidakseimbangan beban pada sistem.

B. Analisis Ketidakseimbangan Beban

Berdasarkan perhitungan metode NEMA, didapat nilai ketidakseimbangan beban sebesar 11,69%, yang menunjukkan bahwa sistem dalam kondisi tidak seimbang dan melebihi batas toleransi yang direkomendasikan [7]. Fasa R menunjukkan arus tertinggi dibandingkan fasa lainnya, menandakan adanya kelebihan beban pada fasa tersebut, berdasarkan standar NEMA, semakin besar nilai ketidakseimbangan beban maka semakin besar potensi peningkatan rugi-rugi daya, kenaikan temperatur peralatan, serta penurunan efisiensi sistem kelistrikan.

TABEL I
PERBANDINGAN HASIL PENELITIAN DENGAN STANDAR NEMA

Parameter	Kondisi Ideal	Hasil Penelitian	Keterangan
Distribusi arus antar fasa	Relatif seimbang	Fasa R > Fasa T > Fasa S	Beban tidak merata
Ketidakseimbangan beban	Serendah mungkin	11,69%	Menunjukkan kondisi tidak seimbang
Temperatur operasi	Stabil	Berpotensi meningkat	Risiko overheating
Umur pakai komponen	Normal	Berpotensi menurun	Memerlukan tindakan perbaikan
Keandalan sistem	Tinggi	Menurun akibat ketidakseimbangan	Perlu redistribusi beban

Berdasarkan Tabel 1, terlihat bahwa distribusi beban pada sistem belum merata sehingga menyebabkan ketidakseimbangan arus antar fasa. Kondisi tersebut berpotensi meningkatkan temperatur operasi peralatan dan mempercepat penurunan umur pakai komponen elektrik apabila tidak dilakukan tindakan penyeimbangan beban.

Menurut standar NEMA MG-1, persentase ketidakseimbangan tegangan yang direkomendasikan pada motor induksi tiga fasa tidak boleh melebihi 1%. Apabila nilai ketidakseimbangan melebihi batas tersebut, maka motor listrik berpotensi mengalami kenaikan temperatur yang signifikan bahkan overheating, penurunan efisiensi, peningkatan rugi-rugi daya, serta menurunnya umur isolasi motor. Pada penelitian ini diperoleh nilai ketidakseimbangan beban rata-rata sebesar 11,69% dan ketidakseimbangan beban tertinggi sebesar 13,19%, sehingga kondisi sistem dapat dikategorikan jauh melebihi batas toleransi yang direkomendasikan standar NEMA. Kondisi tersebut memperbesar risiko terjadinya overheating pada motor, kerusakan lilitan, serta gangguan pada komponen

proteksi seperti MCCB dan kontaktor. Oleh karena itu, diperlukannya tindakan penyeimbangan beban antar fasa untuk mengurangi dampak negatif terhadap keandalan sistem kelistrikan industri [2], [3], [4], [7].

Untuk memperjelas posisi hasil penelitian terhadap standar yang berlaku, dilakukan perbandingan antara hasil pengukuran dengan standar NEMA sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 2 berikut.

Parameter	Hasil Pengukuran	Standar NEMA	Keterangan
Ketidakseimbangan beban rata-rata	11,69%	$\leq 1\%$	Tidak memenuhi standar
Ketidakseimbangan beban maksimum	13,19%	$\leq 1\%$	Tidak memenuhi standar
Ketidakseimbangan beban minimum	11,04%	$\leq 1\%$	Tidak memenuhi standar

TABEL II

ANALISIS KONDISI SISTEM DISTRIBUSI BERDASARKAN HASIL KETIDAKSEIMBANGAN BEBAN

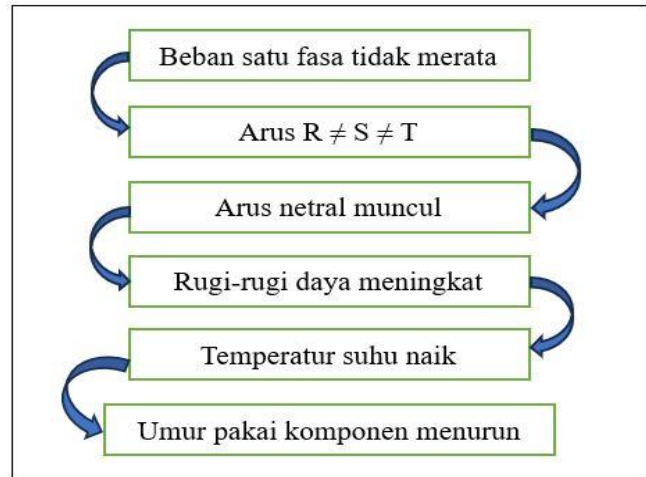
Selain membatasi nilai ketidakseimbangan, standar NEMA MG-1 juga menjelaskan bahwa ketidakseimbangan arus pada sistem tiga fasa dapat menyebabkan peningkatan arus pada salah satu lilitan motor secara tidak proporsional. Meskipun persentase ketidakseimbangan terlihat kecil, dampaknya terhadap kenaikan temperatur motor dapat menjadi jauh lebih besar. Kenaikan temperatur ini menyebabkan percepatan penurunan isolasi pada lilitan motor dan memperpendek umur operasional peralatan listrik. Dalam kondisi tertentu, motor dapat mengalami penurunan kemampuan kerja (derating) untuk menghindari kerusakan akibat panas berlebih [2], [4], [5], [7], [15].

Berdasarkan hasil pengukuran pada penelitian ini, fasa R memiliki nilai arus rata-rata tertinggi dibandingkan fasa lainnya, yaitu sebesar 1489,03 A, sedangkan fasa S memiliki arus rata-rata terendah sebesar 1228,23 A. Perbedaan arus yang cukup besar tersebut menunjukkan penyaluran beban antar fasa belum merata. Ketidakseimbangan ini menyebabkan salah satu fasa bekerja lebih berat sehingga meningkatkan rugi-rugi daya dan temperatur kerja pada sistem distribusi tenaga listrik. Kondisi tersebut sesuai dengan ciri-ciri ketidakseimbangan beban yang dijelaskan pada standar NEMA MG-1 [7].

Perbedaan arus yang mencolok ini mencerminkan distribusi beban pada sistem tenaga listrik yang belum merata. Faktor penyebabnya meliputi: Pembagian beban tidak proporsional di panel distribusi, Penambahan beban tanpa perencanaan matang, Variasi sifat mesin di setiap fasa.

Walaupun tegangan cenderung stabil, ketidakseimbangan arus tetap menimbulkan risiko

besar bagi kinerja sistem kelistrikan secara keseluruhan [3].



Gambar 7. Mekanisme Terjadinya Ketidakseimbangan Beban

Gambar 7 menunjukkan hubungan antara ketidakseimbangan beban dan penurunan umur pakai komponen secara konseptual.

C. Simulasi Penyeimbangan Beban Antar Fasa

Untuk menilai efek redistribusi beban satu fasa terhadap tingkat ketidakseimbangan sistem distribusi listrik di area produksi, simulasi penyeimbangan beban digunakan dengan menggunakan data jumlah mesin yang beroperasi dan arus nominal masing masing mesin. Kondisi awal menunjukkan bahwa operator menghubungkan mesin ke stop kontak yang tersedia tanpa mengetahui bahwa pembagian beban pada setiap fasa tidak dilakukan secara terencana.

Selain kondisi aktual, simulasi penyeimbangan beban dilakukan dengan mendistribusikan ulang mesin satu fasa antara fasa R, S, dan T sesuai dengan nilai arus nominalnya. Simulasi ini bertujuan untuk mencapai distribusi beban yang lebih seragam guna meminimalkan perbedaan arus antar fasa. Selama simulasi, jumlah mesin yang terhubung ke setiap fasa tidak selalu sama, karena distribusi beban ditentukan oleh jumlah arus yang dikonsumsi oleh setiap mesin, bukan oleh jumlah total mesin. Oleh karena itu, hasil simulasi diharapkan menghasilkan nilai arus rata-rata yang serupa di ketiga fasa, sehingga meminimalkan ketidakseimbangan beban.

Selanjutnya, hasil redistribusi beban digunakan untuk menghitung ulang besaran arus pada setiap fasa dan persentase ketidakseimbangan beban menggunakan metode National Electrical Manufacturers Association (NEMA). Nilai ketidakseimbangan yang disimulasikan dibandingkan dengan kondisi aktual untuk menentukan efektivitas penyeimbangan beban dalam mengurangi ketidakseimbangan pada sistem distribusi listrik. Melalui simulasi ini, dimungkinkan untuk mengidentifikasi potensi perbaikan yang dapat dicapai tanpa meningkatkan kapasitas daya atau mengganti peralatan, tetapi hanya dengan mengatur ulang

distribusi beban antar fase untuk meningkatkan keandalan dan efisiensi sistem distribusi listrik (NEMA MG-1, 2009; Kraikitrat, Ruangsinchaiwanich dan Phaengkio, 2023).

HARI 1												
sebelum penyeimbangan												
mesin	jumlah mesin	Jenis Mesin	Arus masing 2 mesin	Jumlah mesin						Total arus masing 2 fasa		
			R	S	T	r	s	t				
61	65	Mesin Jahit single needle	15	21	315	19	285	21	315	315	285	315
59	65	Mesin Jahit double needle	15	20	300	19	285	20	300	300	285	300
56	60	Mesin Jahit obras	15	21	315	17	255	18	270	315	255	270
54	60	Mesin Jahit fusing	15	21	315	15	225	18	270	315	225	270
12	15	Mesin Jahit PLK	15	5	75	4	60	3	45	75	60	45
12	15	Blower PLK	8.3	5	41.5	4	33.2	3	25	41.5	33.2	24.9
10	15	Mini Boiler Ironing	13.5	4	54	4	54	2	27	54	54	27
10	15	blower ironing	8.3	4	33.2	4	33.2	2	17	33.2	33.2	16.6
1	1	Blower	8.3	1	8.3	0	0	0	0	8.3	0	0
2	2	Blower fusing	8.3	2	16.6	0	0	0	0	16.6	0	0
277	313		104	1474	86	1230	87	1263	1474	1230	1263	
% unbalance												
11.29												

sesudah penyeimbangan												
mesin	jumlah mesin	Jenis Mesin	Arus masing 2 mesin	Jumlah mesin						Total arus masing 2 fasa per		
			R	S	T	r	s	t				
61	65	Mesin Jahit single needle	15	21	315	20	300	20	300	315	300	300
59	65	Mesin Jahit double needle	15	20	300	19	285	20	300	300	285	300
56	60	Mesin Jahit obras	15	18	270	19	285	19	285	270	285	285
54	60	Mesin Jahit fusing	15	18	270	18	270	18	270	270	270	270
12	15	Mesin Jahit PLK	15	4	60	4	60	4	60	60	60	60
12	15	Blower PLK	8.3	4	33.2	4	33.2	4	33	33.2	33.2	33.2
10	15	Mini Boiler Ironing	13.5	4	54	3	40.5	3	41	54	40.5	40.5
10	15	blower ironing	8.3	4	33.2	3	24.9	3	24.9	33.2	24.9	24.9
1	1	Blower Industri	8.3	1	8.3	0	0	0	0	8.3	0	0
2	2	Blower fusing	8.3	0	0	2	16.6	0	0	16.6	0	0
277	313		93	1335	92	1315	92	1322	1335	1315	1322	
% unbalance												
0.85												

Gambar 8. Tabel Simulasi Penyeimbangan Beban Pada Hari

Pada hari pertama hasil simulasi sebelum penyeimbangan menunjukkan arus total sebesar 1473A pada fasa R, 1230A pada fasa S, dan 1268A pada fasa T dengan nilai ketidakseimbangan beban sebesar 11,29%. Nilai ini hampir sama dengan pengukuran lapangan sebesar 11,69%, sehingga simulasi di anggap mampu menunjukkan kondisi sistem distribusi yang sebenarnya. Setelah dilakukan redistribusi beban dengan memindahkan beberapa mesin dari fasa yang memiliki beban tinggi ke fasa yang memiliki beban rendah arus menjadi lebih merata, yaitu 1335A pada fasa R, 1315A pada fasa S, dan 1322A pada fasa T. Kondisi ini menurunkan nilai ketidakseimbangan beban menjadi 0,85%.

HARI 2												
sebelum penyeimbangan												
mesin	jumlah mesin	Jenis Mesin	Arus masing 2 mesin	Jumlah mesin						Total arus masing 2 fasa per hari		
			R	S	T	r	s	t				
61	65	Mesin Jahit single needle	15	21	315	19	285	21	315	315	285	315
59	65	Mesin Jahit double needle	15	22	330	17	255	20	300	330	255	300
56	60	Mesin Jahit obras	15	20	300	18	270	18	270	300	270	270
57	60	Mesin Jahit fusing	15	21	315	18	270	18	270	315	270	270
12	15	Mesin Jahit PLK	15	5	75	3	45	4	60	75	45	60
12	15	Blower PLK	8.3	5	41.5	3	24.9	4	33.2	41.5	24.9	33.2
10	15	Mini Boiler Ironing	13.5	5	67.5	3	40.5	2	27	67.5	40.5	27
10	15	blower ironing	8.3	5	41.5	3	24.9	2	16.6	41.5	24.9	16.6
1	1	Blower industri	8.3	1	8.3	0	0	0	0	8.3	0	0
2	2	Blower fusing	8.3	0	0	1	8.3	1	8.3	0	8.3	8.3
280	313		105	1494	85	1224	90	1300	1494	1224	1300	
% unbalance												
11.55												

sesudah penyeimbangan												
mesin	jumlah mesin	Jenis Mesin	Arus masing 2 mesin	Jumlah mesin						Total arus masing 2 fasa per hari		
			R	S	T	r	s	t				
61	65	Mesin Jahit single needle	15	21	315	20	300	20	300	315	300	300
59	65	Mesin Jahit double needle	15	20	300	19	285	20	300	300	285	300
56	60	Mesin Jahit obras	15	18	270	19	285	19	285	270	285	285
57	60	Mesin Jahit fusing	15	19	285	19	285	19	285	285	285	285
12	15	Mesin Jahit PLK	15	4	60	4	60	4	60	60	60	60
12	15	Blower PLK	8.3	4	33.2	4	33.2	4	33.2	33.2	33.2	33.2
10	15	Mini Boiler Ironing	13.5	4	54	3	40.5	3	40.5	54	40.5	40.5
10	15	blower ironing	8.3	4	33.2	3	24.9	3	24.9	33.2	24.9	24.9
1	1	Blower industri	8.3	0	0	1	8.3	1	8.3	0	8.3	8.3
2	2	Blower fusing	8.3	0	0	1	8.3	1	8.3	0	8.3	8.3
280	313		94	1350	93	1330	93	1337	1350	1330	1337	
% unbalance												
0.84												

Gambar 9. Tabel Simulasi Penyeimbangan Beban Pada Hari Kedua

Pada hari kedua, kondisi awal menunjukkan arus total 1494A pada fasa R, 1224A pada fasa S, dan 1300A pada fasa T dengan nilai ketidakseimbangan sebesar 11,55%. Setelah penyeimbangan beban dilakukan, arus total menjadi 1350A pada fasa R, 1330A pada fasa S, dan 1337A pada fasa T. Sehingga nilai ketidakseimbangan turun menjadi 0,84%.

Kemudian perhitungan pada hari berikutnya menggunakan metode yang sama seperti pada penyeimbangan hari pertama dan hari kedua.

D. Dampak terhadap Kerusakan Komponen

Berdasarkan data kerusakan peralatan pada Bab III, teridentifikasi beragam jenis kerusakan yang terkait dengan ketidakseimbangan beban, seperti:

- Motor menjadi panas secara cepat
- Pembakaran kumparan motor
- MCB sering nge-trip
- Kontaktor rusak akibat panas
- Panel listrik mengalami pemanasan berlebih

Contoh kasus spesifik dari gambar 2.3 tabel data kerusakan mesin :

- Mesin jahit single needle: 14 insiden motor panas cepat
- Blower ironing: 12 kasus overload motor
- Mini boiler: 8 kasus elemen pemanas putus

Ketidakseimbangan arus membebani salah satu fasa secara berlebihan, sehingga menaikkan suhu operasional komponen. Akibatnya, isolasi cepat rusak

dan masa pakai peralatan listrik berkurang drastis. Selain menyebabkan overheating, kondisi tersebut juga meningkatkan kemungkinan terjadinya trip pada MCB, kerusakan kontaktor, serta penurunan umur pakai peralatan listrik sehingga menyebabkan terhambatnya proses produksi. [5]

Frekuensi kerusakan komponen yang tinggi digunakan sebagai indikator adanya percepatan penurunan umur pakai akibat ketidakseimbangan beban.

E. Perbandingan Dengan Standar NEMA

Menurut standar NEMA dan IEEE, ambang batas ketidakseimbangan beban yang diperbolehkan hanya sekitar 1% [11], [14]

Nilai ketidakseimbangan dari penelitian ini sebesar 11.69%, yang berarti:

- Melampaui jauh batas aman
- Dikategorikan sebagai kondisi berbahaya.

Situasi ini berpotensi menimbulkan:

- Penurunan efisiensi keseluruhan sistem
- Kerusakan pada elemen elektrikal
- Hambatan dalam proses produksi

F. Pembahasan

Ketidakseimbangan beban rata-rata 11,69%, menandakan adanya masalah krusial pada sistem kelistrikan area produksi terkait distribusi beban antar fasa. Beban yang tidak seimbang memaksa satu fasa bekerja ekstra, sehingga menimbulkan kerugian daya lebih besar dan peningkatan suhu peralatan.

Efek konkret terlihat dari maraknya kerusakan mesin produksi, khususnya pada motor listrik dan perangkat proteksi. Hal ini membuktikan hubungan langsung antara ketidakseimbangan beban dengan penurunan keandalan dan daya tahan komponen elektrikal pada area produksi.[12]

Hasil penelitian menunjukkan bahwa ada beberapa metode teknis yang dapat digunakan untuk mengurangi ketidakseimbangan beban. Ini termasuk melakukan redistribusi beban antar fasa secara berkala, mengevaluasi pembagian beban pada panel distribusi utama, dan menerapkan sistem pemantauan digital yang beroperasi secara real-time. Selain itu, gangguan harus segera diidentifikasi melalui inspeksi rutin terhadap panel distribusi, sambungan kabel, dan perangkat proteksi. Untuk menjaga sistem distribusi tenaga listrik industri berfungsi dengan baik, maintenance preventif harus dilakukan secara teratur.

Solusi yang direkomendasikan mencakup:

- Penyeimbangan kembali beban antar fasa
- Penilaian ulang distribusi beban di panel MDP dan SDP
- Pemantauan rutin arus serta tegangan
- Penyusunan jadwal pemeliharaan preventif

Penerapan rekomendasi ini diharapkan dapat menstabilkan sistem kelistrikan dan memperpanjang umur pakai peralatan.

IV. PENUTUP

A. Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian dan analisis ketidakseimbangan beban pada sistem tiga fasa yang telah dilakukan menggunakan metode NEMA, maka dapat diambil beberapa kesimpulan sebagai berikut:

Berdasarkan perhitungan yang dilakukan menggunakan metode NEMA, ketidakseimbangan beban berkisar antara 11% hingga 13% diamati selama periode pemantauan 30 hari. Nilai ini menunjukkan bahwa distribusi beban pada setiap tahap tidak seimbang dan melebihi batas toleransi sebesar 1% menurut standar NEMA; oleh karena itu, sistem diklasifikasikan sebagai tidak seimbang.

Distribusi beban antar fasa menunjukkan bahwa fasa R memiliki beban terbesar, sedangkan fasa S memiliki beban terkecil, sehingga menjadi penyebab utama terjadinya ketidakseimbangan.

Hasil simulasi penyeimbangan beban menunjukkan bahwa tingkat ketidakseimbangan beban berhasil diturunkan dari rata-rata 11,69% menjadi 0,85%. Dengan nilai ketidakseimbangan dibawah batas toleransi yang direkomendasikan oleh NEMA yaitu 1%, penyeimbangan beban terbukti efektif dalam mencapai distribusi beban yang lebih merata dan meningkatkan keandalan sistem distribusi listrik.

Nilai ketidakseimbangan yang cukup tinggi berpotensi menimbulkan dampak negatif seperti:

- Pemanasan berlebih pada peralatan listrik
- Penurunan efisiensi sistem
- Mempercepat kerusakan isolasi
- Menurunkan umur peralatan

Ketidakseimbangan beban yang terjadi menunjukkan perlunya penataan ulang distribusi beban agar sistem dapat bekerja lebih optimal dan aman.

B. Saran

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

- 1) Perlu dilakukan redistribusi beban antar fasa untuk mengurangi perbedaan arus yang signifikan, terutama dengan mengurangi beban pada fasa R dan menambah beban pada fasa S.
- 2) Disarankan untuk melakukan monitoring beban secara berkala guna mengetahui perubahan kondisi sistem dan mencegah terjadinya ketidakseimbangan yang lebih besar.
- 3) Untuk penelitian selanjutnya, disarankan menggunakan metode yang lebih akurat seperti metode berbasis komponen simetris (sequence)

sesuai standar IEEE, dengan mempertimbangkan data sudut fasa.

- 4) Perlu dilakukan analisis lebih lanjut terhadap pengaruh ketidakseimbangan terhadap performa peralatan, khususnya motor listrik, agar dapat diketahui dampak secara lebih detail.
- 5) Disarankan penggunaan sistem monitoring berbasis digital atau IoT untuk mempermudah pengamatan kondisi beban secara real-time.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] W. D. Stevenson, *Analisis Sistem Tenaga Listrik*. Jakarta: Erlangga, 1984.
- [2] IEEE, *IEEE 446-1995 Recommended Practice for Emergency and Standby Power Systems for Industrial and*, vol. 1995. 2000.
- [3] R. C. Dugan, M. F. McGranaghan, S. Santoso, and H. W. Beaty, *Electrical Power Systems Quality*, 3rd ed. New York: McGraw-Hill, 2012.
- [4] S. J. Chapman, *ELECTRIC MACHINERY FUNDAMENTALS. FOURTH EDITION*. New York: McGraw-Hill, 2005.
- [5] A. A. R. Hilmi F. Ameen, Hayder A. Hamad, "Performance evaluation of different NEMA induction motor designs under unbalanced voltage," vol. 31, no. 4, pp. 158–171, 2024.
- [6] A. S. and M. H. Purnomo, "Three-phase electric motor isolation diagnosis modelling caused unbalance voltage using radial basis function network Three-phase electric motor isolation diagnosis modelling caused unbalance voltage using radial basis function network", doi: 10.1088/1742-6596/1517/1/012092.
- [7] NEMA-MG-1, "MOTOR AND GENERATOR," vol. 552, 2009.
- [8] P. Pillay and M. Manyage, "Definitions of Voltage Unbalance," no. May, pp. 50–51, 2001.
- [9] S. B. AIDIL KAMAL, "Analisa pengaruh ketidakseimbangan tegangan motor induksi 3 fasa menggunakan MATLAB Simulink," *Rang Teknik*, vol. 6, no. 2, pp. 167–175, 2023.
- [10] 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," vol. 3, no. 2, pp. 155–164, 2023.
- [11] ANSI / NEMA MG 1-2021, "Motors and Generators," *American National Standard(ANSI)*, 2024, [Online]. Available: www.nema.org
- [12] K. Kraikitrat, S. Ruangsinchaiwanich, and D. Phaengkiao, "Study of Unbalanced Voltage on Rotor Classes of Induction Motor According to NEMA Standard," vol. 18, no. 2, pp. 25–31, 2023.
- [13] P. F. M. Gonzalez-Longatt and J. L. Rueda, "Power-Factory Applications for Power System Analysis," p. 32, 2014.
- [14] Cooper C, *IEEE Recommended Practice for Electric Power Distribution for Industrial Plants*, vol. 2, no. 2. New York: IEEE Press, 1988. doi: 10.1049/pe:19880018.
- [15] IEC, *Low-voltage switchgear and controlgear –Part 2: Circuit-breakers*, 5.0., vol. 2005. switzerland, 2019.