



**PENILAIAN KETIDAKSEIMBANGAN TEGANGAN DAN ARUS LISTRIK PADA KAPAL
PENANGKAP IKAN PUKAT CINCIN YANG BEROPERASI DI LAUT NATUNA: STUDI
PERBANDINGAN BERDASARKAN IEEE Std 45-2002**

**ASSESSMENT OF VOLTAGE AND CURRENT IMBALANCE ON PURSE SEINE FISHING VESSELS
OPERATING IN THE NATUNA SEA: A COMPARATIVE STUDY BASED ON IEEE STD 45-2002**

**Bobby Demeianto*, Juniawan Preston Siahaan, M. Zaki Latif Abrori, Mula Tumpu, Aqshal Ilham
Fadiga, Taufan Mahendra, Akhyar Nasution, Mhd Riswan Pane**

Program Studi Permesinan Kapal, Politeknik Kelautan dan Perikanan Dumai
Jl. Wan Amir, No. 1, Kel. Pangkalan Sesai, Kecamatan Dumai Barat, Kota Dumai, Provinsi Riau, Indonesia

*Korespondensi: bobby.demeianto@gmail.com (B Demeianto)

Diterima 20 Januari 2025 – Disetujui 28 April 2025

ABSTRAK. Meskipun kajian mengenai ketidakseimbangan tegangan dan arus dalam sistem kelistrikan telah banyak dilakukan, penelitian yang secara khusus menyoroti kondisi tersebut pada kapal penangkap ikan, khususnya di wilayah Perairan Natuna, masih sangat terbatas. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis ketidakseimbangan tegangan dan arus listrik pada generator kapal penangkap ikan pukat cincin (*purse seine*) yang beroperasi di Laut Natuna berdasarkan standar IEEE Std 45-2002 dan BKI Volume IV tahun 2022. Metode penelitian menggunakan pendekatan kuantitatif dengan pengukuran langsung nilai tegangan (*line-to-line* dan *phase-to-neutral*) serta arus listrik pada panel induk lima sampel kapal penangkap ikan. Standa acuan untuk nilai ketidakseimbangan tegangan/*Line Voltage Unbalance Tolerance* (%LVUT) menurut standar IEEE std 45-2002 adalah $\leq 3\%$ dan nilai ketidakseimbangan arus listrik menurut standar BKI Volume IV tahun 2022 adalah $\leq 15\%$. Hasil penelitian menunjukkan bahwa nilai rata-rata ketidakseimbangan tegangan pada kelima kapal berada di bawah batas toleransi IEEE ($\leq 3\%$), dengan nilai tertinggi 4,34% pada KM. Palembang Indah II. Sementara itu, ketidakseimbangan arus secara umum memenuhi batas BKI ($\leq 15\%$), kecuali KM. Rezeki Bersama yang menunjukkan ketidakseimbangan arus tertinggi sebesar 30,48%. Temuan ini mengindikasikan perlunya mitigasi berupa penyesuaian distribusi beban dan balancing antar fasa, khususnya pada kapal dengan ketidakseimbangan signifikan. Penelitian ini memberikan kontribusi praktis dalam meningkatkan keandalan sistem kelistrikan kapal serta keselamatan operasional di sektor perikanan laut Indonesia.

KATA KUNCI: Kapal penangkap ikan purse seine, ketidakseimbangan arus listrik, ketidakseimbangan tegangan

ABSTRACT. Although numerous studies have been conducted on voltage and current imbalance in electrical systems, research specifically focusing on these conditions in fishing vessels, particularly those operating in the Natuna Sea, remains very limited. This study aims to analyze the voltage and current imbalance on the generators of purse seine fishing vessels operating in the Natuna Sea, based on the IEEE Std 45-2002 and BKI Volume IV Year 2022 standards. A quantitative approach was employed, involving direct measurements of voltage (both *line-to-line* and *phase-to-neutral*) and current at the main distribution panels of five fishing vessels. The reference standard for *Line Voltage Unbalance Tolerance* (%LVUT) according to IEEE Std 45-2002 is $\leq 3\%$, while the acceptable limit for current imbalance according to BKI Volume IV Year 2022 is $\leq 15\%$. The results showed that the average voltage imbalance across the five vessels was below the IEEE tolerance limit ($\leq 3\%$), with the highest recorded value being 4.34% on KM. Palembang Indah II. Meanwhile, current imbalance generally complied with the BKI limit ($\leq 15\%$), except for KM. Rezeki Bersama, which exhibited the highest current imbalance at 30.48%. These findings highlight the need for mitigation measures, such as load redistribution and phase balancing, particularly on vessels with significant imbalance levels. This study provides practical contributions to improving the reliability of vessel electrical systems and enhancing operational safety within Indonesia's marine fisheries sector.

KEYWORDS: Current Imbalance, purse seine fishing vessel, voltage imbalance

1. Pendahuluan

Salah satu wilayah penangkapan ikan terpenting di Indonesia adalah Laut Natuna, yang dikenal memiliki keanekaragaman spesies ikan yang tinggi dan menjadi target utama dalam kegiatan penangkapan ikan untuk tujuan komersi (Wibowo *et al.*, 2023). Sebagian besar kapal penangkap ikan yang melakukan operasi penangkapan ikan di wilayah laut Natuna merupakan kapal penangkap ikan dengan alat tangkap purse seine, dimana alat tangkap purse seine merupakan salah satu alat tangkap yang memiliki nilai efektifitas yang tinggi dalam proses penangkapan ikan (Mardiah *et al.*, 2024). Purse seine termasuk kategori alat tangkap aktif, di mana proses penangkapannya dilakukan dengan mengelilingi gerombolan ikan menggunakan jaring besar, kemudian bagian bawah jaring ditarik dengan tali penjerat (*purseline*) untuk menutup dan menjebak ikan di dalamnya (Setya, 2023). Pengoperasian alat tangkap purse seine di Perairan Natuna melibatkan beberapa tahapan penting, dimulai dari pelayaran menuju lokasi penangkapan, pemasangan rumpon sebagai alat bantu untuk mengumpulkan ikan, serta penurunan sekoci yang dilengkapi lampu guna menarik gerombolan ikan. Proses penangkapan terdiri dari dua tahap utama, yaitu setting (penurunan dan pelingkaran jaring) dan hauling (penarikan jaring), yang umumnya dilakukan pada malam hari untuk meningkatkan efektivitas penangkapan. Setelah jaring berhasil dinaikkan, ikan dikumpulkan dan diambil menggunakan serok bertenaga gardan, kemudian disimpan dalam palka berisi air dingin guna menjaga kualitas hasil tangkapan (Ikhsan *et al.*, 2022).

Keselamatan kerja di laut tidak hanya ditentukan oleh kondisi kapal, kompetensi awak kapal, maupun kelengkapan peralatan keselamatan, tetapi juga sangat bergantung pada kesiapan seluruh sistem pendukung operasional, termasuk pesawat bantu seperti generator. Generator memegang peranan penting dalam menjamin kontinuitas suplai daya listrik untuk berbagai kebutuhan di atas kapal, mulai dari penerangan, sistem navigasi, hingga pengoperasian alat tangkap dan mesin bantu lainnya. Oleh karena itu, kondisi teknis dan kesiapan operasional generator harus dipastikan optimal, baik sebelum keberangkatan maupun selama pelayaran, guna menjamin keselamatan dan kelancaran kegiatan penangkapan ikan di laut (Pramesthy *et al.*, 2024).

Dalam konteks operasional kapal penangkap ikan, kualitas daya listrik (*power quality*) yang dihasilkan oleh generator memiliki peran krusial dalam menjaga keandalan sistem kelistrikan kapal (Choirawan *et al.*, 2023). Salah satu isu penting yang kerap terjadi adalah ketidakseimbangan tegangan dan arus (*voltage and current unbalance*) pada sistem tiga fasa. Ketidakseimbangan ini tidak hanya menurunkan efisiensi kinerja motor induksi dan perangkat kelistrikan lainnya, tetapi juga dapat menyebabkan peningkatan suhu, getaran, serta kerusakan dini pada generator dan peralatan bantu kelistrikan lainnya, perlu diperhatikan bahwa adanya ketidakseimbangan tegangan dapat memicu munculnya ketidakseimbangan arus, atau bahkan memperparah kondisi ketidakseimbangan arus yang sudah ada. Setiap peningkatan 1% pada ketidakseimbangan tegangan berpotensi menyebabkan ketidakseimbangan arus sebesar 6% hingga 10% (Kurniawan *et al.*, 2024). Sejalan dengan itu, standar kelistrikan yang berlaku di industri perkapalan menegaskan pentingnya menjaga parameter ketidakseimbangan dalam batas yang diperbolehkan. Biro Klasifikasi Indonesia (BKI) melalui peraturan Volume IV tahun 2019 dan 2022, serta *The Institute of Electrical and Electronics Engineers* (IEEE) dalam IEEE Std. 45-2002, mengamanatkan bahwa dalam kondisi operasional normal, ketidakseimbangan arus antar fasa tidak boleh melebihi 15%, dan toleransi ketidakseimbangan tegangan dibatasi pada 3%. Oleh karena itu, pemantauan dan analisis terhadap ketidakseimbangan tegangan dan arus menjadi bagian penting dalam strategi perawatan preventif guna memastikan keamanan, efisiensi, dan umur panjang sistem kelistrikan kapal (Demeianto *et al.*, 2023).

Meskipun kajian mengenai ketidakseimbangan tegangan dan arus dalam sistem kelistrikan telah banyak dilakukan, penelitian yang secara khusus menyoroti kondisi tersebut pada kapal penangkap ikan, khususnya di wilayah Perairan Natuna, masih sangat terbatas. Sebagian besar studi terdahulu lebih terfokus pada instalasi kelistrikan darat atau tipe kapal lain, sehingga kurang merepresentasikan karakteristik operasional kapal penangkap ikan. Di sisi lain, sebagian besar penelitian yang ada belum secara sistematis mengacu pada standar IEEE Std. 45-2002 dalam mengevaluasi ketidakseimbangan

tegangan dan arus. Padahal, standar tersebut memberikan pedoman teknis penting terkait desain dan pengoperasian sistem kelistrikan kapal.

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk melakukan analisis ketidakseimbangan tegangan dan arus listrik pada generator listrik kapal penangkap ikan yang beroperasi di sekitar wilayah laut Natuna. Secara spesifik, penelitian ini bertujuan untuk mengidentifikasi dan menganalisis tingkat ketidakseimbangan tegangan dan arus pada sistem kelistrikan kapal penangkap ikan Purse Seine di laut Natuna, membandingkan hasil analisis dengan standar IEEE Std 45-2002 untuk menentukan sejauh mana praktik yang ada sesuai dengan pedoman internasional dan memberikan rekomendasi untuk mitigasi ketidakseimbangan yang teridentifikasi, guna meningkatkan efisiensi dan keandalan sistem kelistrikan pada kapal penangkap ikan. Penelitian ini diharapkan dapat mengisi kekosongan tersebut dengan memberikan analisis yang komprehensif serta membandingkannya dengan standar yang berlaku, sehingga tidak hanya memperkaya kajian akademis tetapi juga memberikan kontribusi nyata bagi peningkatan efisiensi dan keselamatan operasional di sektor perikanan laut Indonesia.

2. Metode Penelitian

2.1 Alat dan Bahan

Alat dan bahan yang digunakan pada penelitian ini adalah *Clamp Meter / Tang Ampere* dan lembar kerja pengukuran untuk mencatat nilai tegangan dan arus listrik fasa R, S, T dan N pada panel induk atau *Main Distribution Panel* (MDP) pada sampel Kapal Penangkap Ikan Purse Seine / Pukat Cincin yang berlayar di sekitar wilayah laut Natuna.

2.2 Tinjauan Pustaka

Beberapa penelitian terdahulu telah banyak membahas permasalahan kualitas daya listrik yang berfokus pada ketidakseimbangan tegangan dan ketidakseimbangan arus listrik, diantaranya (Dewi *et al.*, 2021) dalam penelitiannya menganalisis timbulnya arus netral pada trafo distribusi dan menemukan bahwa ketidakseimbangan arus dapat menyebabkan kerugian daya yang signifikan. Penemuan ini relevan untuk sistem kelistrikan kapal, di mana arus netral yang tinggi dapat merusak generator. (Mufizar A. R. *et al.*, 2021) menemukan bahwa ketidakseimbangan beban dapat menyebabkan kerugian daya dan arus netral yang tinggi, yang berdampak negatif pada pelanggan distribusi. (Wijaya *et al.*, 2021) melakukan analisis mitigasi ketidakseimbangan tegangan dan arus di institusi pendidikan dan menunjukkan bahwa penerapan metode mitigasi dapat secara signifikan mengurangi ketidakseimbangan dan meningkatkan efisiensi energi. (Popa *et al.*, 2021) membahas ketidakseimbangan arus dan tegangan pada beban nonlinier di sektor residensial dan pendidikan, yang dapat diterapkan pada sistem kelistrikan kapal. (Cuong *et al.*, 2022) menunjukkan bahwa ketidakseimbangan tegangan dapat mempengaruhi kinerja transformator tiga fase. Hasil ini relevan untuk sistem kelistrikan kapal yang pada umumnya menggunakan generator dan transformator untuk distribusi daya. (Choirawan *et al.*, 2023) meneliti gangguan undervoltage dalam instalasi jaringan listrik kapal dan menemukan bahwa ketidakseimbangan tegangan dapat menyebabkan gangguan serius pada operasi kapal. Penelitian ini menekankan pentingnya menjaga keseimbangan tegangan untuk operasi yang aman. (Kurniawan *et al.*, 2024) dalam penelitian mereka menemukan bahwa ketidakseimbangan tegangan dapat mempengaruhi suplai listrik untuk aktivitas di gedung pendidikan. Meskipun fokusnya bukan pada kapal, hasilnya menunjukkan pentingnya pemantauan ketidakseimbangan untuk menghindari kerugian energi.

a. Ketidakseimbangan Tegangan

Berdasarkan IEEE std 45-2002, Ketidakseimbangan tegangan saluran pada sistem tiga fasa didefinisikan sebagai selisih antara tegangan *line to line* tertinggi dan terendah yang terukur. Nilai ini digunakan sebagai indikator tingkat ketidakseimbangan dalam sistem, yang secara signifikan dapat memengaruhi kinerja peralatan listrik serta efisiensi distribusi daya secara keseluruhan. *Line Voltage Unbalance Tolerance* (%LVUT) dapat diterjemahkan dengan rumus:

$$\%LVUT = \frac{E_{maximum} - E_{minimum}}{E_{Nominal}} \times 100 \dots\dots\dots (1)$$

Dimana:

- %LVUT = Nilai presentase ketidakseimbangan tegangan (%)
 $E_{maximum}$ = Nilai Tegangan line (tegangan fasa-fasa) tertinggi (Volt)
 $E_{minimum}$ = Nilai Tegangan line (tegangan fasa-fasa) terendah (Volt)
 $E_{nominal}$ = Nilai Tegangan line (tegangan fasa-fasa) rekomendasi (Volt), 380-400 Volt.

b. Ketidakseimbangan Arus

Menurut (Ektianto & Darwanto, 2021) kriteria suatu sistem kelistrikan 3 fasa dapat dikatakan seimbang apabila:

- Ketiga vektor arus dari masing-masing fasa (R, S, T) mempunyai nilai yang sama besar.
- Perbedaan sudut dari ketiga vektor fasa adalah masing-masing berbeda 120° .

Ketidakseimbangan sistem dapat terjadi apabila terdapat perbedaan pada salah satu atau seluruh fasa dalam sebuah generator atau transformator tiga fasa. Ketidakseimbangan tersebut dapat diidentifikasi melalui perbedaan nilai vektor arus atau tegangan, serta perbedaan sudut fasa dari masing-masing fasa (Sari, 2018). Berdasarkan analisis vektor, terdapat tiga kemungkinan kondisi yang menunjukkan ketidakseimbangan dalam sistem tiga fasa, yaitu:

- Arus pada fasa R, S, dan T memiliki besar vektor yang sama, namun sudut antar fasa tidak membentuk sudut 120° .
- Sudut antar fasa telah sesuai, yakni 120° , tetapi terdapat perbedaan nilai vektor antara fasa R, S, dan T.
- Terdapat ketidaksesuaian baik dalam nilai vektor arus/tegangan maupun sudut antar fasa, yang tidak memenuhi konfigurasi sudut 120° (Sari, 2018).

Jika suatu sumber tegangan listrik menyalurkan daya sebesar P melalui sistem distribusi dengan konfigurasi empat kawat, termasuk penghantar netral, dan arus listrik pada masing-masing fasa (R, S, dan T) memiliki besar yang seragam selama proses distribusi, maka besaran daya listrik tersebut dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$P = 3 \times V \times I \times \cos \varphi \dots\dots\dots (2)$$

Dimana:

- P = Daya Aktif (Watt)
 V = Tegangan (Volt)
 I = Arus (Ampere)
 $\cos \varphi$ = Faktor Daya

Jika I adalah nilai arus fasa dalam situasi seimbang pada daya listrik sebesar P , maka dalam situasi di mana arus pada setiap fasa (I_R , I_S , I_T) tidak seimbang, kita dapat mengungkapkannya dengan menggunakan koefisien a , b , c dengan rumus sebagai berikut:

$$I_{rata-rata} = \frac{I_R + I_S + I_T}{3} \dots\dots\dots (3)$$

$$I_R = a \cdot I \text{ dimana } a = \frac{I_R}{I_{rata-rata}} \dots\dots\dots (4)$$

$$I_S = b \cdot I \text{ dimana } b = \frac{I_S}{I_{rata-rata}} \dots\dots\dots (5)$$

$$I_T = c \cdot I \text{ dimana } c = \frac{I_T}{I_{rata-rata}} \dots\dots\dots (6)$$

Dalam situasi seimbang di mana nilai arus pada setiap fasa adalah sama, nilai koefisien a , b , dan c akan sama, yaitu $a = b = c = 1$. Jika demikian, total nilai $a + b + c$ akan sama dengan 3. Untuk menghitung persentase ketidakseimbangan beban, dapat digunakan rumus sebagai berikut (Ektianto & Darwanto, 2021):

$$\%TS = \frac{\{|a-1|+|b-1|+|c-1|\}}{3} \times 100\% \dots\dots\dots (7)$$

Dimana: %TS = Persentase rata-rata ketidakseimbangan Arus Listrik (%)

2.3 Metode



Gambar 1 Diagram Alir Penelitian.

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif, di mana data diperoleh melalui hasil pengukuran langsung nilai tegangan dan arus listrik pada panel induk (Main Distribution Panel) kapal penangkap ikan. Hasil pengukuran tersebut kemudian dihitung untuk memperoleh nilai ketidakseimbangan tegangan dan ketidakseimbangan arus listrik, yang selanjutnya dibandingkan dengan standar *Line Voltage Unbalance Tolerance* (%LVUT) yang dikeluarkan oleh IEEE Std 45-2002 serta standar ketidakseimbangan arus listrik yang ditetapkan oleh BKI Volume IV tahun 2022. Objek penelitian ini terdiri dari lima unit kapal penangkap ikan dengan alat tangkap pukat cincin (purse seine) yang beroperasi di wilayah Laut Natuna.

Pengumpulan data dilakukan dalam rentang waktu antara bulan Oktober 2022 hingga Maret 2023. Parameter yang diukur meliputi nilai tegangan antar fasa (line-to-line), tegangan fasa-ke-netral (phase-to-neutral), serta arus listrik masing-masing fasa (R, S, dan T), menggunakan alat ukur berupa clamp meter (tang ampere) dan lembar kerja pencatatan manual.

Setelah data diperoleh, dilakukan perhitungan nilai ketidakseimbangan tegangan menggunakan rumus *Line Voltage Unbalance Tolerance* (%LVUT) dengan batas nilai toleransi adalah 3% sesuai ketentuan IEEE Std 45-2002. Sementara itu, ketidakseimbangan arus listrik dihitung berdasarkan selisih nilai arus antar fasa, kemudian dibandingkan dengan batas toleransi yang ditetapkan oleh BKI Volume IV tahun 2022, yaitu maksimum 15%. Hasil perhitungan persentase ketidakseimbangan tegangan dan arus ini menjadi dasar untuk menilai kesesuaian performa sistem kelistrikan kapal terhadap standar yang berlaku. Selanjutnya, dilakukan analisis penilaian risiko dengan mengkaji tingkat penyimpangan nilai ketidakseimbangan terhadap standar, mengidentifikasi dampak potensial terhadap keandalan sistem kelistrikan, serta merumuskan rekomendasi tindakan mitigasi yang diperlukan. Upaya mitigasi meliputi strategi redistribusi beban antar fasa dan balancing beban pada saat operasional, guna mengurangi ketidakseimbangan yang terjadi. Dengan metode ini, penelitian diharapkan mampu memberikan gambaran empiris mengenai tingkat ketidakseimbangan tegangan dan arus listrik pada kapal penangkap ikan yang menjadi objek studi. Hasil analisis yang diperoleh dari tahapan ini menjadi dasar dalam mengevaluasi kesesuaian sistem kelistrikan kapal terhadap standar yang berlaku, serta dalam merumuskan strategi mitigasi yang diperlukan untuk meningkatkan keandalan dan efisiensi operasional kapal di masa mendatang.

3. Hasil dan Pembahasan

3.1 Data Kapal Penangkap Ikan

Sampel objek penelitian ini adalah lima kapal penangkap ikan yang melakukan operasi penangkapan ikan di sekitar wilayah laut Natuna. Kapal-kapal tersebut bersala dari dua daerah yang berbeda yaitu tiga kapal berasal dari daerah Tanjung Balai Asahan Provinsi Sumatera Utara dan dua kapal berasal dari daerah Batam provinsi Kepulauan Riau. Kelima kapal tersebut merupakan kapal penangkap ikan dengan alat tangkap pukat cincin atau purse seine.

Tabel 1. Data Kapal Penangkap Ikan.

NO	NAMA KAPAL	ASAL DAERAH	UKURAN KAPAL	KAP. GENERATOR	TEGANGAN GENERATOR	BEBAN TERPASANG
1	KM. Rezeki Bersama	Tanjung Balai Asahan, SUMUT	198 GT	300 kVA	415 V	285 kW
2	KM. Palembang Indah II	Tanjung Balai Asahan, SUMUT	120 GT	300 kVA	415 V	123 kW
3	KM. Mulia Anugerah	Tanjung Balai Asahan, SUMUT	88 GT	120 kVA	380 V	78,5 kW
4	KM. Sumber Indah	Batam, Kep. Riau	70 GT	185 kVA	400 V	100 kW
5	KM. Sumber Mandiri	Batam, Kep. Riau	198 GT	250 kVA	380 V	136 kW

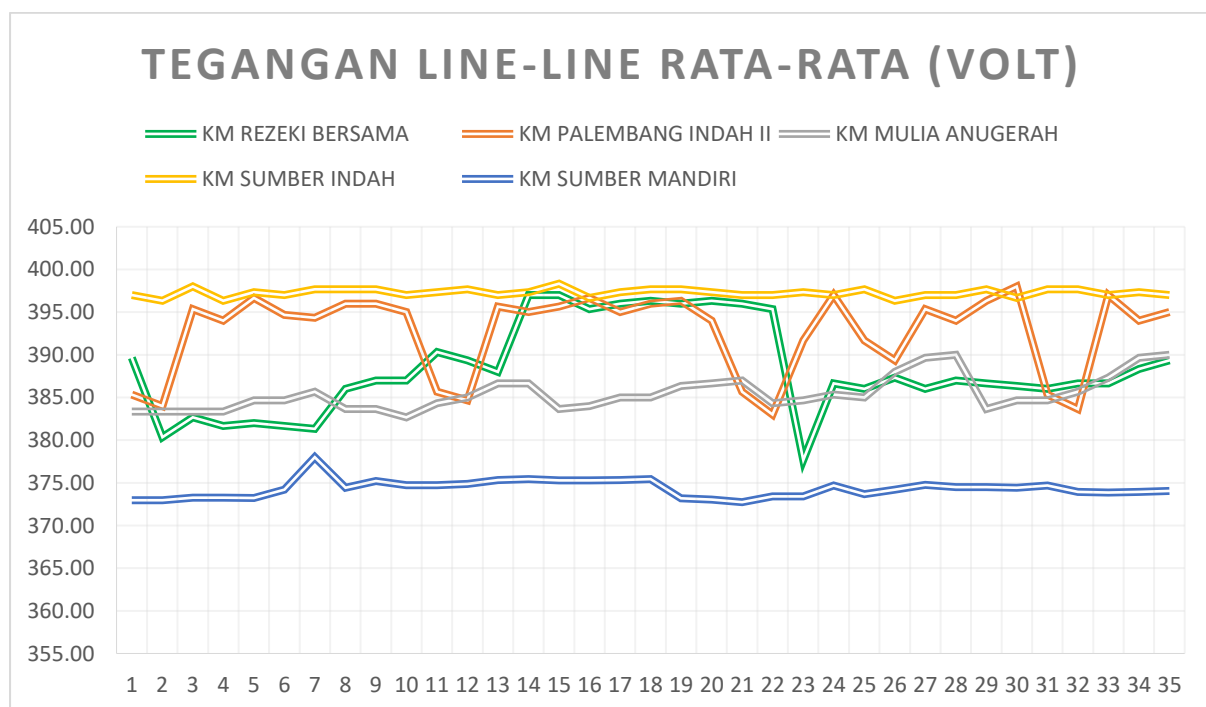
Tabel 1 menyajikan data deskriptif dari lima unit kapal penangkap ikan purse seine yang menjadi objek penelitian. Kapal-kapal tersebut beroperasi di wilayah perairan sekitar Laut Natuna dan berasal dari dua daerah utama, yaitu Tanjung Balai Asahan (Sumatera Utara) dan Batam (Kepulauan Riau). Ukuran kapal dinyatakan dalam *Gross Tonnage* (GT), dengan rentang ukuran dari 70 GT hingga 198 GT. Masing-masing kapal dilengkapi dengan generator sebagai catu daya listrik utama. Kapasitas daya keluaran generator dinyatakan dalam satuan kilovolt-ampere (kVA), dengan nilai berkisar antara 120 kVA

hingga 300 kVA. Tegangan nominal output generator setiap kapal bervariasi antara 380 V hingga 415 V, yang menunjukkan adanya perbedaan konfigurasi sistem kelistrikan antar kapal. Beban terpasang pada masing-masing kapal juga tercatat, dengan nilai tertinggi sebesar 285 kW dan terendah sebesar 78,5 kW. Data pengukuran kelistrikan dikumpulkan selama periode tertentu yang berbeda untuk setiap kapal, dengan rentang waktu pengambilan data berkisar antara bulan Oktober 2022 hingga Maret 2023. Informasi ini menjadi dasar dalam analisis lebih lanjut terkait performa sistem kelistrikan dan efisiensi distribusi daya pada kapal penangkap ikan.

3.2 Data Besaran Listrik KM. Pulau Pinang

Pengambilan data besaran listrik pada sampel lima kapal penangkap ikan purse seine yang beroperasi di sekitar wilayah laut Natuna dilakukan sebanyak tiga puluh lima kali pengambilan data nilai tegangan dan arus listrik pada setiap kapal. Pengukuran dilaksanakan dengan mengukur nilai tegangan phase to Neutral, tegangan line to line dan nilai arus line pada setiap fasa (fasa R, S, dan T). Hasil dari pengukuran tersebut kemudian dapat digunakan untuk mendapatkan nilai rata-rata tegangan line to line, nilai rata-rata tegangan phase to neutral, nilai rata-rata arus line, nilai daya semu pada generator kapal, nilai ketidakseimbangan arus listrik dan nilai ketidakseimbangan tegangan.

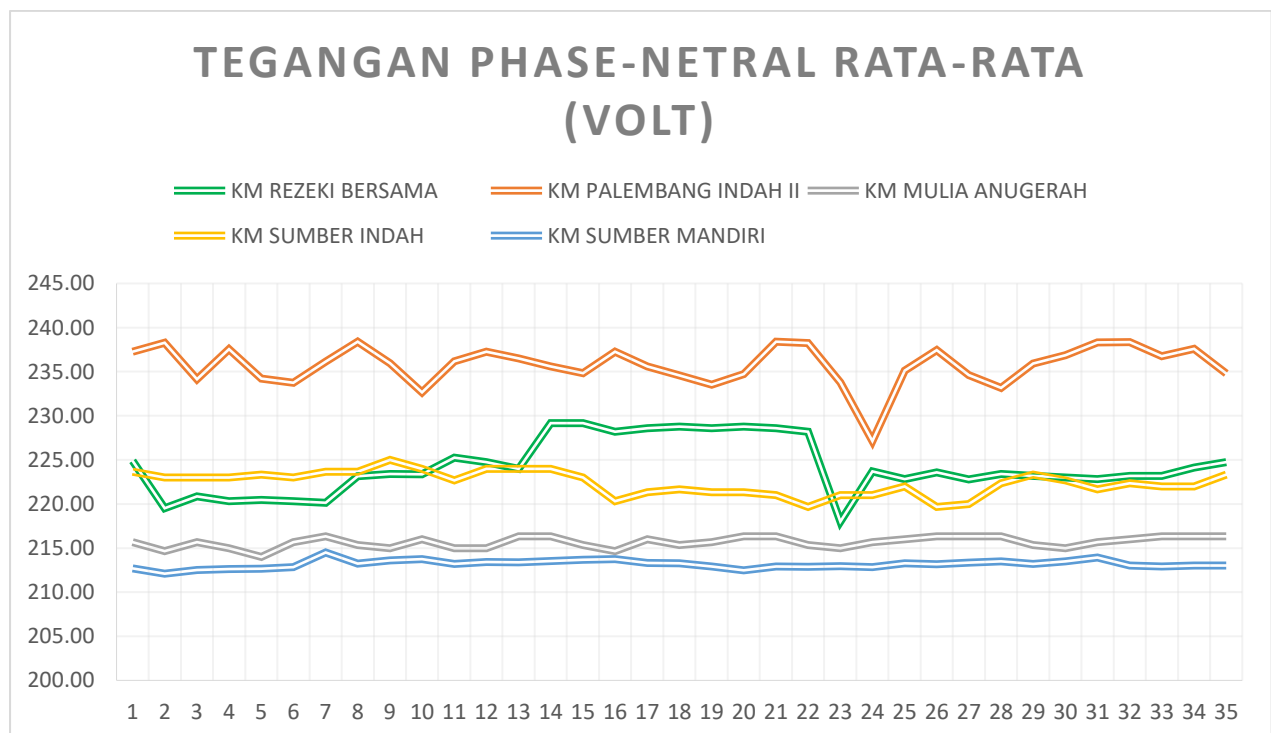
Gambar 2 merupakan grafik nilai rata-rata tegangan line to line pada generator kapal penangkap ikan. KM Rezeki Bersama yang diwakili garis berwarna hijau pada grafik memiliki nilai rata-rata tegangan line to line yang tercatat selama periode pengamatan adalah 388,37 Volt dengan standar deviasi sebesar 5,4 Volt, yang menunjukkan tingkat variasi tegangan relatif rendah terhadap nilai rata-ratanya. Nilai tegangan tertinggi yang diamati mencapai 397 Volt, sedangkan nilai terendah tercatat sebesar 377,67 Volt. Hasil ini mengindikasikan bahwa tegangan listrik cenderung stabil selama periode pengamatan dengan fluktuasi nilai tegangan berkisar 0,75% - 5,75% di bawah tegangan nominal generator.



Gambar 2. Grafik Nilai Rata-Rata Tegangan Line to Line.

KM Palembang Indah II yang diwakili garis berwarna merah pada grafik memiliki nilai rata-rata tegangan line to line yang tercatat selama periode pengamatan adalah 392,66 Volt dengan standar deviasi sebesar 4,72 Volt, yang menunjukkan tingkat variasi tegangan relatif rendah terhadap nilai rata-ratanya. Nilai tegangan tertinggi yang diamati mencapai 398 Volt, sedangkan nilai terendah tercatat sebesar 383 Volt. Hasil ini mengindikasikan bahwa tegangan listrik cenderung stabil selama periode

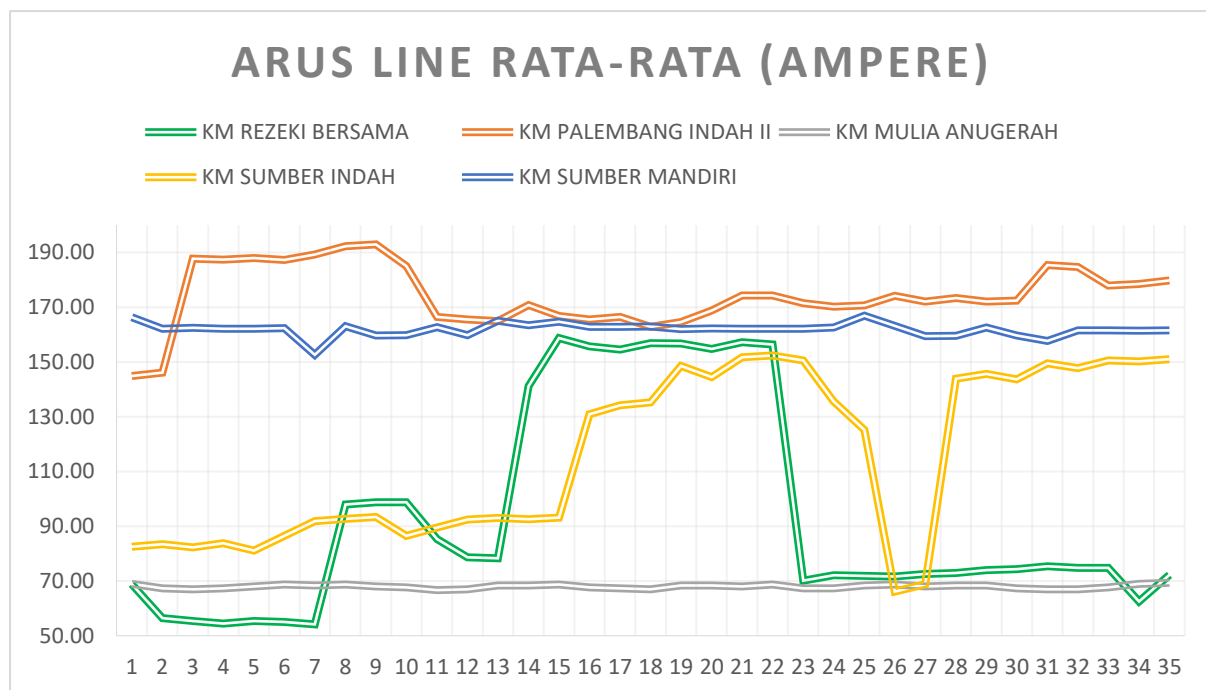
pengamatan dengan fluktuasi nilai tegangan berkisar 4,09% - 7,71% di bawah tegangan nominal generator. KM Mulia Anugerah yang diwakili garis berwarna abu-abu pada grafik memiliki nilai rata-rata tegangan line to line yang tercatat selama periode pengamatan adalah 385,47 Volt dengan standar deviasi sebesar 2,04 Volt, yang menunjukkan tingkat variasi tegangan relatif rendah terhadap nilai rata-ratanya. Nilai tegangan tertinggi yang diamati mencapai 390 Volt, sedangkan nilai terendah tercatat sebesar 382,67 Volt. Hasil ini mengindikasikan bahwa tegangan listrik cenderung stabil selama periode pengamatan dengan fluktuasi nilai tegangan berkisar 0,70% - 2,63% di atas tegangan nominal generator. KM Sumber Indah yang diwakili garis berwarna jingga pada grafik memiliki nilai rata-rata tegangan line to line yang tercatat selama periode pengamatan adalah 397,25 Volt dengan standar deviasi sebesar 0,47 Volt, yang menunjukkan tingkat variasi tegangan relatif rendah terhadap nilai rata-ratanya. Nilai tegangan tertinggi yang diamati mencapai 398,33 Volt, sedangkan nilai terendah tercatat sebesar 396,33 Volt. Hasil ini mengindikasikan bahwa tegangan listrik cenderung stabil selama periode pengamatan dengan fluktuasi nilai tegangan berkisar 0,42% - 0,92% di bawah tegangan nominal generator. KM Sumber Mandiri yang diwakili garis berwarna biru pada grafik memiliki nilai rata-rata tegangan line to line yang tercatat selama periode pengamatan adalah 374,31 Volt dengan standar deviasi sebesar 1,05 Volt, yang menunjukkan tingkat variasi tegangan relatif rendah terhadap nilai rata-ratanya. Nilai tegangan tertinggi yang diamati mencapai 378 Volt, sedangkan nilai terendah tercatat sebesar 372,73 Volt. Hasil ini mengindikasikan bahwa tegangan listrik cenderung stabil selama periode pengamatan dengan fluktuasi nilai tegangan berkisar 0,52% - 1,91% di bawah tegangan nominal generator.



Gambar 3. Grafik Nilai Rata-Rata Tegangan Phase-Netral.

Gambar 3 merupakan grafik nilai rata-rata tegangan phase-netral pada generator kapal penangkap ikan. KM Rezeki Bersama yang diwakili garis berwarna hijau pada grafik memiliki nilai rata-rata tegangan phase -netral yang tercatat selama periode pengamatan adalah 224,20 Volt dengan standar deviasi sebesar 3,11 Volt, yang menunjukkan tingkat variasi tegangan relatif rendah terhadap nilai rata-ratanya. Nilai tegangan tertinggi yang diamati mencapai 229,17 Volt, sedangkan nilai terendah tercatat sebesar 218 Volt. Hasil ini mengindikasikan bahwa tegangan listrik cenderung stabil selama periode pengamatan dengan fluktuasi nilai tegangan berkisar 0,36% - 5,22% di bawah tegangan nominal generator. KM Palembang Indah II yang diwakili garis berwarna merah pada grafik memiliki nilai rata-rata tegangan phase-netral yang tercatat selama periode pengamatan adalah 235,74 Volt dengan standar deviasi

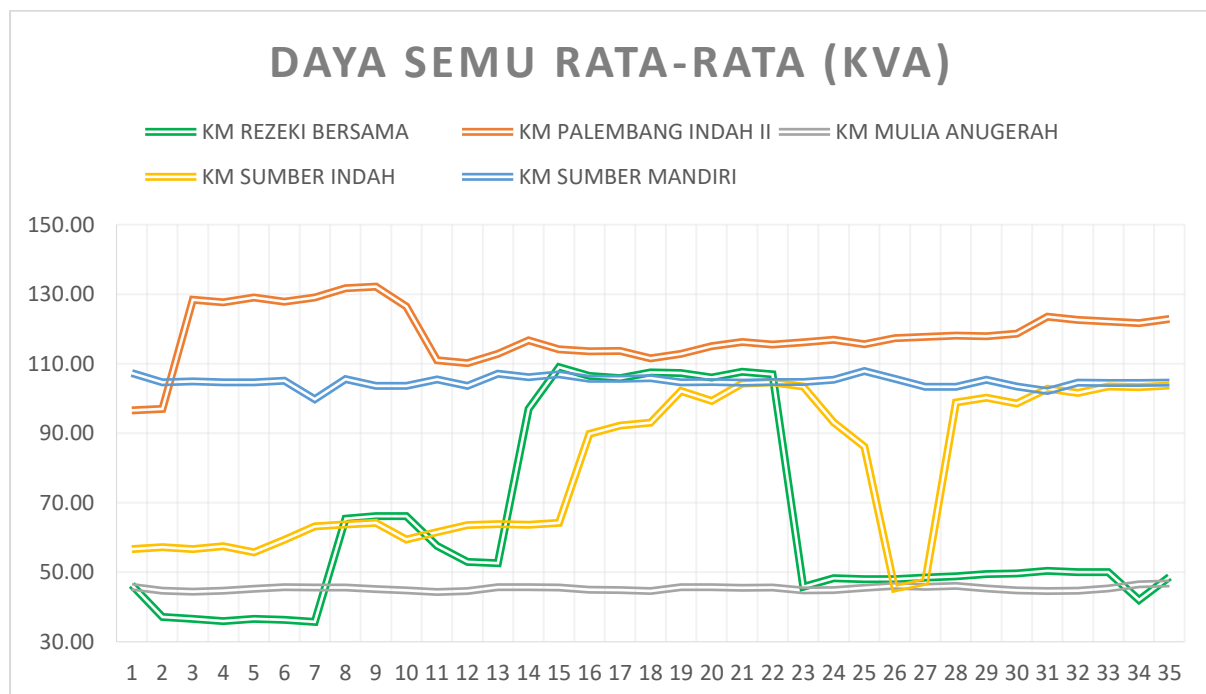
sebesar 2,26 Volt, yang menunjukkan tingkat variasi tegangan relatif rendah terhadap nilai rata-ratanya. Nilai tegangan tertinggi yang diamati mencapai 238,40 Volt, sedangkan nilai terendah tercatat sebesar 227,13 Volt. Hasil ini mengindikasikan bahwa tegangan listrik cenderung stabil selama periode pengamatan dengan fluktuasi nilai tegangan berkisar 0,66% - 5,36% di bawah tegangan nominal generator. KM Mulia Anugerah yang diwakili garis berwarna abu-abu pada grafik memiliki nilai rata-rata tegangan phase-netral yang tercatat selama periode pengamatan adalah 215,65 Volt dengan standar deviasi sebesar 0,63 Volt, yang menunjukkan tingkat variasi tegangan relatif rendah terhadap nilai rata-ratanya. Nilai tegangan tertinggi yang diamati mencapai 216,33 Volt, sedangkan nilai terendah tercatat sebesar 214 Volt. Hasil ini mengindikasikan bahwa tegangan listrik cenderung stabil selama periode pengamatan dengan fluktuasi nilai tegangan berkisar 1,66% - 2,73% di atas tegangan nominal generator. KM Sumber Indah yang diwakili garis berwarna jingga pada grafik memiliki nilai rata-rata tegangan phase-netral yang tercatat selama periode pengamatan adalah 222,37 Volt dengan standar deviasi sebesar 1,35 Volt, yang menunjukkan tingkat variasi tegangan relatif rendah terhadap nilai rata-ratanya. Nilai tegangan tertinggi yang diamati mencapai 225 Volt, sedangkan nilai terendah tercatat sebesar 219,67 Volt. Hasil ini mengindikasikan bahwa tegangan listrik cenderung stabil selama periode pengamatan dengan fluktuasi nilai tegangan berkisar 2,17% - 4,5% di bawah tegangan nominal generator. KM Sumber Mandiri yang diwakili garis berwarna biru pada grafik memiliki nilai rata-rata tegangan phase-netral yang tercatat selama periode pengamatan adalah 213,17 Volt dengan standar deviasi sebesar 0,47 Volt, yang menunjukkan tingkat variasi tegangan relatif rendah terhadap nilai rata-ratanya. Nilai tegangan tertinggi yang diamati mencapai 214,50 Volt, sedangkan nilai terendah tercatat sebesar 212,10 Volt. Hasil ini mengindikasikan bahwa tegangan listrik cenderung stabil selama periode pengamatan dengan fluktuasi nilai tegangan berkisar 2,5% - 3,6% di bawah tegangan nominal generator.



Gambar 4. Grafik Arus Line Rata-Rata.

Gambar 4 merupakan grafik nilai rata-rata arus line pada generator kapal penangkap ikan. KM Rezeki Bersama yang diwakili garis berwarna hijau pada grafik memiliki nilai rata-rata arus line yang tercatat selama periode pengamatan adalah 93,39 Ampere dengan standar deviasi sebesar 38,31 Ampere, yang menunjukkan tingkat variasi nilai arus yang cukup tinggi terhadap nilai rata-ratanya. Nilai rata-rata arus tertinggi yang diamati mencapai 158,73 Ampere, sedangkan nilai terendah tercatat sebesar 54,17 Ampere. KM Palembang Indah II yang diwakili garis berwarna merah pada grafik memiliki nilai rata-rata arus line yang tercatat selama periode pengamatan adalah 174,12 Ampere dengan standar

deviasi sebesar 11,40 Ampere, yang menunjukkan tingkat variasi nilai arus yang cukup tinggi terhadap nilai rata-ratanya. Nilai rata-rata arus tertinggi yang diamati mencapai 192,93 Ampere, sedangkan nilai terendah tercatat sebesar 144,87 Ampere. KM Mulia Anugerah yang diwakili garis berwarna abu-abu pada grafik memiliki nilai rata-rata arus line yang tercatat selama periode pengamatan adalah 67,94 Ampere dengan standar deviasi sebesar 0,70 Ampere, yang menunjukkan tingkat variasi nilai arus yang relative rendah terhadap nilai rata-ratanya. Nilai rata-rata arus tertinggi yang diamati mencapai 69,33 Ampere, sedangkan nilai terendah tercatat sebesar 66,67 Ampere. KM Sumber Indah yang diwakili garis berwarna jingga pada grafik memiliki nilai rata-rata arus line yang tercatat selama periode pengamatan adalah 115,73 Ampere dengan standar deviasi sebesar 30,54 Ampere, yang menunjukkan tingkat variasi nilai arus yang cukup tinggi terhadap nilai rata-ratanya. Nilai rata-rata arus tertinggi yang diamati mencapai 152,37 Ampere, sedangkan nilai terendah tercatat sebesar 66,13 Ampere. KM Sumber Mandiri yang diwakili garis berwarna biru pada grafik memiliki nilai rata-rata arus line yang tercatat selama periode pengamatan adalah 161,86 Ampere dengan standar deviasi sebesar 2,47 Ampere, yang menunjukkan tingkat variasi nilai arus yang cukup tinggi terhadap nilai rata-ratanya. Nilai rata-rata arus tertinggi yang diamati mencapai 166,90 Ampere, sedangkan nilai terendah tercatat sebesar 152,60 Ampere.



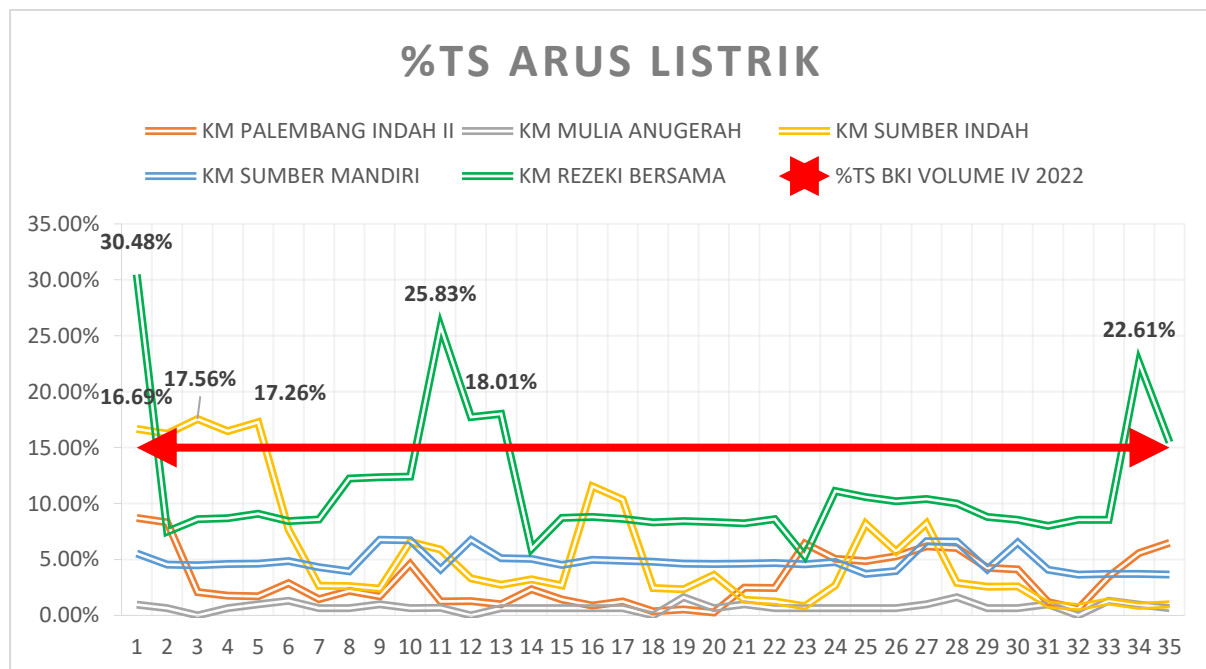
Gambar 5. Grafik Daya Semu Rata-Rata.

Gambar 5 merupakan grafik nilai rata-rata daya semu pada generator kapal penangkap ikan. KM Rezeki Bersama yang diwakili garis berwarna hijau pada grafik memiliki nilai daya semu rata-rata yang tercatat selama periode pengamatan adalah 63,06 kVA (21,02% kapasitas generator) dengan standar deviasi sebesar 26,78 kVA, yang menunjukkan tingkat variasi nilai daya semu yang cukup tinggi terhadap nilai rata-ratanya. Nilai rata-rata daya semu tertinggi yang diamati mencapai 109,02 kVA (36,4% kapasitas generator), sedangkan nilai terendah tercatat sebesar 35,73 kVA (11,9% kapasitas generator). KM Palembang Indah II yang diwakili garis berwarna merah pada grafik memiliki nilai daya semu rata-rata yang tercatat selama periode pengamatan adalah 118,30 kVA (39,43% kapasitas generator) dengan standar deviasi sebesar 8,22 kVA, yang menunjukkan tingkat variasi nilai daya semu yang cukup tinggi terhadap nilai rata-ratanya. Nilai rata-rata daya semu tertinggi yang diamati mencapai 132,17 kVA (44,06% kapasitas generator), sedangkan nilai terendah tercatat sebesar 96,57 kVA (32,19% kapasitas generator). KM Mulia Anugerah yang diwakili garis berwarna abu-abu pada grafik memiliki nilai daya semu rata-rata yang tercatat selama periode pengamatan adalah 45,31 kVA (37,76% kapasitas

generator) dengan standar deviasi sebesar 0,6 kVA, yang menunjukkan tingkat variasi nilai daya semu yang relatif rendah terhadap nilai rata-ratanya. Nilai rata-rata daya semu tertinggi yang diamati mencapai 46,78 kVA (38,98% kapasitas generator), sedangkan nilai terendah tercatat sebesar 44,33 kVA (36,94% kapasitas generator). KM Sumber Indah yang diwakili garis berwarna jingga pada grafik memiliki nilai daya semu rata-rata yang tercatat selama periode pengamatan adalah 79,54 kVA (42,99% kapasitas generator) dengan standar deviasi sebesar 20,99 kVA, yang menunjukkan tingkat variasi nilai daya semu yang cukup tinggi terhadap nilai rata-ratanya. Nilai rata-rata daya semu tertinggi yang diamati mencapai 104,65 kVA (56,7% kapasitas generator), sedangkan nilai terendah tercatat sebesar 54,34 kVA (24,51% kapasitas generator). KM Sumber Mandiri yang diwakili garis berwarna biru pada grafik memiliki nilai daya semu rata-rata yang tercatat selama periode pengamatan adalah 104,81 kVA (41,92% kapasitas generator) dengan standar deviasi sebesar 1,49 kVA, yang menunjukkan tingkat variasi nilai daya semu yang relative rendah terhadap nilai rata-ratanya. Nilai rata-rata daya semu tertinggi yang diamati mencapai 107,89 kVA (43,16% kapasitas generator), sedangkan nilai terendah tercatat sebesar 35,73 kVA (39,92% kapasitas generator).

3.3 Nilai Ketidakseimbangan Tegangan dan Ketidakseimbangan Arus listrik

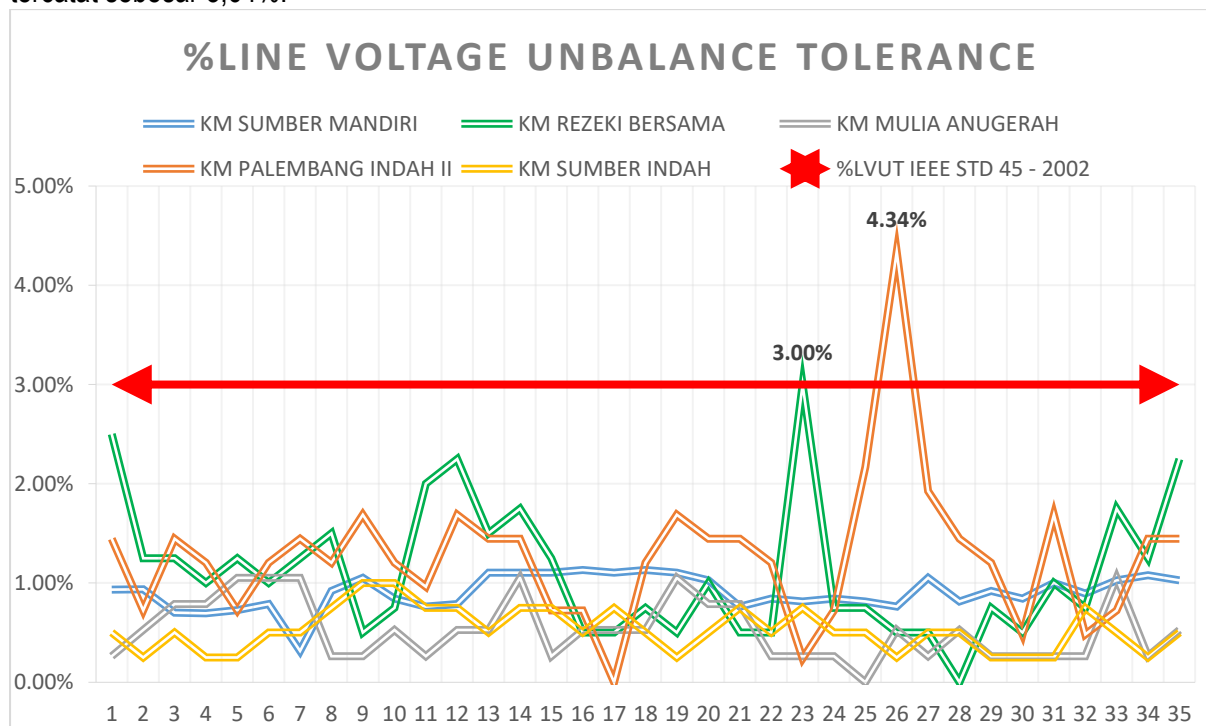
Pada tahap berikutnya hasil pengukuran nilai tegangan dan arus listrik akan menghasilkan nilai ketidakseimbangan tegangan dan ketidak seimbangan arus listrik dengan menggunakan persamaan 1 dan persamaan 7 untuk kemudian nilai yang didapat akan dibandingkan dengan standar IEEE Std 45-2002 untuk nilai *Line Voltage Unbalance Tolerance (LVUT)* yaitu maksimal 3% dan standar BKI Volume IV tahun 2019 dan 2022 untuk nilai ketidakseimbangan arus listrik atau *unbalance current* yaitu maksimal 15%. Standar ini memberikan pedoman mengenai batasan ketidakseimbangan yang diizinkan dalam sistem kelistrikan kapal. Dengan membandingkan data yang diperoleh dengan standar ini, penelitian ini bertujuan untuk menilai sejauh mana kapal-kapal purse seine di Natuna mematuhi pedoman yang telah ditetapkan.



Gambar 6. Grafik Nilai Ketidakseimbangan Arus Listrik.

Gambar 6 merupakan grafik nilai rata-rata presentase ketidakseimbangan arus listrik pada generator kapal penangkap ikan. Garis panah merah merupakan nilai toleransi maksimal presentase ketidakseimbangan arus listrik yang dikeluarkan oleh BKI Volume IV tahun 2019 & 2022 yaitu sebesar 15%. KM Rezeki Bersama yang diwakili garis berwarna hijau pada grafik memiliki nilai presentase

ketidakseimbangan arus listrik rata-rata yang tercatat selama periode pengamatan adalah 11,20% dengan standar deviasi sebesar 5,52%. Nilai rata-rata ketidakseimbangan arus listrik tertinggi yang diamati mencapai 30,48%, sedangkan nilai terendah tercatat sebesar 5,30%. KM Palembang Indah II yang diwakili garis berwarna merah pada grafik memiliki nilai presentase ketidakseimbangan arus listrik rata-rata yang tercatat selama periode pengamatan adalah 3,15% dengan standar deviasi sebesar 2,35%. Nilai rata-rata ketidakseimbangan arus listrik tertinggi yang diamati mencapai 8,71%, sedangkan nilai terendah tercatat sebesar 0,26%. KM Mulia Anugerah yang diwakili garis berwarna abu-abu pada grafik memiliki nilai presentase ketidakseimbangan arus listrik rata-rata yang tercatat selama periode pengamatan adalah 0,74% dengan standar deviasi sebesar 0,38%. Nilai rata-rata ketidakseimbangan arus listrik tertinggi yang diamati mencapai 1,63%, sedangkan nilai terendah tercatat sebesar 0,00%. KM Sumber Indah yang diwakili garis berwarna jingga pada grafik memiliki nilai presentase ketidakseimbangan arus listrik rata-rata yang tercatat selama periode pengamatan adalah 5,59% dengan standar deviasi sebesar 5,40%. Nilai rata-rata ketidakseimbangan arus listrik tertinggi yang diamati mencapai 17,56%, sedangkan nilai terendah tercatat sebesar 0,75%. KM Sumber Mandiri yang diwakili garis berwarna biru pada grafik memiliki nilai presentase ketidakseimbangan arus listrik rata-rata yang tercatat selama periode pengamatan adalah 4,82% dengan standar deviasi sebesar 0,96%. Nilai rata-rata ketidakseimbangan arus listrik tertinggi yang diamati mencapai 6,76%, sedangkan nilai terendah tercatat sebesar 3,64%.



Gambar 7. Grafik Nilai Line Voltage Unbalance Tolerance.

Gambar 7 merupakan grafik nilai rata-rata presentase ketidakseimbangan tegangan pada generator kapal penangkap ikan. Garis panah merah merupakan nilai toleransi maksimal presentase ketidakseimbangan tegangan yang dikeluarkan oleh IEEE std 45 - 2002 yaitu sebesar 3%. KM Rezeki Bersama yang diwakili garis berwarna hijau pada grafik memiliki nilai presentase ketidakseimbangan tegangan rata-rata yang tercatat selama periode pengamatan adalah 1,11% dengan standar deviasi sebesar 0,68%. Nilai rata-rata ketidakseimbangan tegangan tertinggi yang diamati adalah sebesar 3%, sedangkan nilai terendah tercatat sebesar 0,00%. KM Palembang Indah II yang diwakili garis berwarna merah pada grafik memiliki nilai presentase ketidakseimbangan tegangan rata-rata yang tercatat selama periode pengamatan adalah 1,27% dengan standar deviasi sebesar 0,72%. Nilai rata-rata ketidakseimbangan tegangan tertinggi yang diamati adalah sebesar 4,34%, sedangkan nilai terendah tercatat sebesar 0,00%. KM Mulia Anugerah yang diwakili garis berwarna abu-abu pada grafik memiliki

nilai presentase ketidakseimbangan tegangan rata-rata yang tercatat selama periode pengamatan adalah 0,53% dengan standar deviasi sebesar 0,31%. Nilai rata-rata ketidakseimbangan tegangan tertinggi yang diamati adalah sebesar 1,05%, sedangkan nilai terendah tercatat sebesar 0,00%. KM Sumber Indah yang diwakili garis berwarna jingga pada grafik memiliki nilai presentase ketidakseimbangan tegangan rata-rata yang tercatat selama periode pengamatan adalah 0,53% dengan standar deviasi sebesar 0,22%. Nilai rata-rata ketidakseimbangan tegangan tertinggi yang diamati adalah sebesar 1,00%, sedangkan nilai terendah tercatat sebesar 0,25%. KM Sumber Mandiri yang diwakili garis berwarna biru pada grafik memiliki nilai presentase ketidakseimbangan tegangan rata-rata yang tercatat selama periode pengamatan adalah 0,91% dengan standar deviasi sebesar 0,17%. Nilai rata-rata ketidakseimbangan tegangan tertinggi yang diamati adalah sebesar 1,13%, sedangkan nilai terendah tercatat sebesar 0,32%.

Ketidakseimbangan tegangan dan arus listrik pada sistem kelistrikan kapal penangkap ikan dapat terjadi akibat beberapa faktor teknis dan operasional. Salah satu penyebab utama adalah distribusi beban yang tidak merata antar fasa pada sistem tiga fasa, yang umum terjadi akibat perbedaan konsumsi daya oleh peralatan listrik yang terhubung ke masing-masing fasa. Di atas kapal, beban sering kali berubah-ubah tergantung waktu operasi dan jenis peralatan yang digunakan, misalnya penggunaan winch, pompa, dan lampu penarik ikan yang tidak serentak dioperasikan pada setiap fasa. Selain itu, kondisi koneksi terminal generator dan kualitas konduktor antar fasa yang tidak identik (misalnya akibat korosi atau umur kabel yang berbeda) juga dapat menyebabkan perbedaan impedansi antar fasa, yang akhirnya memicu ketidakseimbangan tegangan. Dalam beberapa kasus, ketidakseimbangan tegangan juga dapat memperparah ketidakseimbangan arus karena menghasilkan perbedaan daya tarik elektromagnetik pada motor-motor induksi yang digunakan, sehingga arus yang ditarik menjadi tidak seragam antar fasa (Kurniawan *et al.*, 2024). Penelitian oleh Demeianto *et al.* (2023) menunjukkan bahwa adanya variasi beban operasional di kapal seperti mesin bantu, alat tangkap, dan penerangan, turut menyumbang pada ketidakseimbangan arus antar fasa. Selain itu, posisi instalasi peralatan dan panjang kabel dari panel ke beban juga dapat menyebabkan beda tegangan antar fasa yang tidak seragam. Menurut Ektianto & Darwanto (2021), dalam kondisi ketidakseimbangan beban, arus netral yang tinggi akan muncul dan berdampak langsung terhadap panas lebih pada penghantar netral serta menurunkan efisiensi energi. Ketidakseimbangan ini juga berdampak pada keausan dini komponen generator serta menimbulkan getaran dan kebisingan berlebih (Sari, 2018).

3.4 *Penilaian Resiko Ketidakseimbangan Tegangan dan Arus Listrik*

Penelitian ini bertujuan untuk membandingkan nilai ketidakseimbangan tegangan dan arus listrik yang terukur pada generator dari lima unit kapal penangkap ikan terhadap batas toleransi yang ditetapkan dalam IEEE Std 45-2002 dan BKI Volume IV Tahun 2022. Hasil analisis ketidakseimbangan pada masing-masing unit generator kapal kemudian disajikan dalam bentuk tabel penilaian risiko. Penilaian risiko dilakukan dengan mengkaji sejauh mana ketidakseimbangan tegangan dan arus listrik yang terjadi, dibandingkan dengan standar yang berlaku. Ketidakseimbangan yang melebihi batas yang diperkenankan dapat menyebabkan berbagai dampak negatif, seperti peningkatan rugi daya, penurunan umur pakai peralatan listrik, serta risiko gangguan operasi sistem secara keseluruhan. Oleh karena itu, diperlukan analisis yang sistematis untuk mengidentifikasi tingkat risiko berdasarkan besarnya penyimpangan dari standar, dampak potensial yang mungkin terjadi, serta rekomendasi tindakan mitigasi yang diperlukan.

Berdasarkan hasil analisis di atas, secara garis besar didapatkan bahwa rata-rata nilai ketidakseimbangan tegangan dan arus listrik pada kelima kapal tersebut sudah cukup baik. Namun, perlu adanya mitigasi dan perhatian khusus pada kapal KM. Rezeki Bersama yang tercatat memiliki nilai ketidakseimbangan arus yang cukup tinggi dalam beberapa pengukuran.

Tabel 2. Penilaian Nilai Ketidakseimbangan Arus Listrik.

NO	NAMA KAPAL	NILAI %TS	STANDAR ACUAN	NILAI RESIKO	DAMPAK	MITIGASI
1	KM Rezeki Bersama	Nilai Rata-rata: 11,20% Nilai Tertinggi : 30,48% Nilai Terendah : 5,30%	≤15% (BKI Vol IV, 2022)	Tinggi	Arus Netral tinggi, Panas pada penghantar netral, Rugi-rugi daya yang tinggi	Penyesuaian distribusi beban antar fasa pada Instalasi Tiga Fasa, Balancing Beban antar fasa saat pengoperasian beban listrik
2	KM Palembang Indah II	Nilai Rata-rata: 3,15% Nilai Tertinggi : 8,71% Nilai Terendah : 0,26%	≤15% (BKI Vol IV, 2022)	Rendah	Timbul Arus Netral pada penghantar Netral	Balancing Beban antar fasa saat pengoperasian beban listrik
3	KM Mulia Anugerah	Nilai Rata-rata: 0,74% Nilai Tertinggi : 1,63% Nilai Terendah : 0,00%	≤15% (BKI Vol IV, 2022)	Rendah	Timbul Arus Netral pada penghantar Netral	Balancing Beban antar fasa saat pengoperasian beban listrik
4	KM Sumber Indah	Nilai Rata-rata: 5,59% Nilai Tertinggi : 17,56% Nilai Terendah : 0,75%	≤15% (BKI Vol IV, 2022)	Sedang	Arus Netral tinggi, Panas pada penghantar netral, Rugi-rugi daya yang tinggi	Penyesuaian distribusi beban antar fasa pada Instalasi Tiga Fasa, Balancing Beban antar fasa saat pengoperasian beban listrik
5	KM Sumber Mandiri	Nilai Rata-rata: 4,82% Nilai Tertinggi : 6,76% Nilai Terendah : 3,64%	≤15% (BKI Vol IV, 2022)	Rendah	Timbul Arus Netral pada penghantar Netral	Balancing Beban antar fasa saat pengoperasian beban listrik

Tabel 3. Penilaian Nilai Ketidakseimbangan Tegangan.

NO	NAMA KAPAL	NILAI %LVUT	STANDAR ACUAN	NILAI RESIKO	DAMPAK	MITIGASI
1	KM Rezeki Bersama	1. Nilai Rata-rata: 1,11% 2. Nilai Tertinggi : 3,00% 3. Nilai	≤3% (IEEE std 45-2002)	Sedang	Dapat menghasilkan atau memperbesar ketidakseimbangan arus listrik	Pengecekan impedansi pada penghantar setiap fasa, Balancing Beban antar fasa saat pengoperasian beban listrik

NO	NAMA KAPAL	NILAI %LVUT	STANDAR ACUAN	NILAI RESIKO	DAMPAK	MITIGASI
2	KM Palembang Indah II	Terendah : 0,00% 1. Nilai Rata-rata: 1,27% 2. Nilai Tertinggi : 4,34% 3. Nilai Terendah : 0,00%	≤3% (IEEE std 45-2002)	Sedang	Dapat menghasilkan atau memperbesar ketidakseimbangan arus listrik	Pengecekan impedansi pada penghantar setiap fasa, Balancing Beban antar fasa saat pengoperasian beban listrik
3	KM Mulia Anugerah	1. Nilai Rata-rata: 0,53% 2. Nilai Tertinggi : 1,05% 3. Nilai Terendah : 0,00%	≤3% (IEEE std 45-2002)	Rendah	Dapat menghasilkan atau memperbesar ketidakseimbangan arus listrik	Balancing Beban antar fasa saat pengoperasian beban listrik
4	KM Sumber Indah	1. Nilai Rata-rata: 0,53% 2. Nilai Tertinggi : 1,00% 3. Nilai Terendah : 0,25%	≤3% (IEEE std 45-2002)	Rendah	Dapat menghasilkan atau memperbesar ketidakseimbangan arus listrik	Balancing Beban antar fasa saat pengoperasian beban listrik
5	KM Sumber Mandiri	1. Nilai Rata-rata: 0,91% 2. Nilai Tertinggi : 1,13% 3. Nilai Terendah : 0,32%	≤3% (IEEE std 45-2002)	Rendah	Dapat menghasilkan atau memperbesar ketidakseimbangan arus listrik	Balancing Beban antar fasa saat pengoperasian beban listrik

Temuan dalam penelitian ini sejalan dengan teori dasar sistem tiga fasa yang menyatakan bahwa ketidakseimbangan beban antar fasa dapat menyebabkan timbulnya arus netral yang tinggi, peningkatan rugi-rugi daya, serta penurunan efisiensi sistem kelistrikan (Ektianto & Darwanto, 2021; Sari, 2018). Hal ini didukung oleh studi Muflizar *et al.* (2021) yang menemukan bahwa ketidakseimbangan arus dalam sistem distribusi berdampak signifikan terhadap pemborosan energi dan gangguan operasional. Selain itu, Choirawan *et al.* (2023) dalam penelitiannya pada instalasi listrik kapal menyebutkan bahwa ketidakseimbangan tegangan dapat memicu gangguan undervoltage yang membahayakan keselamatan operasi kapal. Penelitian oleh Wijaya *et al.* (2021) juga memperlihatkan bahwa penerapan strategi mitigasi, seperti redistribusi beban antar fasa dan penggunaan sistem monitoring real-time, dapat secara signifikan menurunkan tingkat ketidakseimbangan dan meningkatkan keandalan sistem. Temuan Kurniawan *et al.* (2024) turut menegaskan bahwa setiap peningkatan 1% pada ketidakseimbangan tegangan dapat menyebabkan kenaikan 6% hingga 10% pada ketidakseimbangan arus. Oleh karena itu, langkah-langkah mitigasi yang diusulkan dalam penelitian ini memiliki dasar teoritis dan empiris yang kuat untuk diterapkan pada kapal penangkap ikan.

4. Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian terhadap lima unit kapal penangkap ikan yang beroperasi di Laut Natuna, dapat disimpulkan bahwa sebagian besar nilai ketidakseimbangan tegangan dan arus listrik yang terukur pada generator kapal telah memenuhi batas toleransi yang ditetapkan oleh IEEE Std 45-2002 dan BKI Volume IV Tahun 2022. Nilai ketidakseimbangan tegangan rata-rata pada seluruh kapal cenderung rendah dan stabil, dengan sebagian besar nilai berada di bawah batas toleransi 3%. Sementara itu, ketidakseimbangan arus listrik menunjukkan hasil yang bervariasi, dengan KM. Rezeki Bersama mencatat nilai ketidakseimbangan arus tertinggi, mencapai 30,48% pada pengukuran tertentu, yang melebihi batas toleransi 15%. Hal ini menunjukkan perlunya perhatian khusus dan penerapan strategi mitigasi, seperti redistribusi beban antar fasa dan pengecekan rutin sistem kelistrikan. Secara umum, hasil penelitian ini menegaskan pentingnya pemantauan berkala terhadap ketidakseimbangan sistem kelistrikan kapal guna meningkatkan keandalan operasional, mengurangi kerugian daya, serta mendukung keselamatan pelayaran dan kegiatan penangkapan ikan di wilayah perairan Indonesia.

Daftar Pustaka

- Biro Klasifikasi Indonesia. (2022). Rules For The Classification And Construction Of Ships: Volume Iv – Electrical Installations (Ed. 2022). Biro Klasifikasi Indonesia. Retrieved From <https://www.bki.co.id>
- Choirawan, B., Pujiyanto, F., & Luhur Pambudi, M. A. (2023). Analisis Gangguan Undervoltage Dalam Instalasi Jaringan Power Listrik Kapal. *Majalah Ilmiah Bahari Jogja*, 21(2), 19–30. <https://doi.org/10.33489/mibj.v21i2.327>
- Cuong, N. X., Tuan, L. A., & Do Nhu, Y. (2022). Effect Of Voltage Unbalances On The Performance Of A Three-Phase Transformer. *Iop Conference Series: Earth And Environmental Science*, 1111(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1111/1/012050>
- Demeianto, B., Mahendra, T., & Siahaan, Juniawan Preston Priharanto, Y. E. (2023). Analisa Korelasi Nilai Daya Semu Dan Pembebanan Arus Terhadap Ketidakseimbangan Tegangan Dan Arus Listrik Pada Generator Listrik Km. *Sumber Mandiri*. 5(2), 359–378.
- Dewi, A. Y., Effendi, A., & Syafar, F. M. (2021). Analisis Terjadinya Arus Netral Pada Trafo Distribusi 160 Kva. *Journal Of Electrical Power Control And Automation (Jepca)*, 4(1), 1. <https://doi.org/10.33087/jepca.v4i1.45>
- Ektianto, A. S. A., & Darwanto, A. (2021). Analisis Ketidak Seimbangan Beban Pada Transformator Distribusi Di Pt. Pln (Persero) Rayon Cepu. *Simetris*, 15(1), 35–42. <https://doi.org/10.51901/simetris.v15i01.179>
- Institute Of Electrical And Electronics Engineers. (2002). *Ieee Recommended Practice For Electrical Installations On Shipboard (Ieee Std 45-2002)*. Ieee.
- Ikhsan, S. A., Mardiah, R. S., Hutapea, R. Y. F., Djunaedi, Haris, R. B. K., & Arkham, M. N. (2022). Efektivitas Kerja Nelayan Pada Pengoperasian Alat Tangkap Puse Seine Dengan Pendekatan Full-Time Equivalent Di Kepulauan Riau. *Authentic Research Of Global Fisheries Application Journal*, 4(2), 155–162.
- Kurniawan, S. B., Fasihi, M., Andana, S. D., & Larasati, P. P. (2024). Analisis Assesment Pada Ketidakseimbangan Tegangan Terhadap Suplai Listrik Untuk Aktifitas Di Gedung Pendidikan. 16(1), 21–30.
- Mardiah, R. S., Hutapea, R. Y. F., Kelana, P. P., Ikhsan, S. A., Sari, R. P., Haris, R. B. K., & Tiku, M. (2024). Evaluasi Teknik Pengoperasian Puse Seine Pada Km. *Sumber Rezeki. Albacore Jurnal Penelitian Perikanan Laut*, 8(1), 099–108. <https://doi.org/10.29244/core.8.1.099-108>
- Mufizar A. R., Rudito H., & Idris A. R. (2021). Analisis Pengaruh Ketidakseimbangan Beban Terhadap Rugirugi Daya Dan Arus Netral Di Baloiya Kepulauan Selayar Serta Dampaknya Terhadap Pelanggan Distribusi. *Prosiding Seminar Nasional Teknik Elektro Dan Informatika (Sntei)*, September, 24–28.

- Popa, G. N., Iagăr, A., & Diniş, C. M. (2021). Considerations On Current And Voltage Unbalance Of Nonlinear Loads In Residential And Educational Sectors. *Energies*, 14(1). <https://doi.org/10.3390/en14010102>
- Pramesthy, T. D., Ikhsan, S. A., Fauzan, I., Krisnafi, Y., & Kelana, P. P. (2024). Analisis Keselamatan Kerja Pada Pengoperasian Alat Tangkap Purse Seine. *Journal Perikanan*, 14(1), 160–169. <https://doi.org/10.29303/Jp.V14i1.697>
- Sari, G. A. K. (2018). Analisa Pengaruh Ketidak Seimbangan Beban Terhadap Arus Netral Dan Losses Pada Trafo Distribusi Studi Kasus Pada Pt.Pln (Persero) Rayon Blora. Naskah Publikasi Teknik Elektro Universitas Muhammadiyah Surakarta, 1–14.
- Setya, D. (2023). Produktivitas Kapal Purse Seine Pelagis Kecil Km. Usaha Jaya Iii Yang Beroperasi Di Perairan Natuna. *Jurnal Marshela (Marine And Fisheries Tropical Applied Journal)*, 1(1), 1–5. <https://doi.org/10.25181/Marshela.V1i1.2983>
- Wibowo, D. S., Supriatna, A., & Tri Hewindati, Y. (2023). Analysis Of Compliance Level Of Fishing Activities In The Natuna Sea. *Torani Journal Of Fisheries And Marine Science*, 7(1), 17–29. <https://doi.org/10.35911/Torani.V7i1.29598>
- Wijaya, B. A., Handoko, S., & Zahra, A. (2021). Analisis Dan Perancangan Mitigasi Ketidakseimbangan Tegangan Dan Arus Di Poltekkes Semarang. *Transient*, 10(2), 319–326.

