

Evaluasi dan Mitigasi Distorsi Harmonika Transformator 1250 kVA Beban Motor Pompa Air

Anang Dasa Novfowan^{*a)}, Mochammad Mieftah^{a)}, Dhimas Dhesah Kharisma^{a)}

(Received 15 April 2025 || Revised 12 Mei 2025 || Published 30 Juni 2025)

Abstract: As a fundamental part of modern life, electricity must be both reliable and efficient—qualities that can be affected by issues like voltage unbalance and harmonic distortion. This study investigates power quality in a 1250 kVA transformer that supplies continuous power to water pump motors at PDAM Wendit, which operate 24 hours a day. Data were collected using the Power Logic PM5100, while a passive filter design was developed and tested through simulations in Matlab/Simulink. The results show a Voltage Unbalance Factor (VUF) of 0,32%, which falls within the acceptable range according to NEMA standards. However, the Total Harmonic Distortion of Voltage (THDV) was found to be between 8% and 9,2%, exceeding the 8% limit recommended by IEEE 519-2014. The average power factor measured was 0,9. To address the excessive harmonic distortion, a single-tuned passive filter was designed targeting the dominant third-order harmonics. Simulations revealed that the filter successfully lowered the THDV to below 6% and reduced current by 1,5% to 3,4%. These findings highlight the importance of harmonic mitigation not only in meeting regulatory standards but also in improving energy efficiency, reducing power losses, and ensuring longer operational life for critical equipment like water pump motors.

Keywords: Harmonic Distortion, Power Quality, Total Harmonic Distortion of Voltage (THDV), Passive Filter, Distribution Transformer

1. Pendahuluan

Dalam era industri modern dengan beban motor berdaya besar, seperti stasiun pompa air, sangat rentan terhadap masalah kualitas daya. Sebuah studi di sektor pertambangan yang dipublikasikan di Energies tahun 2024 menemukan bahwa fluktuasi tegangan dan harmonika menyebabkan penurunan efisiensi proses, peningkatan konsumsi energi, serta kerugian produksi yang signifikan [1], [2]. Survei terhadap perusahaan industri di Lituania juga mengungkapkan bahwa masalah kualitas daya, termasuk gangguan tegangan dan daya rendah, memicu kerugian finansial dan menurunnya produktivitas secara langsung dan diperlukan mitigasi khusus [3] dalam pemenuhan THD di bawah 5 % untuk memenuhi standar seperti IEEE 519 [4]. Dengan demikian, pemantauan dan perbaikan kualitas daya merupakan kebutuhan untuk menjaga performa dan umur panjang peralatan di lingkungan industri.

Pada PDAM Wendit, transformator 1250 kVA yang beroperasi 24 jam nonstop untuk menyuplai motor pompa menunjukkan indikasi gejala penurunan performa. Beban jenis ini dikenal sensitif terhadap fluktuasi tegangan dan menjadi salah satu penyumbang utama distorsi harmonik dalam sistem kelistrikan [5], [6]. Ketidakseimbangan tegangan pada transformator distribusi dapat menyebabkan peningkatan arus netral dan rugi-rugi daya yang signifikan, sehingga menurunkan efisiensi serta memperpendek umur peralatan [7]. Sementara itu, harmonika arus dan tegangan dapat menimbulkan pemanasan berlebih pada transformator, resonansi, dan penurunan faktor daya [8]. Permasalahan ini menuntut adanya evaluasi menyeluruh terhadap kualitas daya serta strategi mitigasi yang tepat untuk menjaga performa sistem distribusi tetap optimal [9].

Berbagai penelitian terkini telah mengkaji kualitas daya, terutama aspek ketidakseimbangan dan harmonika, menggunakan data lapangan pada sistem distribusi. Sebagai contoh, studi oleh Novfowan et al. menemukan bahwa beban tidak seimbang mengakibatkan arus netral yang signifikan dan peningkatan losses, di mana penyeimbangan beban satu tahap mampu mengurangi kerugian hingga 1,06 % [10]. Sutjipto et al. pada transformator 500 kVA melaporkan THD sebesar 14,5 %, melebihi batas IEEE 519-1992, dan menyebabkan peningkatan losses sebesar 1,24 kW akibat distorsi harmonika [8]. Penelitian oleh Risca et al. dari

menunjukkan bahwa penggunaan filter pasif *single-tuned* meningkatkan faktor daya dari 93,4 % menjadi 99,5 % dan menurunkan THD_i arus dari 15,6 % ke 10,1 % [11]. Serupa, Prasetyo et al. mencatat pengurangan THD_v dari 9,39 % menjadi 6,61 % serta peningkatan faktor daya dari 0,971 menjadi 0,985 [12]. Zondra et al. pada sistem VSD 160 kW juga melaporkan bahwa filter pasif *single-tuned* mampu mereduksi THD_i orde-5 dari 42,3 % menjadi 0,61 %, sesuai standar IEEE 519-2014 [13].

Meskipun banyak penelitian telah dilakukan mengenai kualitas daya, masih terdapat beberapa celah yang perlu diisi. Penelitian sebelumnya seringkali fokus pada analisis atau mitigasi salah satu aspek kualitas daya misalnya, hanya ketidakseimbangan atau hanya harmonika, atau pada jenis beban tertentu. Kurangnya analisis komprehensif yang mengintegrasikan berbagai parameter kualitas daya pada sistem yang beroperasi 24 jam dengan beban motor induksi besar masih menjadi tantangan. Selain itu, implementasi dan verifikasi solusi mitigasi harmonika pada kondisi operasional riil seringkali terbatas pada simulasi tanpa validasi lapangan yang mendalam. Oleh karena itu, diperlukan pendekatan holistik yang tidak hanya memonitor tetapi juga menganalisis interaksi antar parameter kualitas daya dan mengusulkan solusi mitigasi yang terintegrasi.

Untuk mengatasi celah tersebut, penelitian ini akan memperkenalkan konsep pemantauan terintegrasi yang mencakup pengukuran berbagai parameter kualitas daya secara *real-time* menggunakan perangkat canggih seperti Power Logic PM5100. Pendekatan ini memungkinkan identifikasi masalah kualitas daya secara lebih akurat dan menyeluruh. Selanjutnya, kami akan merancang dan mensimulasikan penerapan filter pasif tunggal yang disetel (*single-tuned passive filter*) secara spesifik untuk mengatasi harmonika dominan, khususnya harmonika orde ketiga, yang ditemukan signifikan dalam sistem. Filter ini tidak hanya dirancang untuk mengurangi distorsi harmonika tetapi juga untuk meningkatkan faktor daya dan mengurangi kerugian daya, sehingga mengoptimalkan kapasitas operasional transformator.

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis secara komprehensif kondisi ketidakseimbangan tegangan dan arus, distorsi harmonika tegangan (THDV) dan arus (THDI), serta faktor daya pada transformator 1250 kVA yang menyuplai motor pompa air di PDAM Wendit, Kota Malang. Dengan membandingkan hasil pengukuran dengan standar yang berlaku seperti NEMA MG-1

*Korespondensi: anang.dasa@polinema.ac.id

a) Prodi Teknik Listrik, Jurusan Teknik Elektro, Politeknik Negeri Malang, Kota Malang, Indonesia

1998, IEEE 141-1993, IEC 61000 2-2, dan IEEE 519-2014, penelitian ini akan memberikan gambaran yang jelas mengenai kualitas daya sistem. Selain itu, penelitian ini juga bertujuan untuk merancang dan mensimulasikan filter pasif single-tuned guna memitigasi distorsi harmonika yang berlebihan, serta mengevaluasi efektivitasnya dalam meningkatkan kualitas daya secara keseluruhan. Hasil dari studi ini diharapkan dapat memberikan kontribusi nyata dalam pengambilan keputusan untuk menjamin operasi sistem yang lebih handal, efisien, dan memiliki umur peralatan yang lebih panjang.

2. Metode

2.1 Ketidakseimbangan Tegangan dan Arus

Ketidakseimbangan tegangan dan arus diakibatkan oleh beberapa faktor seperti kondisi tegangan suplai, impedansi penghantar tiga fasa yang tidak sama, tidak meratanya beban dan lain sebagainya. Dalam banyak sistem distribusi, ketidakseimbangan arus sering kali jauh melebihi ketidakseimbangan tegangan karena beban satu fasa yang bervariasi dan distribusi beban yang tidak merata antar-fasa [13].

Ketidakseimbangan tegangan menurut NEMA MG-1 1998 berfokus pada ketidakseimbangan tegangan antar VL-L yang distilahkan Line Voltage Unbalance Ratio (LVUR). Persentase LVUR dihitung dengan mencari rasio antara deviasi maksimum VL-L dengan nilai rata-ratanya. Secara matematis dapat diekspresikan pada Persamaan (2-1) sampai dengan Persamaan (2-3) [9].

$$LVUR (\%) = \frac{\Delta V_{L-L}^{Max}}{V_{L-L}^{avg}} \times 100\% \quad (2-1)$$

$$V_{L-L}^{avg} = \frac{V_{ab} + V_{bc} + V_{ca}}{3} \quad (2-2)$$

$$V_{L-L}^{avg} = \text{Max}\{|V_{L-L} - V_{ab}|, |V_{L-L}^{avg} - V_{bc}|, |V_{L-L}^{avg} - V_{ca}|\} \quad (2-3)$$

ΔV_{L-L}^{Max} adalah deviasi/penyimpangan maksimum tegangan line Vab, Vbc, dan Vca dengan nilai rata-ratanya (V_{L-L}^{avg}). Nilai maksimum LVUR(%) yang distandarkan NEMA MG-1998 sebesar 1%. Nilai ketidakseimbangan tegangan fasa V_{L-N} didefinisikan oleh IEEE 141 1993 dan IEC 61000 2-2. Istilah ketidakseimbangan tegangan V_{L-N} menurut IEEE 141 1993 adalah *Phase Voltage Unbalance Rate* (PVUR) yang dihitung sebagaimana LVUR(%), namun tegangan yang dimasukkan adalah tegangan fasa (V_{L-N}). Sedangkan menurut definisi IEC 61000 2-2, ketidakseimbangan tegangan sebagai perbandingan antara tegangan urutan negatif dengan tegangan urutan positif dalam persen yang disebut sebagai *Voltage Unbalance Factor* (VUF). Urutan tegangan tersebut dihitung dari V_{L-N} (Va,Vb, Vc) dan bilangan kompleks $a = 1 \angle 120^\circ$ sebagaimana Persamaan (2-4) sampai dengan Persamaan (2-6).

$$VUF (\%) = \left| \frac{V_n}{V_p} \right| \times 100 \quad (2-4)$$

$$V_p = \frac{V_a + aV_b + a^2V_c}{3} \quad (2-5)$$

$$V_n = \frac{V_a + aV_c + a^2V_b}{3} \quad (2-6)$$

Baik IEEE 141 1993 dan IEC 61000 2-2 membatasi nilai PVUR (untuk motor induksi) dan VUF maksimum sebesar 2%. Apabila ketidakseimbangan tegangan melebihi 2%, maka akan mulai berpengaruh pada kinerja motor induksi [14].

Ketidakseimbangan arus atau *Current Unbalance* (CU%) dihitung dengan rumus yang sama yang digunakan untuk menghitung LVUR % dan PVUR%. NEMA MG 1998 memberikan anjuran CU% maksimum tidak boleh lebih dari 30% [15].

2.2 Distorsi Harmonika Tegangan dan Arus

Pada umumnya, adanya harmonika banyak disebabkan oleh peralatan elektronika daya yang memanipulasi bentuk gelombang tegangan dan arus sehingga pada titik kopel bersama timbul harmonika yang mempengaruhi beban yang lain. Harmonika dapat menyebabkan bertambahnya losses penghantar, losses pada transformator yang pada akhirnya berakibat pada kenaikan suhu dan berkurangnya *lifetime* peralatan [15].

Total Harmonic Distortion (THD) merujuk pada nilai efektif seluruh harmonika yang mendistorsi tegangan/arus yang ada pada sistem. THD didapatkan dari membandingkan nilai total harmonika tegangan/arus dengan harga fundamental sebagaimana Persamaan (2-7).

$$THD = \sqrt{\frac{\sum_{h=1}^{h_{max}} M_h^2}{M_1}} \quad (2-7)$$

Pada THD_v merujuk tingkat harmonika tegangan, M_h adalah besar tegangan harmonika (volt) dan M₁ adalah tegangan fundamental (50Hz). Sedangkan THD_i merujuk pada distorsi harmonika arus sehingga M_h dan M₁ masing-masing adalah nilai arus harmonika dan arus fundamental. Untuk harmonika arus, istilah *Total Demand Distortion* (TDD) adalah nilai rasio antara harga RMS harmonika terhadap beban puncak. Nilai TDD dapat diketahui dengan menggunakan Persamaan (2-8).

$$TDD = \sqrt{\frac{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2}{I_1}} \quad (2-8)$$

Harmonika tegangan dan arus dibatasi oleh standar IEEE 519-2014. Dengan THD_v maksimum tidak boleh melebihi sebagaimana Tabel 2.1 dan untuk harmonika arus nilai TDD tidak boleh melebihi Tabel 2.2. Tegangan sistem diklasifikasikan empat kelompok menurut IEEE 519-2014 dengan nilai batasan THD_v maksimum yang berbeda-beda. Sedangkan untuk harmonika arus, batasan TDD diklasifikasikan berdasarkan rasio hubung singkat ISC/IL (rasio arus hubung singkat dan arus beban maksimum) [16].

TABEL 2.1 BATAS THDV MAKSUMUM

Tegangan pada PCC (kV)	Tegangan Distorsi Harmonika Individu (%)	Distorsi Harmonika Total (THD) (%)
Maks 1 kV	5	8
1 kV- 69 kV	3	5
69 kV-161 kV	1,5	2,5
>161 kV	1	1,5

TABEL 2.2 BATAS TDD MAKSUMUM

Isc/IL	Tidak Lebih 69 kV					
	h<11	11≤h<17	17≤h<23	23≤h<35	35≤h	TDD (%)
<20	4	2	1,5	0,6	0,3	5
20-50	7	3,5	2,5	1	0,5	8
50-100	10	4,5	4	1,5	0,7	12
100-1000	12	5,5	5	2	1	15
>1000	15	7	6	2,5	1,4	20
69 kV < V ≤ 161 kV						
<20	2	1	0,75	0,3	0,15	2,5
20-50	3,5	1,75	1,25	0,5	0,25	4
50-100	5	2,25	2	0,75	0,35	6
100-1000	6	2,75	2,5	1	0,5	7,5

>1000	7,5	3,5	3	1,25	0,7	10
V > 161 kV						
<50	2	1	0,75	0,3	0,15	2,5
≥50	3	1,5	1,15	0,45	0,22	3,75

2.3 Objek Penelitian

Tempat pengambilan data berada di *Main Distribution Panel* (MDP) Transformator yang memiliki kapasitas 1250 kVA dengan tegangan nominal 20/0,4 kV dan Z% (tegangan impedansi) sebesar 5,75%. Beban yang disuplaiinya berupa motor induksi tiga fasa terhubung delta dengan kapasitas 200 kW 380 V yang berjumlah lima unit. LVUR = Max [4,77; 3,07; 1,72] 100% 392,92 4,77 Dari lima buah motor yang ada, tiga yang beroperasi secara aktif selama 24 jam penuh.

2.4 Metode Pengambilan Data

Pengambilan data dilakukan dengan melaksanakan pengukuran langsung di MDP Transformator 1250 kVA menggunakan alat ukur PM5100 yang telah terintegrasi dengan sistem logging data setiap 30 detik sekali. PM 5100 ini memiliki kemampuan untuk membaca nilai rms tegangan VL-L VL-N dan arus line serta dapat mengukur nilai THDV, THD dan menampilkan *individual harmonic*-nya.

2.5 Analisis

Data yang didapatkan dari pengukuran PM5100 setiap 30 detik diolah dan dihitung. Selanjutnya, nilai ekstrim dan rata-rata data tersebut dibandingkan dengan standar yang berlaku sebagai berikut.

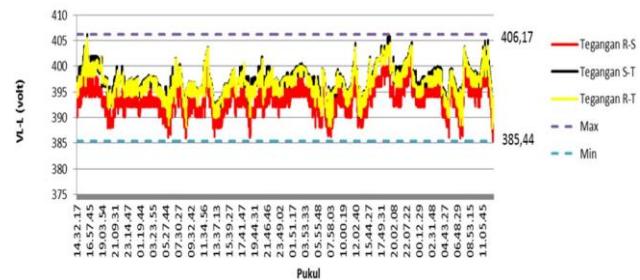
1. Ketidakseimbangan tegangan VL-L (LVUR) dengan standar NEMA MG-1 1998.
2. Ketidakseimbangan tegangan VL-N (PVUR dan VUF) dibandingkan dengan IEEE 141-1993 dan IEC 61000-2-2.
3. Distorsi harmonika tegangan (THDV) dan arus THDI dibandingkan dengan IEEE 519-2014.

Perancangan mitigasi untuk mengurangi THDV dan THDI dihitung dan disimulasikan dengan bantuan software MATLAB/Simulink. Dari data simulasi, dilakukan pengkajian bagaimana pengaruh mitigasi tersebut terhadap tegangan dan arus. Jadi dapat diketahui apakah THDI dan THDV berhasil dikurangi. Proses analisa diatas menghasilkan kesimpulan akhir untuk menjawab permasalahan yang diuraikan di pendahuluan.

3. Hasil dan Pembahasan

3.1 Kondisi Tegangan dan arus

Hasil pengukuran tegangan dan arus di Transformator Wendit 1 PDAM Kota Malang adalah sebagaimana berikut. Persentase tegangan *line to line* terhadap 400 V, tegangan V_{r-s}, V_{s-t}, V_{r-t} minimum sebesar 96%, 97,1% dan 97% sedangkan tegangan maksimumnya masing-masing sebesar 100,85%, 101,54%, dan 101,37%. Interval nilai V_{L-L} dalam volt selebar 385V-406,17 V (Gambar 3.1). Sedangkan pada V_{L-N} yang terhitung, interval pergerakan nilai berada pada angka 22,534 V - 234,52 V.



GAMBAR 3.1 TEGANGAN LINE-TO-LINE TERUKUR 3 HARI

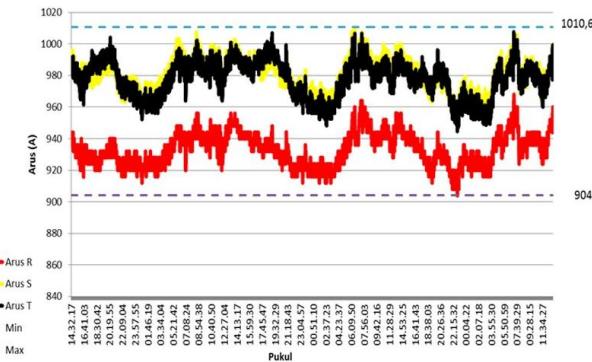
Pada sampel data pengukuran dengan $V_{ab} = 338,15$ V, $V_{bc} = 395,99$ V dan $V_{ca} = 394,64$ V, V_{avg} dan LVUR dihitung dengan Persamaan (2-1) sampai Persamaan (2-3) dengan hasil $V_{avg} = 392,92$ V dan LVUR = 1,2%. Seluruh data dihitung dengan cara yang sama, sehingga didapatkan $0,21\% < LVUR\% < 1,2\%$. Rata-rata LVUR% yang terjadi sebesar 0,62%. Pada data V_{L-N} , nilai PVUR berkisar 0,2%-1,2% dengan nilai rata-rata 0,63%. Nilai LVUR(%) minimum telah memenuhi standar (0,21% berarti <1%), sedangkan nilai LVUR maksimum melebihi batasan standar NEMA MG 1-1998 sebesar 1% (1,2% berarti >1%). Nilai LVUR(%) rata-rata telah memenuhi standar (0,62% berarti <1%), yang dapat dimaknai bahwa sebagian besar VL-L Transformator Wendit 1 telah memenuhi standar. Nilai PVUR minimum, maksimum dan rata-rata bernilai <1,5%. Dengan PVUR <1,5%, ketidakseimbangan tegangan fasa di Transformator Wendit 1 sesuai standar IEEE 141-1993 yang memberikan batasan sebesar 2%.

VUF dapat dihitung menggunakan Persamaan (2-4) sampai dengan Persamaan (2-6). Sampel data pukul 09.58 dengan $V_a = 224,1$ V, $V_b = 228,62$ V, dan $V_c = 227,85$ V. Dari seluruh data yang terukur, nilai VUF minimum 0,1078%, maksimum 0,6158% dan nilai rata-rata 0,324% (dengan V_n 1,4 volt). Ketiga nilai VUF telah telah memenuhi standar IEC 61000-2-2 (<2%).

Berdasarkan Gambar 3.2, arus I_r bergerak antara 904A sampai 968 A, I_s pada kisaran 948,54 A sampai 1010,6 A (56% pembebanan transformator), sedangkan I_t pada nilai 944,52 A sampai 1007,58 A. Nilai arus I_r bernilai terendah di antara dua arus yang lain (I_s dan I_t) dengan perbedaan sebesar 42 A sampai 44 A.

Ketidakseimbangan arus CU% dihitung sebagaimana PVUR% dan LVUR%. Dari data yang tersedia, ketidakseimbangan arus Transformator 1.250 kVA berkisar 2,3%-4,35%. NEMA MG 1 1998 memberikan anjuran ketidakseimbangan arus maksimum sebesar 30%. Dengan mengacu pada anjuran tersebut, maka nilai ketidakseimbangan arus Transformator tersebut telah memenuhi standar. Nilai maksimum yang hanya mencapai 4,35% menjadi tolok ukur sekaligus penentu kepastian bahwa ketidakseimbangan arus telah memenuhi batas 30% tersebut.

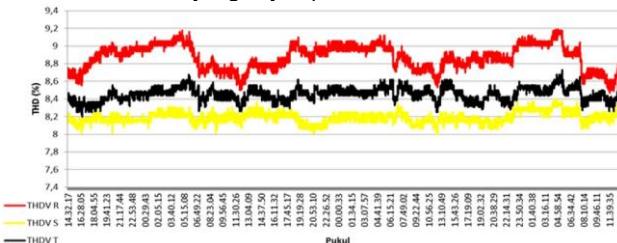
Hasil ini selaras dengan temuan Zhang et al. yang menyatakan bahwa ketidakseimbangan arus biasanya lebih besar dibanding ketidakseimbangan tegangan karena dipengaruhi oleh distribusi beban yang tidak merata antar-fasa [5]. Hal serupa juga ditemukan oleh Tohir et al. bahwa variasi beban rumah tangga dan industri ringan secara nyata lebih berpengaruh terhadap ketidakseimbangan arus dibanding tegangan [17].



GAMBAR 3.2 ARUS TERUKUR DI MDP TRANSFORMATOR

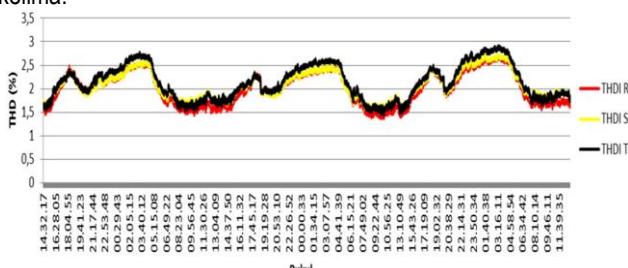
3.2 Distorsi Harmonika

Berdasarkan Gambar 3.3, THD_{vr} bergerak dari 8,47% , sampai 9,19%, dengan THD_{vr} rata-rata sebesar 8,87%. THD_{vs} memiliki interval 8% - 8,4 % dengan nilai rata-rata sebesar 8,18%. Sedangkan THD_{vt} berentang 8,2% - 8,73% dan nilai rata-rata sebesar 8,45%. THD_v yang muncul terdiri dari IHD_v dengan orde 3, 5 dan orde 9, ketika IHD_v orde 3 yang mendominasi. Sehingga secara umum THD_v yang terjadi pada Transformator bernilai $\geq 8\%$.



GAMBAR 3.3 THDV TERUKUR DI MDP TRANSFORMATOR

Berdasarkan IEEE 519-2014 (Tabel 2.1), untuk tegangan 8% pada Transformator, kondisi harmonika tegangan tersebut tidak memenuhi dengan standar. THD_i yang disajikan Gambar 4, bergerak pada interval 1,36% - 2,91% di ketiga fasa. Dari pola kecenderungannya, THD_i pada pukul 18.00-06.00 lebih tinggi daripada pukul 06.00-18.00. THD_i hanya terdiri dari harmonika orde kelima.



GAMBAR 3.4 THDI TERUKUR

THD_i dikonversi menjadi TDD sebelum dibandingkan dengan IEEE 519-2014. Dengan THD_i = 2,69%, I_{rms} = 924 A dan I_{lmakss} = 1010,9A, maka diperoleh TDD = 2,46%. Dengan cara yang sama, seluruh data THDI dikonversi ke TDD. TDD_r rata-rata sebesar 1,86% dalam interval 1,26% - 2,46%. Pada fasa S, TDD bernilai antara 1,47% - 2,60% dengan nilai rata-rata sebesar 2,01%. Sedangkan pada TDD_t, berkisar 1,40% - 2,75% dengan nilai rata-rata 2,06%. Setelah itu, nilai ISC/IL untuk mengetahui batasan TDD (Tabel 2.2) adalah sebagaimana berikut. Data Transformator: kapasitas = 1.250 kVA, tegangan = 20/0,4 kV, dan $Z\% = 5,75\%$,

arus hubung singkat = 31,38 kA, arus beban IL = 962,31 A. Nilai I_{sc}/I_L di transformator sebesar 32,6, sehingga TDD maksimum yang diijinkan IEEE 519-2014 sebesar 8%, dengan nilai TDD individual maksimum 7% (Tabel 2.2). Dengan demikian TDD maksimum ketiga fasa telah memenuhi standar IEEE 519-2014 (TDD maks 2,75% < 7%).

Hasil ini konsisten dengan penelitian Sutjipto et al. yang menunjukkan bahwa harmonika tegangan sering kali lebih bermasalah daripada harmonika arus. Dalam penelitiannya pada transformator 500 kVA, THD_v tercatat di bawah batas, namun THD_i tinggi menyebabkan derating transformator hingga 14,32%. Temuan ini mendukung bahwa penting untuk mengidentifikasi jenis harmonika dominan agar mitigasi lebih terfokus [8].

3.3 Faktor Daya

Sebagaimana yang terukur pada Transformator, Faktor Daya atau Power Factor (PF) fasa R konstan pada nilai 0,93, untuk PF fasa S, nilai berentang 0,91-0,92, dan PF fasa T berubah nilai pada interval 0,87-0,88. Daya aktif rata-rata pada fasa R sebesar 193,4 kW dengan daya reaktif induktif sebesar 78 kVAR, sedangkan untuk fasa S daya aktif sebesar 215,71 kW dan daya reaktif induktif 96,22 kVAR serta pada fasa T daya aktif dan reaktif induktif masing-masing senilai 191,72 kW dan 96,22 kVAR. Nilai PF terendah yang terjadi pada masing-masing fasa telah memenuhi ketentuan ($>0,85$). Ketentuan tersebut tertuang pada PERMEN-ESDM No.28 Th.2016 mengenai tarif tenaga listrik yang disediakan oleh PT PLN (Persero). Nilai kVARH PF yang melebihi 0,85 dalam tarif tersebut tidak dikenai biaya/denda. Jadi PF Transformator Wendi 1 PDAM Kota Malang sudah cukup bagus dan tidak menimbulkan denda/sanksi.

3.4 Perancangan dan Simulasi Filter Pasif Single Tune

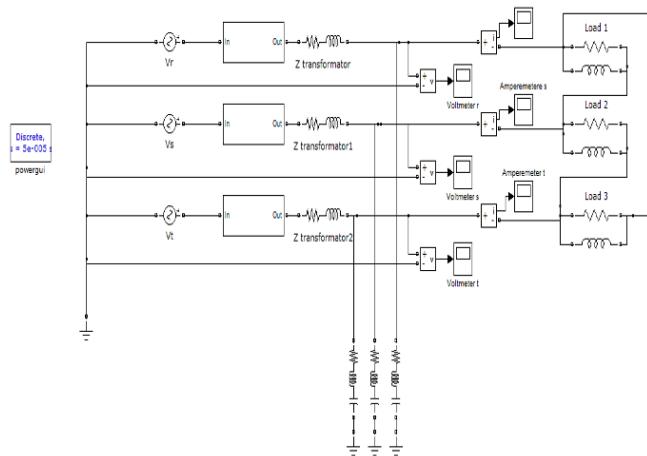
Perhitungan kapasitas filter pasif dengan memperhitungkan kompensasi daya reaktif, dari PF 0,9 menjadi 0,925 sebagaimana berikut.

1. Menentukan besar impedansi filter pasif single tune (X_{filt}) sehingga daya reaktif berkurang dari 290,98 kVAR menjadi 227,92 kVAR dengan persebaran filter orde-3 mengkompensasi daya reaktif sebesar 35 kVAR (PF 0,9 menjadi 0,92) dan filter orde-5 mengkompensasi 9,55 kVAR (PF 0,92 menjadi 0,925). Diperoleh $X_{filt-3} = 4,56 \Omega$ dan $X_{filt-5} = 16,75 \Omega$.
2. Menentukan besar impedansi kapasitor, untuk itu, hal yang perlu menjadi catatan untuk filter orde-3 dan orde-5, nilai h ($h = 3 + h = 5$) diatur sebesar 95% dari nilai penuhnya, sehingga diperoleh $X_{c3} = 5,2 \Omega$ dan $X_{c5} = 17,52 \Omega$.
3. Menentukan besar impedansi induktor $X_{L-3} = 0,64 \Omega$ dan $X_{L-5} = 0,8 \Omega$.
4. Menentukan besar kapasitansi (farad) diperoleh $C_3 = 612,13 \mu F$ dan $C_5 = 181 \mu F$
5. Menentukan besar induktansi diperoleh $L_3 = 2,037 \text{ mH}$ dan $L_5 = 2,6 \text{ mH}$.

Pada Gambar 3.5, sumber tegangan dioperasikan pada V_{rms} masing-masing fasa yakni 227,13 V, 229,37 V dan 229,02 V (50 Hz). THD_v dalam simulasi MATLAB/simulink ini disubstitusi dengan tiga sumber tegangan yang dipasang secara seri dengan orde harmonika 3,5, dan 9 (7,94%, 1,36%, dan 2,15%). Bagian kedua, impedansi transformator (20/0,4 kV 1250 kVA) dipasang secara

seri dengan beban dengan $0,00153+j0,007238$ Ohm. Pada bagian yang ketiga, beban diwakilkan oleh resistor dan reaktansi induktif yang terhubung secara delta dengan dioperasikan pada daya 664,18 kVA dan PF 0,9. Pada bagian yang keempat, instrumentasi voltmeter dan ampermeter untuk setiap fasa. Tabel 3.1 menunjukkan hasil simulasi di Matlab. Filter pasif disimulasi menggunakan MATLAB/Simulink untuk mengetahui dampaknya terhadap tegangan dan arus. Setelah adanya filter, THD_v bernilai 7,98%-7,99% sedangkan THD_i sebesar 1,14%. Nilai THD_v sama seperti sebelum dipasang filter terdiri atas harmonika orde 3, 5, dan 9. Namun begitu, THD_v dan THD_i telah memenuhi standar IEEE 519-2014. Dari dua simulasi (Gambar 3.5), didapatkan bahwa THD_v turun dari 8,48%-8,49% menjadi 7,98%-7,99%, sedangkan THD_i berkurang dari 1,23% menjadi 1,14% (turun 7,3%). THD_v berkurang sebesar 5,89%-6% dari sebelum pemasangan filter. Pengaruh filter pasif single tune memberikan dampak yang baik untuk sistem. Kenaikan tegangan beban mengindikasikan berkurangnya drop voltage, yang diakibatkan oleh berkurangnya besar arus yang mengalir akibat kompensasi daya reaktif oleh filter. THD_v, THD_i, dan arus yang berkurang dapat lebih mengoptimalkan kapasitas transformator untuk beroperasi, serta secara tidak langsung juga menurunkan losses, kenaikan temperatur belitan dan lifetime transformer itu. Berkurangnya daya reaktif akan meningkatkan nilai PF sehingga arus dan losses akan berkurang.

Temuan ini sejalan dengan hasil Risca et al. yang menunjukkan peningkatan power factor dari 93,4% menjadi 99,5% dan penurunan THD_i dari 15,6% ke 10,1% setelah penerapan filter pasif single-tuned [11]. Juga diperkuat oleh Prasetyo et al. yang melaporkan penurunan THD_v dari 9,39% ke 6,61% dan peningkatan PF menjadi 0,985 [12]. Ini menunjukkan bahwa perancangan berbasis simulasi memberikan pendekatan praktis yang sangat efektif untuk implementasi nyata.



GAMBAR 3.5 RANGKAIAN SIMULASI MATLAB/SIMULINK DENGAN FILTER PASIF SINGLE TUNE

TABEL 3.1 HASIL SIMULASI MATLAB/SIMULINK SEBELUM DAN SESUDAH DIPASANG FILTER

Besaran	Sebelum			Sesudah			D (%)		
	r	s	t	r	s	t	r	s	t
THD _v %	8,49	8,49	8,48	7,99	7,99	7,97	5,89	5,89	6
IHD _v Orde-3	8,09	8,09	8,08	7,6	7,59	7,58	6,1	6,2	6,2
IHD _v Orde-5	1,35	1,35	1,35	1,26	1,25	1,25	6,9	7,5	7,4
IHD _v Orde-9	2,19	2,19	2,19	2,13	2,13	2,13	2,9	2,9	2,7
THD _i %	1,23	1,23	1,23	1,14	1,14	1,14	7,3	7,3	7,3

Tegangan Beban (V)	223,7	226	225,6	224,1	226,3	225,9	0,18	0,13	0,13
Arus Trafo (A)	933,4	935,2	952,4	936,1	920,9	919,9	0,3	1,5	3,4
Daya aktif (kW)	189	192	191	193,2	192	192,6	0,63	0	0,63
Daya reaktif (kVAR)	87,8	88,8	89,6	74,3	74,98	75,8	15,3	15,6	15,4
PF					0,9		0,93		3,3

4. Kesimpulan

Penelitian ini membahas evaluasi kualitas daya pada transformator 1250 kVA yang menyuplai beban motor pompa air secara kontinu di PDAM Wendit. Topik ini sangat penting mengingat transformator yang melayani beban besar dan bekerja tanpa henti memiliki potensi mengalami degradasi performa akibat ketidakseimbangan tegangan, harmonika, serta faktor daya yang rendah. Ketidakstabilan parameter kelistrikan tersebut tidak hanya berdampak pada efisiensi sistem, tetapi juga pada umur pakai peralatan serta kemungkinan penalti energi dari penyedia daya. Dari hasil pengukuran, ketidakseimbangan tegangan dan arus (LVUR, PVUR, VUF, CU%) secara umum telah memenuhi standar internasional seperti NEMA MG-1, IEEE 141-1993, dan IEC 61000-2-2. Namun, nilai THD_v melebihi ambang batas IEEE 519-2014, sedangkan THD_i dan TDD masih dalam batas wajar. Rata-rata PF di semua fasa berada di atas 0,85, yang menunjukkan efisiensi penggunaan daya reaktif masih cukup baik. Untuk mengatasi gangguan harmonika tegangan, filter pasif single-tuned dirancang dan disimulasikan menggunakan MATLAB/Simulink. Hasil simulasi menunjukkan bahwa filter tersebut efektif menurunkan nilai THD_v dan THD_i, sekaligus meningkatkan efisiensi sistem secara keseluruhan. Temuan dalam penelitian ini memiliki keterkaitan yang kuat dengan studi-studi sebelumnya. Hasil ketidakseimbangan arus yang lebih besar dibanding tegangan sesuai dengan laporan Zhang et al. [5] dan Tohir et al. [17], yang menyebutkan bahwa variasi beban antarfasa lebih dominan memengaruhi arus. Di sisi lain, hasil pengukuran harmonika tegangan dan efektivitas filter pasif sejalan dengan temuan Sutjipto et al. [8], Risca et al. [11], dan Prasetyo et al. [12], yang menunjukkan bahwa harmonika tegangan lebih kompleks untuk dikendalikan, namun dapat dikurangi secara signifikan dengan strategi mitigasi berbasis filter pasif.

Referensi

- [1] T. Siostrzonek, J. Wójcik, M. Dutka, and W. Siostrzonek, "Impact of Power Quality on the Efficiency of the Mining Process," *Energies*, vol. 17, no. 22, Nov. 2024, doi: 10.3390/EN17225675.
- [2] M. Balsaraf, M. Dinesh, M. Takate, and V. Shivaji, "Zigbee Based Wireless Patient Monitoring," *Int. J. Innov. Res. Electr. Electron. Instrum. Control Eng.*, vol. 4, no. 4, pp. 2321–5526, 2016, doi: 10.17148/IJIREEICE.2016.4466.
- [3] V. Liubčuk, V. Radziukynas, G. Kairaitis, and D. Naujokaitis, "Power Quality Impact and Its Assessment: A Review and a Survey of Lithuanian Industrial Companies," *Inventions*, vol. 10, no. 2, Apr. 2025, doi: 10.3390/INVENTIONS10020030.
- [4] M. L. Duc, P. Bilik, and R. Martinek, "Enhancing Power Quality in Industry 4.0 Manufacturing Using the Multi-Criteria Selection Method," *IEEE Access*, vol. 12, pp. 63171–63198, 2024, doi:

- 10.1109/ACCESS.2024.3388846.
- [5] D. Zhang, R. An, and T. Wu, "Effect of voltage unbalance and distortion on the loss characteristics of three-phase cage induction motor," *IET Electr. Power Appl.*, vol. 12, no. 2, pp. 264–270, Feb. 2018, doi: 10.1049/IET-EPA.2017.0464.
- [6] P. Donolo, G. Bossio, C. De Angelo, G. García, and M. Donolo, "Voltage unbalance and harmonic distortion effects on induction motor power, torque and vibrations," *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 140, pp. 866–873, Nov. 2016, doi: 10.1016/j.epsr.2016.04.018.
- [7] A. Hermawan, A. Koimam, R. A. Ananto, and S. L. Hermawan, "Evaluasi Ketidakseimbangan Beban Pada Penyulang Unicora," *Elposys J. Sist. Kelistrikan*, vol. 11, no. 2, pp. 104–109, Jun. 2024, doi: 10.33795/ELPOSYS.V11I2.5191.
- [8] R. Sutjipto, W. Kusuma, and K. Zulfianta, "Analisis Pengaruh Harmonika Terhadap Losses Transformator 500kVA," *Elposys J. Sist. Kelistrikan*, vol. 9, no. 2, pp. 40–45, Jun. 2022, doi: 10.33795/ELPOSYS.V9I2.614.
- [9] M. H. Albadi, A. S. Al Hinai, A. H. Al-Badi, M. S. Al Riyami, S. M. Al Hinai, and R. S. Al Abri, "Unbalance in power systems: Case study," *Proc. IEEE Int. Conf. Ind. Technol.*, vol. 2015-June, no. June, pp. 1407–1411, Jun. 2015, doi: 10.1109/ICIT.2015.7125294.
- [10] A. D. Novfowan, M. Miftah, and W. Kusuma, "Alternatif Penanganan Losses Akibat Ketidakseimbangan Beban Pada Trafo Distribusi," *Elposys J. Sist. Kelistrikan*, vol. 10, no. 1, pp. 54–56, Mar. 2023, doi: 10.33795/ELPOSYS.V10I1.716.
- [11] A. M. Risca, M. Facta, and D. Denis, "PERENCANAAN FILTER PASIF PADA SISI TEGANGAN RENDAH UNTUK MENGURANGI HARMONIKA BEBAN NON-LINEAR DI DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO UNIVERSITAS DIPONEGORO," *Transient J. Ilm. Tek. Elektro*, vol. 10, no. 3, pp. 543–551, Sep. 2021, doi: 10.14710/TRANSIENT.V10I3.543-551.
- [12] H. Prasetijo, P. Priswanto, W. H.P., and I. Irunowo, "Analisa Pemasangan Filter Pasif Sebagai Peredam Harmonika Akibat Beban Non Linier," *JRST (Jurnal Ris. Sains dan Teknol.)*, vol. 7, no. 1, pp. 109–114, Mar. 2023, doi: 10.30595/JRST.V7I1.16677.
- [13] E. Zondra, Nofriandi, and M. P. Halilintar, "Analisis Pemasangan Filter Pasif Untuk Mereduksi Harmonika Pada Variable Speed Drive Di PT. Indah Kiat Pulp and Paper Tbk. Perawang," *SainETIn J. Sains, Energi, Teknol. dan Ind.*, vol. 8, no. 1, pp. 1–12, Dec. 2023, doi: 10.31849/SAINETIN.V8I1.10030.
- [14] K. Girigoudar and L. A. Roald, "On the Impact of Different Voltage Unbalance Metrics in Distribution System Optimization," *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 189, Apr. 2020, doi: 10.1016/j.epsr.2020.106656.
- [15] H. Arghavani and M. Peyravi, "Unbalanced current-based tariff," *CIRED - Open Access Proc. J.*, vol. 2017, no. 1, pp. 883–887, Oct. 2017, doi: 10.1049/OAP-CIRED.2017.0129/ASSET/4E4C7DBE-1EBC-432F-A4DA-DF5EE1D05665/ASSETS/IMAGES/LARGE/OAP-CIRED.2017.0129.03.JPG.
- [16] P. Papechen and S. Sebastian, "A New RS Based Encryption Scheme for Wireless Communication," *Int. J. Innov. Res. Electr. Electron. Instrum. Control Eng.*, vol. 4, no. 7, pp. 2321–2004, 2016, doi: 10.17148/IJIREICE.
- [17] T. Tohir et al., "Design and Implementation of HMI For Monitoring The Imbalance of Current and Voltage Based on Calculation of Maximum Deviation Mean Value Method," *J. Appl. Eng. Technol. Sci.*, vol. 6, no. 2, pp. 1297–1311, Jun. 2025, doi: 10.37385/JAETS.V6I2.6270.