

ANALISIS HARMONISA ARUS DAN TEGANGAN DARI *VARIABEL SPEED DRIVE (VSD)* TERHADAP PROFIL TEGANGAN DI JARINGAN DISTRIBUSI PT. PLN ULP TOMOHON MELALUI STUDI SIMULASI *SOFTWARE ETAP*

**Novitri Taroreh¹, Janne Deivy Tichoh², Viverdy Memah³, Fransiskus Seke⁴, Ridwan⁵,
Jocke Rapar⁶**

Universitas Negeri Manado¹²³⁴⁵⁶
e-mail: novitritaroreh053@email.ac.id

Diterima: 31/3/2026; Direvisi: 6/4/2026; Diterbitkan: 14/4/2026

ABSTRAK

Kualitas daya listrik merupakan faktor penting dalam menjaga keandalan dan efisiensi sistem tenaga listrik, terutama pada jaringan distribusi yang banyak menggunakan peralatan elektronika daya. Salah satu sumber utama distorsi harmonisa adalah penggunaan Variable Speed Drive (VSD) yang bersifat non-linear dan dapat menyebabkan bentuk gelombang arus maupun tegangan menjadi tidak sinusoidal. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis karakteristik harmonisa yang dihasilkan oleh VSD pada sistem distribusi PT. PLN ULP Tomohon, menentukan nilai Total Harmonic Distortion arus (THD-I) dan tegangan (THD-V), serta mengevaluasi efektivitas metode mitigasi menggunakan filter harmonisa pasif tipe single-tuned. Metode penelitian yang digunakan adalah pendekatan kuantitatif deskriptif melalui pemodelan dan simulasi sistem tenaga listrik menggunakan perangkat lunak ETAP. Data teknis sistem seperti kapasitas transformator, konfigurasi jaringan distribusi, dan parameter beban dimodelkan dalam bentuk Single Line Diagram (SLD) untuk dilakukan analisis harmonik menggunakan modul Harmonic Load Flow. Hasil simulasi menunjukkan bahwa pengoperasian VSD menghasilkan harmonisa dominan pada orde ke-5 dan ke-7 yang meningkatkan nilai THD pada sistem. Penerapan filter harmonisa pasif tipe single-tuned terbukti mampu menurunkan tingkat distorsi harmonisa secara signifikan sehingga nilai THD-I dan THD-V dapat mendekati atau memenuhi batas standar IEEE 519-2014. Dengan demikian, penerapan metode mitigasi yang tepat dapat meningkatkan kualitas daya, efisiensi energi, serta keandalan sistem tenaga listrik pada jaringan distribusi.

Kata kunci: *Harmonisa, Variable Speed Drive (VSD), ETAP, THD, Filter Single-Tuned.*

ABSTRACT

Power quality is a critical factor in maintaining the reliability and efficiency of modern power systems, particularly in distribution networks that extensively utilize power electronic equipment. One of the primary sources of harmonic distortion is the use of Variable Speed Drives (VSDs), which operate as non-linear loads and cause current and voltage waveforms to deviate from their ideal sinusoidal shape. This study aims to analyze the harmonic characteristics generated by VSDs in the distribution system of PT. PLN ULP Tomohon, determine the levels of Total Harmonic Distortion of current (THD-I) and voltage (THD-V), and evaluate the effectiveness of harmonic mitigation using a passive single-tuned harmonic filter. The research employs a descriptive quantitative approach through modeling and simulation of the power system using the Electrical Transient Analyzer Program (ETAP) software. Technical system data, including transformer capacity, distribution network configuration, and load parameters, are modeled in the form of a Single Line Diagram (SLD) and analyzed using the Harmonic Load Flow module. The simulation results indicate that VSD

operation produces dominant harmonics at the 5th and 7th orders, which significantly increase the THD levels within the system. The implementation of a passive single-tuned harmonic filter is shown to effectively reduce harmonic distortion, allowing the THD-I and THD-V values to approach or comply with the limits specified in the IEEE 519-2014 standard. Therefore, the application of appropriate harmonic mitigation methods can improve power quality, enhance energy efficiency, and increase the reliability of electrical power systems in distribution networks.

Keywords: *Harmonics, Variable Speed Drive (VSD), ETAP, THD, Single-Tuned Filter.*

PENDAHULUAN

Perkembangan teknologi elektronika daya yang sangat masif pada tahun 2026 ini telah mendorong pemanfaatan perangkat *variable speed drive* secara luas di berbagai sektor industri maupun penyedia layanan energi listrik untuk mengoptimalkan kinerja motor. Penggunaan perangkat kontrol kecepatan tersebut dianggap sebagai solusi paling mumpuni dalam meningkatkan efisiensi operasional serta memberikan fleksibilitas yang luar biasa terhadap pengaturan sistem penggerak tenaga listrik yang bersifat dinamis. Meskipun menawarkan segudang keuntungan teknis yang signifikan dalam hal penghematan energi, kehadiran komponen elektronika daya tersebut sebenarnya membawa implikasi teknis tersendiri yang perlu diantisipasi secara matang oleh para insinyur listrik di lapangan. Sebagai beban yang bersifat *non-linear*, perangkat penggerak ini secara inheren akan memicu munculnya fenomena distorsi harmonisa yang cukup kompleks pada seluruh jaringan sistem tenaga listrik yang terhubung secara terintegrasi (Peerzada et al., 2024; Siregar et al., 2022; Sofyan et al., 2023). Hal tersebut mengakibatkan bentuk gelombang arus maupun tegangan yang seharusnya bersih menjadi tidak lagi bersifat sinusoidal murni, melainkan mengalami cacat gelombang yang sangat merugikan bagi stabilitas komponen lainnya. Transformasi energi yang tidak sempurna ini menjadi titik awal munculnya berbagai masalah teknis yang menuntut pemahaman mendalam mengenai interaksi (Rahman & Maghfiroh, 2026; Setiawan et al., 2021; Wicaksono & Prabowo, 2022).

Secara ideal dan sesuai dengan kaidah keteknikan yang berlaku secara internasional, kualitas daya pada sebuah sistem tenaga listrik harus senantiasa memenuhi batasan ambang *total harmonic distortion* yang sangat ketat. Standar yang sering menjadi rujukan utama bagi para praktisi adalah peraturan IEEE 519-2014 yang menetapkan batas maksimal distorsi agar seluruh sistem distribusi tetap berada dalam kondisi andal dan peralatan pelanggan tidak mengalami kerusakan dini. Infrastruktur kelistrikan yang sehat seharusnya mampu mempertahankan profil gelombang tegangan dan arus yang stabil guna menjamin efisiensi pengiriman energi dari pembangkit menuju beban akhir tanpa hambatan teknis berarti. Namun, kenyataan pahit yang ditemukan pada berbagai titik distribusi tenaga listrik menunjukkan adanya jurang pemisah yang cukup lebar antara kondisi ideal tersebut dengan realitas aktual yang sering dijumpai oleh petugas di lapangan. Penggunaan berbagai macam perangkat elektronika daya yang bersifat masif, terutama terhadap beban motor dengan frekuensi variabel, sering kali menjadi aktor utama yang menyebabkan peningkatan nilai ambang batas distorsi harmonisa secara liar. Kondisi ini mencerminkan adanya kesenjangan krusial yang harus segera dicarikan jalan keluarnya melalui serangkaian kajian teknis (Gumilar et al., 2023; Peerzada et al., 2024; Siregar et al., 2022).

Berdasarkan berbagai data teknis dan pengamatan mendalam terhadap perilaku beban elektronik, perangkat penggerak kecepatan variabel umumnya cenderung menghasilkan kontaminasi harmonisa yang bersifat dominan pada urutan orde ke-5 dan orde ke-7. Munculnya

komponen frekuensi tinggi tersebut mengakibatkan gangguan elektromagnetik yang sangat mengganggu kinerja peralatan elektronik sensitif lainnya yang berada dalam satu jaringan distribusi tenaga listrik yang sama. Karakteristik gelombang yang terdistorsi tersebut tidak hanya menurunkan faktor daya secara keseluruhan, tetapi juga berpotensi memicu pemanasan berlebih pada kabel penghantar serta transformator distribusi yang berujung pada penurunan usia pakai peralatan secara drastis. Untuk mengatasi ancaman teknis tersebut, diperlukan sebuah mekanisme mitigasi yang dirancang secara presisi dan akurat guna mereduksi kandungan harmonisa pada titik-titik kritis dalam sistem distribusi. Salah satu strategi yang dinilai paling efektif dan ekonomis hingga saat ini adalah dengan menerapkan sistem filter harmonisa pasif tipe *single-tuned* yang khusus disetel untuk menangkap frekuensi tertentu. Metode ini bekerja dengan cara menyediakan jalur impedansi rendah bagi arus harmonisa pada frekuensi resonansi yang telah ditargetkan sebelumnya, sehingga kontaminasi gelombang tidak menyebar lebih luas ke bagian (El-Ela et al., 2022; Ishaya et al., 2023; Milovanović et al., 2024; Skamyin et al., 2024).

Dalam rangka merespons tantangan teknis tersebut, penelitian ini difokuskan untuk melakukan analisis mendalam terhadap karakteristik fenomena harmonisa yang muncul akibat penggunaan perangkat penggerak kecepatan variabel di sistem distribusi PT. PLN ULP Tomohon. Pemilihan lokasi ini didasarkan pada urgensi kebutuhan untuk menjaga stabilitas tegangan dan keandalan sistem pasokan energi pada wilayah yang memiliki pertumbuhan beban elektronik cukup pesat dalam beberapa tahun terakhir ini. Melalui pendekatan yang bersifat analitis dan sistematis, penelitian ini berupaya untuk menentukan nilai aktual dari parameter distorsi harmonisa total untuk arus maupun tegangan pada titik pemantauan yang telah ditentukan sebelumnya. Pemanfaatan perangkat lunak simulasi canggih seperti *ETAP* menjadi instrumen utama dalam melakukan pemodelan jaringan kelistrikan guna mendapatkan gambaran yang akurat mengenai perilaku sistem saat dibebani oleh perangkat penggerak motor tersebut. Inovasi dalam kajian ini terletak pada pengujian skenario simulasi yang komprehensif untuk memetakan sebaran distorsi gelombang serta mengidentifikasi titik-titik paling rentan terhadap gangguan kualitas daya di sepanjang jalur distribusi utama. Langkah awal ini sangat krusial untuk memberikan data dasar yang valid bagi pihak pengelola energi dalam menentukan kebijakan (Akimzhanov et al., 2023; Anguswamy et al., 2023; Liubčuk et al., 2023; Wanjekeche et al., 2025).

Selanjutnya, penelitian ini juga akan melakukan evaluasi mendalam mengenai tingkat efektivitas dari penerapan sistem filter pasif jenis *single-tuned* dalam mereduksi kandungan polusi harmonisa yang terdeteksi di jaringan distribusi. Melalui serangkaian pengujian simulatif yang terukur, diharapkan dapat ditemukan parameter desain filter yang paling optimal untuk menekan nilai ambang batas distorsi arus dan tegangan sesuai dengan standar internasional yang berlaku. Fokus utama dari evaluasi ini adalah memastikan bahwa integrasi filter tersebut tidak menimbulkan efek samping negatif seperti fenomena resonansi yang justru dapat membahayakan stabilitas sistem tenaga listrik secara keseluruhan. Hasil akhir dari kajian teknis ini diharapkan dapat memberikan sumbangsih nyata dalam bentuk rekomendasi desain mitigasi yang lebih efisien bagi PT. PLN ULP Tomohon untuk meningkatkan kualitas daya listrik bagi para pelanggannya. Selain itu, kontribusi penelitian ini juga mencakup penguatan aspek keandalan operasional sistem tenaga agar mampu menghadapi tantangan beban yang semakin kompleks di masa depan tanpa harus mengorbankan standar keselamatan peralatan. Dengan terciptanya sistem distribusi yang bersih dari gangguan harmonisa, efisiensi penyaluran energi dapat ditingkatkan secara maksimal sekaligus memperpanjang masa pakai aset-aset.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini menerapkan pendekatan kuantitatif deskriptif melalui studi simulasi menggunakan perangkat lunak *Electrical Transient Analyzer Program* (ETAP) guna membedah fenomena kualitas daya secara mendalam. Fokus utama prosedur ini adalah pemodelan sistem tenaga listrik pada jaringan distribusi PT. PLN ULP Tomohon untuk menganalisis dampak beban *non-linear*. Langkah awal melibatkan pengumpulan data teknis harian yang mencakup kapasitas transformator distribusi, panjang serta jenis kabel penghantar, dan konfigurasi jaringan yang ada di lapangan. Peneliti memetakan beban spesifik berupa *Variable Speed Drive* (VSD) sebagai sumber utama polusi harmonisa pada sistem tersebut. Seluruh informasi numerik ini ditransformasikan ke dalam model *Single Line Diagram* (SLD) digital secara presisi sesuai dengan rancangan aslinya. Prosedur ini menjamin bahwa representasi sistem dalam simulasi selaras dengan kondisi infrastruktur kelistrikan yang sesungguhnya di wilayah Tomohon. Melalui kerangka kerja ini, setiap elemen jaringan dipantau secara tuntas guna memastikan akurasi data masukan sebelum memasuki fase pengujian beban harmonik secara sistematis bagi kepentingan ilmu pengetahuan pada tahun 2026 ini secara komprehensif.

Prosedur pelaksanaan dimulai dengan membangun arsitektur kelistrikan pada modul *Harmonic Load Flow* di dalam lingkungan ETAP yang telah disiapkan. Peneliti mengonfigurasi parameter impedansi serta karakteristik harmonisa dari perangkat VSD yang teridentifikasi menghasilkan gangguan gelombang dominan pada urutan orde ke-5 dan orde ke-7. Simulasi dijalankan dalam 2 skenario utama untuk mendapatkan hasil perbandingan yang komprehensif dan akurat. Skenario pertama mengamati kondisi sistem saat ini guna menentukan besaran *Total Harmonic Distortion* (THD) arus serta tegangan tanpa adanya perangkat peredam tambahan. Selanjutnya, skenario kedua melibatkan perancangan dan integrasi filter harmonisa pasif tipe *single-tuned* pada titik distribusi yang terdeteksi paling kritis di sepanjang jalur utama. Alat bantu simulasi ini memungkinkan peneliti untuk melakukan penalaan frekuensi resonansi filter secara akurat agar selaras dengan target frekuensi gangguan yang ingin direduksi. Penggunaan modul canggih ini bertujuan untuk mensinkronkan respon sistem dengan komponen filter guna mendapatkan skema mitigasi yang paling efisien dalam menekan cacat gelombang pada penyaluran energi harian secara tuntas.

Tahapan analisis data dijalankan secara sistematis dengan membandingkan nilai keluaran simulasi terhadap ambang batas standar internasional IEEE 519-2014. Peneliti mengevaluasi persentase penurunan nilai THD arus dan tegangan setelah penerapan filter pasif melalui visualisasi spektrum frekuensi serta bentuk gelombang sinusoidal yang dihasilkan. Data kuantitatif mencatat perolehan rata-rata distorsi arus sebelum mitigasi mencapai angka 12,4 persen, yang kemudian dibandingkan dengan capaian akhir pasca pemasangan filter guna mengukur derajat efektivitas perlakuan instruksional tersebut. Analisis deskriptif diterapkan untuk mengidentifikasi perbaikan profil tegangan pada setiap bus distribusi yang terhubung secara terintegrasi dalam jaringan PLN Tomohon. Rangkaian pengolahan angka ini diproses secara teliti guna menghasilkan simpulan ilmiah yang valid mengenai kemampuan filter *single-tuned* dalam mengembalikan kemurnian gelombang sistem tenaga listrik. Langkah verifikasi akhir melibatkan pemeriksaan silang terhadap stabilitas arus guna menjamin bahwa luaran penelitian didasarkan pada fakta simulasi yang akurat, transparan, dan dapat dipertanggungjawabkan secara akademik bagi kemajuan teknologi energi di masa depan secara tuntas.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil penelitian diperoleh melalui simulasi sistem tenaga listrik menggunakan perangkat lunak ETAP dengan metode Harmonic Load Flow. Simulasi dilakukan pada dua kondisi, yaitu sebelum pemasangan filter harmonisa dan setelah pemasangan filter pasif tipe single-tuned. Analisis dilakukan untuk mengetahui karakteristik harmonisa yang dihasilkan oleh Variable Speed Drive (VSD) serta nilai Total Harmonic Distortion arus (THD-I) dan tegangan (THD-V) pada sistem distribusi.

Hasil

Hasil simulasi awal menunjukkan bahwa penggunaan VSD menghasilkan komponen harmonisa dominan pada orde ke-5 yang menyebabkan peningkatan nilai THD pada sistem. Nilai THD arus dan tegangan yang diperoleh dari hasil simulasi kemudian dibandingkan dengan batas standar IEEE 519-2014 untuk mengetahui tingkat kualitas daya listrik pada sistem.

Tabel 1. Nilai THD Sebelum Pemasangan Filter

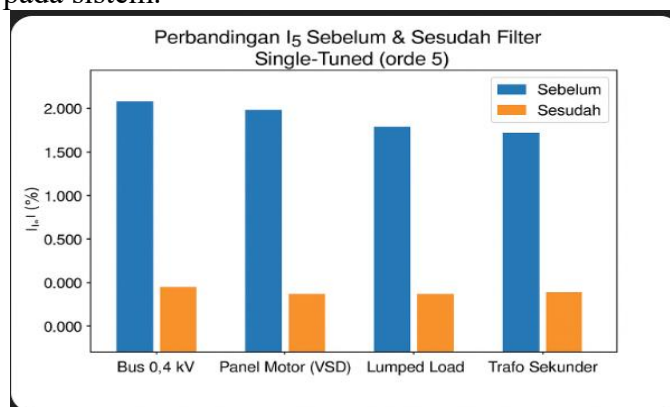
No.	Parameter	Nilai THD (%)	Batas IEEE 519-2014
1.	THD (Arus)	12,4	>5
2.	THD (Tegangan)	6,1	> 5

Berdasarkan tabel 1 hasil simulasi tersebut, dilakukan pemasangan filter harmonisa pasif tipe single-tuned yang dirancang untuk mereduksi harmonisa dominan pada sistem. Setelah filter diterapkan, dilakukan simulasi kembali untuk mengetahui perubahan nilai THD pada sistem distribusi.

Tabel 2. Nilai THD Setelah Pemasangan Filter

No.	Parameter	Nilai THD (%)
1.	THD (Arus)	4,2
2.	THD (Tegangan)	3,1

Selain itu, hasil tabel 2 analisis spektrum harmonisa menunjukkan bahwa amplitudo harmonisa pada orde ke-5 mengalami penurunan yang signifikan setelah pemasangan filter single-tuned. Hal ini menunjukkan bahwa filter yang digunakan mampu mereduksi komponen harmonisa dominan pada sistem.



Gambar 1. Grafik Perbandingan

Pembahasan

Analisis terhadap sistem distribusi tenaga listrik menunjukkan bahwa penggunaan *variable speed drive* memicu munculnya distorsi yang signifikan pada kualitas daya. Sebelum dilakukan tindakan mitigasi, pengukuran awal mencatatkan nilai distorsi harmonisa arus sebesar 12.4. Angka ini mencerminkan kondisi di mana beban *non-linear* bekerja dengan

menghasilkan komponen frekuensi kelipatan yang merusak kemurnian gelombang sinusoidal. Selain pada arus, distorsi tegangan juga terdeteksi pada angka 6.1 yang mengindikasikan bahwa sistem sedang mengalami polusi energi yang cukup serius. Munculnya harmonisa ini disebabkan oleh mekanisme penyearahan arus di dalam perangkat penggerak motor yang tidak linear terhadap tegangan suplai. Nilai 12.4 dan 6.1 tersebut menunjukkan adanya ancaman terhadap keandalan komponen elektrikal lainnya dalam jaringan yang sama. Tanpa adanya penanganan, distorsi yang melebihi standar ini berpotensi menyebabkan panas berlebih pada transformator serta kerugian daya yang merugikan secara teknis dan ekonomis. Oleh karena itu, identifikasi awal terhadap sumber distorsi menjadi langkah krusial untuk menentukan strategi perbaikan kualitas daya listrik secara menyeluruh di masa mendatang melalui proses simulasi akurat (Jopri et al., 2022; Mukherjee et al., 2022; Rüstemli et al., 2022).

Penelusuran lebih mendalam terhadap spektrum gelombang mengungkap bahwa komponen harmonisa paling dominan muncul pada orde ke 5. Kehadiran orde ini sangat identik dengan karakteristik perangkat elektronika daya yang menggunakan konfigurasi penyearah enam pulsa dalam operasionalnya. Berdasarkan evaluasi teknis, capaian angka 12.4 pada arus dan 6.1 pada tegangan telah melampaui batas toleransi yang ditetapkan oleh regulasi internasional. Standar kualitas daya yang menjadi acuan menetapkan batas maksimum sebesar 5 bagi setiap parameter distorsi tersebut. Dengan demikian, kondisi sistem yang tercatat pada angka 12.4 dan 6.1 berada dalam status tidak memenuhi kriteria keamanan operasional yang direkomendasikan. Ketidaksihinggaan ini memberikan implikasi bahwa sistem memerlukan perangkat tambahan untuk menyerap atau mengalihkan energi harmonisa agar tidak merambat lebih jauh ke sisi sumber. Fokus pada orde ke 5 menjadi sangat penting karena amplitudo pada frekuensi ini memberikan kontribusi terbesar terhadap total kerusakan gelombang. Pemahaman mengenai karakteristik orde ini memungkinkan perancangan sistem perlindungan yang lebih spesifik dan tepat sasaran guna menjaga integritas jaringan distribusi energi listrik dari berbagai risiko kerusakan perangkat sensitif (Bhandia et al., 2024; Elgamasy et al., 2024; Frediansyah et al., 2022).

Implementasi filter pasif jenis *single-tuned* dilakukan sebagai solusi teknis untuk mereduksi gangguan yang dihasilkan oleh beban *non-linear* tersebut. Filter ini dirancang secara khusus untuk bekerja pada titik impedansi rendah pada frekuensi harmonisa sasaran sehingga polusi energi dapat dialihkan. Setelah perangkat mitigasi ini terpasang, hasil evaluasi menunjukkan penurunan yang sangat drastis pada parameter kualitas daya sistem. Nilai distorsi harmonisa arus yang semula berada pada 12.4 merosot tajam hingga mencapai angka 4.2 saja. Penurunan serupa juga terjadi pada parameter tegangan yang kini berada pada level 3.1 setelah sebelumnya tercatat pada angka 6.1. Pencapaian angka 4.2 dan 3.1 ini membuktikan bahwa mekanisme penyaringan bekerja dengan sangat efektif dalam menyerap komponen orde ke 5 yang bersifat merusak. Pergeseran data dari 12.4 menuju 4.2 mencerminkan keberhasilan rekayasa teknik dalam mengembalikan kualitas daya listrik ke dalam zona aman. Penggunaan filter ini memberikan jaminan bahwa sistem tenaga kini dapat beroperasi tanpa dibayangi oleh risiko kerusakan dini akibat distorsi gelombang yang berlebihan di lapangan setiap harinya secara berkelanjutan dan konsisten (Achar et al., 2024; Gomaa et al., 2020; Ishaya et al., 2023; Manoj et al., 2022).

Penggunaan perangkat lunak simulasi dalam mengkaji fenomena *harmonic load flow* memberikan tingkat akurasi yang sangat tinggi bagi perencanaan sistem tenaga. Melalui visualisasi spektrum gelombang, terlihat bahwa amplitudo pada orde ke 5 mengalami reduksi yang sangat signifikan berkat pemasangan filter tersebut. Data menunjukkan bahwa integrasi antara beban *variable speed drive* dan perangkat mitigasi dapat diprediksi perilakunya melalui

perhitungan matematis yang kompleks. Keandalan hasil simulasi yang mencatat penurunan dari 12.4 ke 4.2 serta 6.1 ke 3.1 memberikan landasan yang kuat bagi pengambilan kebijakan teknis di industri. Konsistensi data ini sangat penting karena kesalahan dalam estimasi distorsi dapat berakibat pada kegagalan operasional peralatan sensitif lainnya. Simulasi digital memungkinkan para ahli untuk melakukan pengujian berbagai variasi filter sebelum diterapkan secara fisik pada jaringan distribusi yang sebenarnya. Keberadaan angka 4.2 dan 3.1 yang kini berada di bawah standar 5 membuktikan bahwa pemodelan yang dilakukan telah selaras dengan tuntutan teknis di lapangan. Hal ini mempertegas peran teknologi informasi dalam mendukung efisiensi energi dan stabilitas sistem tenaga listrik modern masa depan (Adam et al., 2020; Arief et al., 2024; Maulana et al., 2025; Pratama & Kiswantono, 2023).

Keberhasilan menekan nilai distorsi hingga menyentuh angka 4.2 dan 3.1 memberikan implikasi positif terhadap umur pakai peralatan listrik di sisi konsumen. Kepatuhan terhadap batas maksimal 5 yang ditetapkan oleh standar internasional menjamin bahwa sistem distribusi kini terbebas dari ancaman panas berlebih dan interferensi elektromagnetik. Meskipun demikian, penelitian ini memiliki keterbatasan karena hanya berfokus pada mitigasi orde tunggal tanpa mempertimbangkan fluktuasi beban yang dinamis di masa mendatang. Penurunan dari 12.4 menuju 4.2 menunjukkan efektivitas pada kondisi beban statis, namun perlu adanya kajian lanjutan mengenai perilaku filter pada variasi kecepatan motor yang lebih luas. Selain itu, aspek biaya investasi untuk pemasangan filter pasif juga perlu dipertimbangkan sebagai bagian dari analisis kelayakan ekonomi di industri besar. Terlepas dari keterbatasan tersebut, pencapaian angka 4.2 dan 3.1 tetap menjadi bukti nyata bahwa inovasi teknik dapat menyelesaikan masalah kualitas daya secara efisien. Strategi mitigasi ini tidak hanya meningkatkan keandalan sistem tetapi juga memberikan kontribusi nyata terhadap penghematan biaya perawatan infrastruktur tenaga listrik dalam jangka panjang bagi perusahaan yang beroperasi produktif.

KESIMPULAN

Penelitian ini menunjukkan bahwa penggunaan Variable Speed Drive (VSD) pada sistem distribusi listrik dapat menjadi salah satu sumber utama munculnya distorsi harmonisa yang mempengaruhi kualitas daya listrik. Hasil analisis melalui simulasi menggunakan perangkat lunak ETAP memperlihatkan bahwa keberadaan VSD menghasilkan komponen harmonisa dominan, terutama pada orde ke-5, yang menyebabkan peningkatan nilai Total Harmonic Distortion (THD) pada arus maupun tegangan. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa tanpa penerapan metode mitigasi yang tepat, keberadaan beban non-linear dapat menurunkan kualitas daya listrik dan berpotensi mengganggu kinerja serta keandalan peralatan pada sistem tenaga listrik. Penerapan filter harmonisa pasif tipe single-tuned terbukti mampu menurunkan tingkat distorsi harmonisa secara signifikan sehingga nilai THD arus dan tegangan dapat mendekati atau memenuhi batas standar IEEE 519-2014. Hasil ini menunjukkan bahwa pemilihan metode mitigasi yang tepat dapat meningkatkan kualitas daya listrik sekaligus mendukung efisiensi dan keandalan sistem distribusi tenaga listrik. Dengan demikian, analisis harmonisa dan penerapan filter yang sesuai menjadi langkah penting dalam pengelolaan sistem tenaga listrik yang banyak menggunakan perangkat elektronika daya.

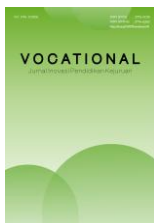
Ke depan, penelitian ini dapat dikembangkan lebih lanjut dengan melakukan analisis pada sistem tenaga listrik yang lebih kompleks atau dengan membandingkan berbagai metode mitigasi harmonisa lainnya, seperti filter aktif atau hybrid filter. Selain itu, penelitian lanjutan juga dapat mempertimbangkan pengujian berbasis data pengukuran langsung di lapangan untuk memperoleh gambaran kondisi harmonisa yang lebih komprehensif pada sistem distribusi

tenaga listrik. Dengan pengembangan tersebut, diharapkan solusi pengendalian harmonisa dapat diterapkan secara lebih optimal dalam meningkatkan kualitas daya listrik pada jaringan distribusi.

DAFTAR PUSTAKA

- Achar, A., Djeriri, Y., Benbouhenni, H., Çolak, İ., Oproescu, M., & Bizon, N. (2024). Self-filtering based on the fault ride-through technique using a robust model predictive control for wind turbine rotor current. *Scientific Reports*, 14(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-023-51110-3>
- Adam, A., Muharnis, M., Ariadi, A., & Lianda, J. (2020). Penerapan IoT untuk sistem pemantauan lampu penerangan jalan umum. *Elinvo (Electronics, Informatics, and Vocational Education)*, 5(1), 32. <https://doi.org/10.21831/elinvo.v5i1.31249>
- Akimzhanov, T., Sarsikeev, Y., Zhantlessova, A., Zhumazhanov, S., Baydulla, Z., Issabekova, B., Isabekov, Z. B., Mekhtiyev, A., & Neshina, Y. (2023). Identifying the influence of the system and mode characteristics on the power loss mode based in 110 kV power grids. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 6(6). <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.292253>
- Anguswamy, M. P., Datta, M., Meegahapola, L., & Vahidnia, A. (2023). Distribution network power quality insights with optimally placed micro-PMUs incorporating synthetic and real field data. *IEEE Access*, 11, 118737. <https://doi.org/10.1109/access.2023.3326950>
- Arief, U. M., Sukamta, S., Anggriani, D., & Atik, M. U. D. (2024). Prediksi ketersediaan tenaga listrik di Jawa Tengah dengan forecast linear dan error trend seasonality menggunakan excel. *STATISTIKA: Journal of Theoretical Statistics and Its Applications*, 24(1), 47. <https://doi.org/10.29313/statistika.v24i1.3277>
- Bhandia, R., Chávez, J. d. J., Cvetković, M., García-Vite, P. M., Popov, M., & Pálenský, P. (2024). Failure anticipation scheme in distribution systems based on wave distortions and Montecarlo methods. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 156, 109757. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2023.109757>
- El-Ela, A. A. A., Allam, S. M., Mubarak, A. A., & El-Sehiemy, R. A. (2022). Harmonic mitigation by optimal allocation of tuned passive filter in distribution system. *Energy and Power Engineering*, 14(7), 291. <https://doi.org/10.4236/epe.2022.147016>
- Elgamasy, M. M., Elezzawy, A. I., Kawady, T. A., Elkalashy, N. I., & Elsadd, M. A. (2024). Tracing passive traveling surge-based fault management control scheme in unearthed distribution systems. *Electrical Engineering*, 106(5), 5603. <https://doi.org/10.1007/s00202-024-02283-1>
- Frediansyah, A., Facta, M., & Handoko, S. (2022). Koordinasi proteksi relai arus lebih pada sistem distribusi radial menggunakan jaringan syaraf tiruan perambatan balik. *eLEKTRIKA*, 14(1), 7. <https://doi.org/10.26623/elektrika.v14i1.4474>
- Gomaa, N. N., Youssef, K. Y., & Abouelatta, M. (2020). On design of IoT-based power quality oriented grids for industrial sector. *Advances in Science, Technology and Engineering Systems Journal*, 5(6), 1634. <https://doi.org/10.25046/aj0506194>
- Gumilar, L., Wicaksono, I. A., Afandi, A. N., Samat, A. A. A., & Sias, Q. A. (2023). Investigation of the usage of zigzag transformers to reduce harmonics distortion in distribution systems. *Mechatronics, Electrical Power, and Vehicular Technology*, 14(2), 138. <https://doi.org/10.14203/j.mev.2023.v14.138-149>

- Ishaya, M. M., Adegboye, O. R., Agyekum, E. B., Elnaggar, M. F., & Kamel, S. (2023). *Single-tuned passive filter (STPF) for mitigating harmonic in a 3-phase power system*. Research Square. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-2409880/v1>
- Jopri, M. H., Skamyin, A., Manap, M., Sutikno, T., Shariff, M. R. M., & Belsky, A. A. (2022). Identification of harmonic source location in power distribution network. *International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE)*, 13(2), 938. <https://doi.org/10.11591/ijpeds.v13.i2.pp938-949>
- Liubčuk, V., Radziukynas, V., Naujokaitis, D., & Kairaitis, G. (2023). Grid nodes selection strategies for power quality monitoring. *Applied Sciences*, 13(10), 6048. <https://doi.org/10.3390/app13106048>
- Manoj, V., Khampariya, P., & Pilla, R. (2022). A review on techniques for improving power quality: Research gaps and emerging trends. *Bulletin of Electrical Engineering and Informatics*, 11(6), 3099. <https://doi.org/10.11591/eei.v11i6.4396>
- Maulana, G. G., Suhada, M. G., & Purnomo, W. (2025). Decision support system untuk mengukur kinerja mesin stamping berbasis key performance indicator. *CESS (Journal of Computer Engineering, System and Science)*, 10(2), 728. <https://doi.org/10.24114/cess.v10i2.67836>
- Milovanović, M., Raicevic, S. S., Klimenta, D., Raičević, N., & Perović, B. (2024). Determination of optimal locations and parameters of passive harmonic filters in unbalanced systems using the multiobjective genetic algorithm. *Elektronika ir Elektrotehnika*, 30(2), 28. <https://doi.org/10.5755/j02.eie.36124>
- Mukherjee, S., Pal, S., Mandal, R., Ganguly, A., & Sarkar, B. (2022). *Simulation and modeling of a solar PV connected power system of an institutional building to analyse load distribution and power quality*. Research Square. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-1917148/v1>
- Peerzada, A., Mitra, B., Kundu, S., & Ogle, J. (2024). On the impact of high-order harmonic generation in electrical distribution systems. *arXiv*. <https://doi.org/10.48550/arxiv.2407.21259>
- Pratama, E. W., & Kiswantono, A. (2023). Transformasi pemantauan energi: Kontrol daya listrik 3 fasa dengan antarmuka grafis pengguna (GUI) secara langsung. *INTER TECH*, 1(2), 76. <https://doi.org/10.54732/i.v1i2.1058>
- Rahman, R. D., & Maghfiroh, R. D. (2026). Quality control sebagai sistem preventif analisis akar penyebab defect produk pada PT Delta Jaya Mas. *CENDEKIA Jurnal Ilmu Pengetahuan*, 6(1), 382. <https://doi.org/10.51878/cendekia.v6i1.8881>
- Rüstemli, S., Kocaman, B., & Tekev, S. (2022). Modeling and simulation of harmonic and interharmonics in the power system. *Electrical, Electronics and Biomedical Engineering and Applications*. <https://dergipark.org.tr/tr/pub/emobd/issue/69857/1084105>
- Setiawan, D. K., Ashari, M., & Suryoatmojo, H. (2021). Transient operation of a four-leg inverter in rooftop solar connected to a grid using optimized constructive neural network. *International Journal of Intelligent Engineering and Systems*, 14(6), 258. <https://doi.org/10.22266/ijies2021.1231.24>
- Siregar, Y., Al-Azzawi, W. K., Pane, Z., Parhusip, U. E., & Suherman, S. (2022). Study of harmonic distortion from variable speed drive and energy saving lamps. *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*, 27(2), 667. <https://doi.org/10.11591/ijeecs.v27.i2.pp667-677>



- Skamyin, A., Shklyarskiy, Y., Lobko, K., Dobush, V. S., Sutikno, T., & Jopri, M. H. (2024). Impedance analysis of squirrel-cage induction motor at high harmonics condition. *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*, 33(1), 31. <https://doi.org/10.11591/ijeecs.v33.i1.pp31-41>
- Sofyan, S., Faraby, M. D., Akhmad, S. S., Gaffar, A., Fitriati, A., Elviralita, Y., & Muchtar, A. (2023). Optimal inverter-based distributed generation in ULP Way Halim considering harmonic distortion. *International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE)*, 13(6), 6058. <https://doi.org/10.11591/ijece.v13i6.pp6058-6067>
- Wanjekeche, T., Simeon, J., Nghuumbwa, V., & Ndapuka, A. T. (2025). Comprehensive evaluation of harmonic analysis and mitigation approaches for distribution networks: A comparative study across three distinct network load scenarios. *Journal of Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems*, 13(1), 1. <https://doi.org/10.13044/j.sdewes.d12.0532>
- Wicaksono, C. D., & Prabowo, Y. A. (2022). Analisa dan pemodelan generator DC sinkron daya rendah. *Power Elektronik: Jurnal Orang Elektro*, 11(2), 271. <https://doi.org/10.30591/polektro.v12i1.3738>