

Analisis Kinerja Mitigasi Total Harmonic Distortion (THD) dan Kualitas Daya Listrik untuk Beban Residensial Non-Linier

Muhammad Fadlan Siregar¹, Indra Roza², Irfan Nofri³, Rohana⁴

¹, Fakultas Teknik Universitas Medan Area, Medan, Indonesia

², Universitas Harapan Medan, Medan, Indonesia

^{3,4}, Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara, Medan, Indonesia

*) Email Penulis Korespondensi : muhammadfadlansiregar@staff.uma.ac.id

Abstrak— Distorsi Harmonisa akan dihasilkan oleh beban tidak linier seperti televisi, komputer, microwave, lampu – lampu flourescent yang terdapat dan menggunakan ballas elektronik dan kandungan elektronik lainnya. harmonisa yang terdapat pada jenis beban tidak linier menyebabkan kualitas daya listrik menjadi buruk dan mutu pada mutu pengukuran daya listrik menjadi tidak optimal dan sering menyebabkan daya menurun. Beban residensial non-linier akan menghasilkan harmonisa. Dari hasil pengukuran beban tersebut memiliki faktor daya sebesar 5,53, dimana kandungan harmonisa pada orde ke 3 sebesar 62,7%, orde ke 5 sebesar 33,5%, orde ke 7 sebesar 21,4%, orde ke 9 sebesar 20,3%, orde ke 11 sebesar 9,4%, dan THDi sebesar 70,2%. Berdasarkan pada data tersebut maka perlu dilakukan pengurangan kandungan harmonisa dengan dilakukan penambahan filter. Simulasi ini mengetahui nilai yang terdapat pada beban residensial non-linier sehingga mengganggu kerja kualitas daya listrik dan terdapat harmonisa.

Kata Kunci: THD, Simulasi, Kualitas daya

Abstract— Harmonic distortion will be generated by non-linear loads such as televisions, computers, microwaves, fluorescent lamps that are present and use electronic ballasts and other electronic components. Harmonics present in this type of non-linear load cause the quality of electrical power to be poor and the quality of the electrical power measurement quality to be suboptimal and often cause power to decrease. Non-linear residential loads will produce harmonics. From the results of the load measurements, it has a power factor of 5.53, where the harmonic content in the 3rd order is 62.7%, the 5th order is 33.5%, the 7th order is 21.4%, the 9th order is 20.3%, the 11th order is 9.4%, and THDi is 70.2%. Based on these data, it is necessary to reduce the harmonic content by adding a filter. This simulation finds out the values contained in non-linear residential loads that disrupt the work of the quality of electrical power and there are harmonics.

Keywords: THD, Simulation, Power quality

1. PENDAHULUAN

harmonisa yang diinduksi oleh meningkatnya penetrasi beban non-linier, seperti Switched-Mode Power Supplies (SMPS), Variable Frequency Drives (VFD), dan Inverter pada sistem residensial maupun industri, telah menjadi isu krusial dalam menjaga kualitas daya listrik. Distorsi bentuk gelombang arus dan tegangan ini, yang diukur melalui parameter Total Harmonic Distortion (THD), secara langsung bertanggung jawab atas peningkatan rugi-rugi daya (power losses), pemanasan berlebih pada transformator dan konduktor, serta potensi kerusakan pada peralatan sensitif. Harmonisa merupakan fenomena yang ditimbulkan dari pengoperasian beban listrik tidak linier, dimana akan terbentuk gelombang yang berfrekuensi dasar 50 Hz atau 60 Hz yang menyebabkan bentuk gelombang arus dan tegangan yang idealnya adalah sinusoidal murni menjadi tidak sinusoidal. Harmonisa dihasilkan oleh beban tidak linier seperti televisi, komputer, microwave, lampu – lampu flourescent yang menggunakan ballas elektronik dan lain-lain. Kandungan harmonisa yang terdapat pada beban tidak linier menyebabkan kualitas daya listrik menjadi buruk dan mutu daya listrik menjadi menurun. Komputer merupakan salah satu beban tidak linier yang menghasilkan harmonisa. Semakin banyaknya penggunaan beban tidak linier

diperkirakan harmonisa yang ditimbulkan akan semakin besar dan dapat mengganggu sistem kinerja dari peralatan elektronika lainnya dan juga dapat menyebabkan panas berlebih pada sumber tenaga listrik. Dari hasil pengukuran beban tersebut memiliki faktor daya sebesar 5,53, dimana kandungan harmonisa pada orde ke 3 sebesar 62,7%, orde ke 5 sebesar 33,5%, orde ke 7 sebesar 21,4%, orde ke 9 sebesar 20,3%, orde ke 11 sebesar 9,4%, dan THDi sebesar 70,2%. Berdasarkan pada data tersebut maka perlu dilakukan pengurangan kandungan harmonisa dengan dilakukan penambahan filter. Penambahan pemasangan filter diharapkan dapat mengurangi harmonisa yang disebabkan oleh beban yang mengandung harmonisa. Filter Pasif single Tuned adalah filter yang terdiri dari komponen-komponen Resistor (R), Induktor (L) dan Kapasitor (C) yang terhubung secara seri dan dapat meredam harmonisa sekecil mungkin, sehingga dapat diharapkan dapat sesuai dengan ketentuan IEC61000-3-2, kelas D.

2. METODE PENELITIAN

Kegagalan peralatan residensial (Kelas D) untuk mematuhi batasan mA/W dalam standar IEC 61000-3-2 memiliki konsekuensi yang meluas di luar unit individual. Akumulasi distorsi arus harmonisa dari ribuan rumah dapat menyebabkan distorsi tegangan yang signifikan pada Point of Common Coupling (PCC) di jaringan distribusi tegangan rendah. Lebih lanjut, keberadaan harmonik orde ketiga (triplen harmonics), yang merupakan ciri khas penyearah satu fasa, menyebabkan arus pada konduktor netral menjadi tidak nol pada sistem tiga fasa yang seimbang, sehingga memicu panas berlebih (overheating) pada konduktor netral, trafo, dan potensi kegagalan sistem proteksi. Oleh karena itu, untuk mengatasi masalah sistemik ini dan memastikan keberlanjutan kualitas daya listrik, dibutuhkan strategi mitigasi yang efektif. Solusi ini dapat berupa implementasi Active Power Factor Correction (PFC) di tingkat power supply peralatan, atau pemasangan Filter Aktif/Pasif di tingkat Gardu Induk atau sub-distribusi untuk meniadakan (cancel out) harmonisa. Pada Peningkatan pesat penggunaan peralatan elektronik modern berbasis elektronika daya (seperti lampu LED, charger gadget, dan AC Inverter) dalam skala rumah tangga telah secara fundamental mengubah profil beban pada jaringan distribusi tegangan rendah. Transisi menuju beban residensial non-linier ini menjadi sumber utama distorsi gelombang arus yang signifikan, meningkatkan nilai Total Harmonic Distortion (THD) pada sisi suplai. Meskipun dampaknya sering dianggap kecil per unit rumah, akumulasi distorsi harmonisa pada satu kluster perumahan dapat memicu berbagai masalah serius, termasuk penurunan efisiensi energi, memperpendek umur peralatan, dan yang paling krusial, meningkatkan risiko panas berlebih (overheating) pada penghantar.

Untuk menentukan besar total harmonic distortion (THD) dapat dilihat dari perumusan analisa deret fourier, untuk tegangan dan arus dalam fungsi waktu.

$$v(t) = V_0 + \sum_{n=1}^{\infty} V_n \cos(n\omega t + \theta_n) \dots \dots \dots (1)$$

$$i(t) = I_0 + \sum_{n=1}^{\infty} I_n \cos(n\omega t + \varphi_n) \dots \dots \dots (2)$$

Dimana:

- $v(t)$ = Tegangan dalam fungsi waktu (V)
- $i(t)$ = Arus dalam fungsi waktu (Ampere)
- I_0 = Arus sesaat (Ampere)
- I_n = Arus Maksimum ke-n (Ampere)
- V_0 = Tegangan Sesaat (Volt)
- V_n = Tegangan Maksimum ke-n (Volt)

Besar *individual harmonic distortion* (IHD) untuk tegangan dan arus yaitu:

$$IHD_v = \frac{\sqrt{\left(\frac{V_n}{\sqrt{2}}\right)^2}}{\frac{V_1}{\sqrt{2}}} = \frac{\sqrt{(V_n)^2}}{V_1} \dots \dots \dots (3)$$

$$IHD_I = \frac{\sqrt{\left(\frac{I_n}{\sqrt{2}}\right)^2}}{\frac{I_1}{\sqrt{2}}} = \frac{\sqrt{(I_n)^2}}{I_1} \dots \dots \dots (4)$$

Besar *total harmonic distorsion* (THD) untuk tegangan dan arus yaitu:

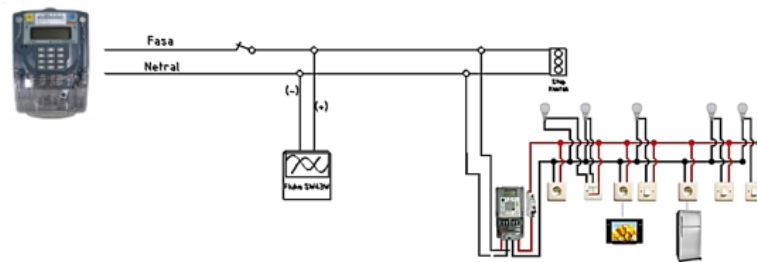
$$THD_v = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} \left(\frac{V_n}{\sqrt{2}}\right)^2}}{\frac{V_1}{\sqrt{2}}} \dots \dots \dots (5)$$

$$THD_I = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} \left(\frac{I_n}{\sqrt{2}}\right)^2}}{\frac{I_1}{\sqrt{2}}} = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} (I_n)^2}}{I_1} \dots \dots (6)$$

Filter Pasif (Single Tuned Filter) merupakan tipe filter pasif yang paling fundamental dan umum digunakan, terutama pada sistem tegangan rendah, karena kesederhanaan dan efektivitas biayanya. Filter ini dirancang dalam bentuk rangkaian seri Induktor (L) dan Kapasitor (C)—seringkali dengan resistansi (R) kecil—yang memiliki impedansi sangat rendah pada frekuensi harmonisa tertentu (h) yang ingin diredam. Melalui prinsip resonansi seri, filter secara efektif menyediakan jalur dengan impedansi minimum bagi arus harmonisa yang ditargetkan, sehingga arus tersebut "dialihkan" dari jaringan utama ke dalam filter dan mencegahnya mengalir ke sistem lain. Selain fungsi utamanya sebagai penyerap harmonisa, filter pasif secara inheren juga bertindak sebagai sumber daya reaktif kapasitif ke sistem. Oleh karena itu, sebelum merancang dan menentukan nilai komponen L dan C secara presisi, analisis mendalam terhadap kebutuhan daya reaktif sistem (power factor correction) harus dilakukan terlebih dahulu; perhitungan ini krusial untuk mencegah over-kompensasi yang tidak hanya dapat memicu masalah tegangan tinggi, tetapi juga risiko resonansi paralel yang berbahaya pada frekuensi yang tidak diinginkan. International Electrotechnical Commission (IEC) melalui standar IEC 61000-3-2. Standar ini secara spesifik berfokus pada beban listrik kecil satu fasa yang merupakan sumber dominan distorsi pada jaringan tegangan rendah. IEC 61000-3-2 mengklasifikasikan peralatan menjadi empat kelas utama—Kelas A, B, C, dan D—berdasarkan jenis, karakteristik daya, dan pola penggunaan beban. Kelas A mencakup beban seimbang umum, Kelas B untuk peralatan portabel, Kelas C untuk peralatan pencahayaan, dan Kelas D secara khusus menargetkan peralatan kantor dan rumah tangga seperti Personal Computer dan televisi yang menggunakan Switched-Mode Power Supply (SMPS). Klasifikasi ini menjadi krusial karena setiap kelas memiliki batasan arus harmonisa yang berbeda, memaksa pabrikan untuk mengintegrasikan sirkuit koreksi faktor daya (Power Factor Correction) pada desain produk mereka, sehingga emisi harmonisa dari jutaan perangkat terdistribusi dapat terkontrol dan tidak mengganggu keandalan sistem kelistrikan secara keseluruhan.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

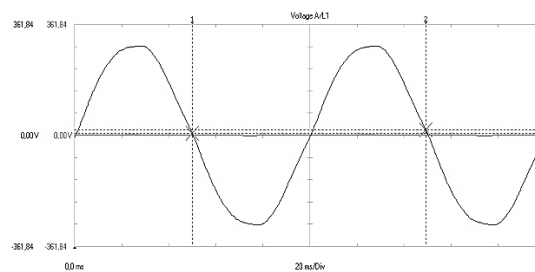
Filter pasif menawarkan solusi yang sederhana dan efisien, salah satu tantangan paling kritis yang dihadapinya adalah potensi resonansi paralel pada jaringan. Karena nilai Q yang tinggi menghasilkan kurva respons impedansi yang tajam, perubahan kecil pada impedansi sumber sistem atau suhu operasional dapat menyebabkan detuning, yaitu pergeseran frekuensi resonansi. Sebuah filter single tuned dapat mengurangi harmonisa tegangan (THDv) dan harmonisa arus (THDi) sampai dengan 10-30%. Besarnya tahanan R dari induktor dapat ditentukan oleh faktor kualitas dari induktor. Faktor kualitas (Q) adalah kualitas listrik suatu induktor, secara matematis Q adalah perbandingan nilai reaktansi induktif atau reaktansi kapasitif dengan tahanan R . Semakin besar nilai Q yang dipilih maka semakin kecil nilai R dan semakin bagus kualitas dari filter dimana energi yang dikonsumsi oleh filter akan semakin kecil, artinya rugi-rugi panas filter adalah kecil, nilai faktor kualitas berkisar antara: $30 < Q < 100$. Metode yang dilakukan pada penelitian ini adalah pengukuran langsung beban tidak linier Pengukuran dilakukan dengan menggunakan alat ukur power quality analyzer fluke SW43W seperti pada gambar 1.



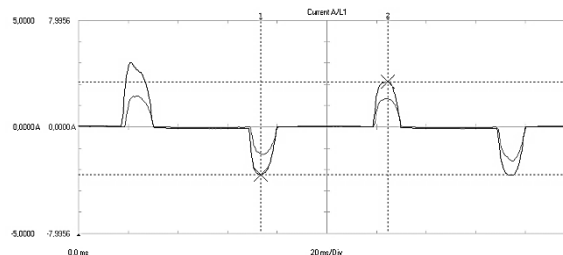
Gambar1. Rangkaian Penelitian

Hasil Pengukuran

Dari hasil pengukuran didapat bentuk dari gelombang tegangan hampir berbentuk sinusoidal pada gambar 1 dan data pengukuran total harmonisa arus yaitu sebesar 116,3% seperti gambar 2.

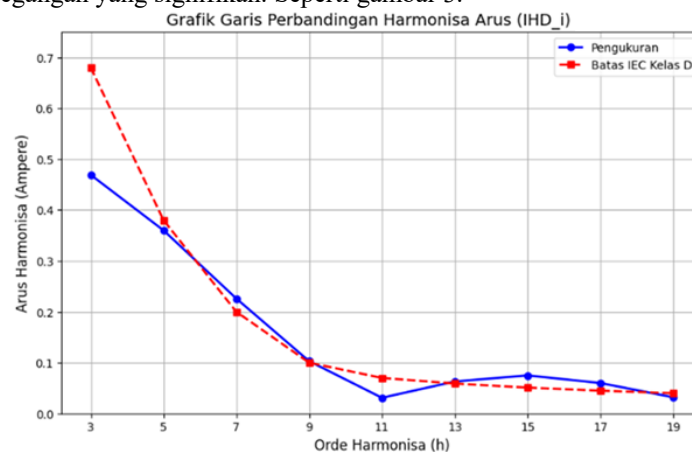


Gambar 1. Gambar gelombang tegangan

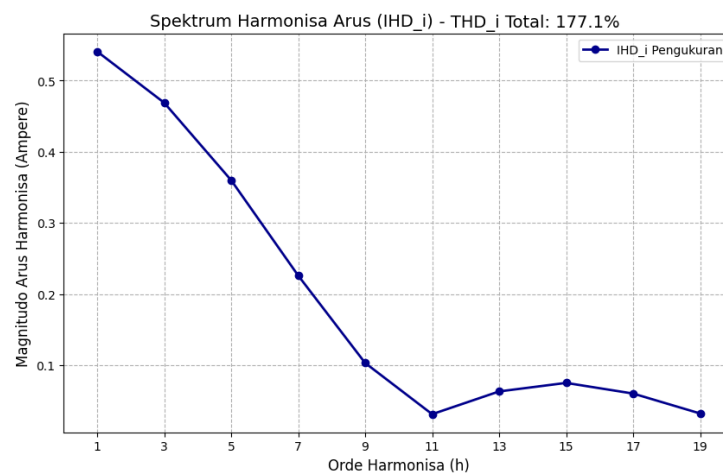


Gambar 2. Gambar gelombang arus yang terdistorsi

Tingkat distorsi arus sebesar 116,3% ini berada jauh di atas batas toleransi yang ditetapkan oleh standar kualitas daya internasional, yang umumnya membatasi THDi untuk sistem distribusi antara 5% hingga 8%. Konsekuensi dari distorsi arus yang ekstrem ini sangat serius dan meliputi peningkatan rugi-rugi daya, pada konduktor, stres termal berlebihan pada trafo, dan potensi risiko kebakaran akibat overheating pada konduktor netral. Oleh data pengukuran yang menunjukkan secara kuat memvalidasi urgensi dan signifikansi untuk mereduksi THDi secara drastis hingga mencapai batas standar yang aman dan efisien. pada semua orde harmonisa yaitu harmonisa orde ke-3 sampai dengan orde ke 49 terlihat harmonic. Jika dibandingkan dengan arus fundamentalnya kandungan harmonisa tertinggi terdapat pada orde harmonisa ke 3. Hasil analisa menunjukkan kontras yang tajam antara kondisi tegangan dan arus. Berdasarkan data tabel, Total Harmonic Distortion Tegangan (THDv tercatat sebesar 2,4, yang mengindikasikan bahwa kualitas tegangan suplai masih terjaga dengan sangat baik dan jauh di bawah batas maksimum yang ditetapkan oleh standar internasional, Harmonisa tegangan individu terbesar adalah orde ke-5 (120 V), namun secara keseluruhan, magnitudo harmonisa yang rendah menegaskan bahwa impedansi jaringan pada titik pengukuran cukup rendah, sehingga arus harmonisa yang ditarik oleh beban sudah menyebabkan distorsi tegangan yang signifikan. Seperti gambar 3.



Gambar 3 Nilai Perbandingan batas harmainisa Arus



Gambar 4, Nilai Harmonisa Arus pada

4.KESIMPULAN

Hasil pengukuran awal pada beban non-linier menunjukkan adanya masalah kualitas daya yang sangat parah, ditandai dengan Total Harmonic Distortion Arus THDi yang berada pada tingkat menengah, memiliki faktor daya sebesar 5,53, dimana kandungan harmonisa pada orde ke 3 sebesar 62,7%, orde ke 5 sebesar 33,5%, orde ke 7 sebesar 21,4%, orde ke 9 sebesar 20,3%, orde ke 11 sebesar 9,4%, dan THDi sebesar 70,2%. Filter yang dirancang diharapkan mampu mereduksi secara drastis dari kondisi awal harmonisa yang menengah menjadi nilai akhir yang berada di bawah batas standar yang disyaratkan dan memperbaiki kualitas daya listrik.

REFERENSI

- [1] Mohamed S. Seddik, Magdy B. Eteiba and Jehan Shazly Evaluating the Harmonic Effects on the Thermal Performance of a Power Transformer: *Energies*, 17, (4871), 2024, 2 of 17 <https://doi.org/10.3390/en17194871>.
- [2] Wilfredo Urbina – Romero, Gaussing Harmonic Analysis Springer monographs in mathematics, 2019, <https://www.springer.com/series/3733>.
- [3] Shareghi, M.; Phung, B.T.; Naderi, M.S.; Blackburn, et al. Effects of Current and Voltage Harmonics on Distribution Transformer Losses. In Proceedings of the 2012 IEEE International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis, Bali, Indonesia, 23–27 September 2012. <https://doi.org/10.1109/CMD20148.2012>
- [4] J. C. Das, Marcel Dekker, Inc, Power System Analysis - Short-Circuit Load Flow and Harmonics, 2002.
- [5] Tamer M. Z. Elsharkawy, Gomaa F. A. Osman & Waleed A. A. Salem, The effect of nonlinear loads on the underground distribution cables: a case study, *Journal of Electrical Systems and Information Technology*: 9 (19), 10 October 2022 <https://doi.org/10.1186/s43067-022-00061-2>.
- [6] Michael McCarty, Taufik Taufik, Andre Pratama, Makbul Anwari, Harmonic Analysis of Input Current of Single Phase Controlled Bridge Rectifier, Symposium on Industrial Electronics and Applications (ISIEA 2009), October 4-6, 2009, Kuala Lumpur, Malaysia, <https://DOI.org/10.1109/ISIEA.2009.5356404>
- [7] Wakileh G.J, Power System Harmonics: Fundamental, Analysis and Filter Design, Springer Velag Press, 2001, <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-662-04343-1>.
- [8] James M. Fiore, Semiconductor Devices - Theory and Application, <https://LibreTexts.org>
- [9] Dugan, Roger C. Mc Granaghan et.al. Electrical Power System Quality. Second edition, McGraw Hill. pp 167-294, 2004. https://gcebargur.ac.in/sites/gcebargur.ac.in/files/lectures_desk/electrical_power_systems_quality.pdf
- [10] Ying-Tung Hsiao, Design of Filters for Reducing Harmonic Distortion and Correcting Power Factor in Industrial Distribution Systems, *Journal of Applied Science and Engineering*, 4. (3) 2001, <https://doi.org/10.6180/jase.2001.4.3.06>
- [11] A. Priyadharshini, N. Devarajan, A.R Saranya, R. Anitt, Survey of Harmonics in Non-Linier Loads. *International Journal of Recent Technology and Engineering [IJRTE]*. ISSN. 2277 – 3878. 1:1 April, 2012. DOI: <https://doi.org/10.35940/ijrte.2277-3878>.
- [12] Muhammad Fadlan Siregar, Muhammad Ikhwan Fahmi,dkk, “ Implementation of harmonics reduction filters in non-linear equipment at plastic manufacturing company “ - Proceedings of International Conference on Multidisciplinary Engineering (ICOMDEN) <https://proceedings.unimal.ac.id/icomden/article/view/985>
- [13] G.Suresh Babu, U.K.Choudhury, G.Tulasi Ramdas, a Novel Approach In the Design of Optimal Tuning Frequency of a Single Tuned Harmonic Filter for an Alternator with Rectifier Loads, *Journal of Theoretical and Applied Information Technology*, 2010 <https://jaitit.org>
- [14] Muhammad Ikhwan Fahmi, Muhammad Fadlan Siregar, Dkk, “ Pengujian Saturasi Trafo Arus terhadap Pengaruh Kerja Rele Proteksi” DOI: <https://doi.org/10.59086/jti.v4i2.960>