Analisa Harmonisa Beban VFD dan Perancangan Hybrid Passive Filter untuk Pemenuhan Standar IEEE 519-2022: Studi Kasus PT X

Heri Budi Utomo[1], Muhammad Reza Octavatika[2]

[1]*Jurusan Teknik Elektro, Politeknik Negeri Bandung, Bandung, Indonesia*
E-mail : hbu@polban.ac.id
[2]*Jurusan Teknik Elektro, Politeknik Negeri Bandung, Bandung, Indonesia*
E-mail : rezaoctavatika@gmail.com

ABSTRAK

Inverter VFD tipe SJ300 yang menggerakkan mesin *stamping* di sebuah perusahaan manufaktur merupakan beban non-linear yang menimbulkan distorsi harmonisa, mengancam kualitas daya, dan berpotensi memperpendek usia pakai peralatan. Penelitian ini menganalisis harmonisa aktual pada panel mesin *stamping*, mengevaluasi kepatuhannya terhadap IEEE 519-2022, serta merancang filter pasif yang efektif melalui simulasi. Pengukuran lapangan dilaksanakan pada 5 dan 10 Maret 2026 menggunakan *Power Quality Analyser* Metrel MI2792 PowerQ4 PLUS (32 interval beban operasi) menunjukkan distorsi arus yang parah dengan THDi 111,81% (fasa R), 101,68% (fasa S), dan 134,35% (fasa T), didominasi harmonisa orde ke-5 dan ke-7, sedangkan THD tegangan tetap di bawah 8%. Nilai TDD fasa R (22,12%) dan fasa T (21,63%) melampaui batas 15%, dan banyak nilai IHDi per orde tidak memenuhi standar sehingga mitigasi diperlukan. Dua topologi filter dimodelkan dalam MATLAB R2018b/Simulink. *Single Tuned Passive Filter* (enam cabang paralel yang ditala pada orde 3, 5, 7, 9, 11, dan 13) menurunkan seluruh TDD di bawah 15%, tetapi menyisakan beberapa orde yang belum patuh pada fasa R dan S. Penambahan *second order high-pass filter* (*Hybrid Passive Filter*) menjadikan seluruh orde h3-h49 memenuhi standar, dengan THDi turun menjadi 8,01% (R) dan 9,96% (S). *Hybrid Passive Filter* terbukti menjadi solusi mitigasi paling efektif.

Kata Kunci:
Harmonisa, *Variable Frequency Drive*, filter pasif, *Single Tuned Passive Filter*, *Hybrid Passive Filter*, IEEE 519-2022

The SJ300-type VFD driving a stamping machine at an manufacturing company acts as a non-linear load, generating harmonic distortion that threatens power quality and may shorten equipment service life. This study analyses the actual harmonics at the stamping-machine panel, evaluates their compliance with IEEE 519-2022, and designs an effective passive filter through simulation. Field measurements on 5 and 10 March 2026 with a Metrel MI2792 PowerQ4 PLUS analyser (32 operating-load intervals) revealed severe current distortion with THDi of 111.81% (R), 101.68% (S), and 134.35% (T), dominated by the 5th and 7th orders, while voltage THD stayed below 8%. TDD on phases R (22.12%) and T (21.63%) exceeded the 15% limit, and numerous per-order IHDi values were non-compliant, requiring mitigation. Two topologies were modelled in MATLAB R2018b/Simulink. A Single-Tuned Passive Filter (six branches tuned to orders 3, 5, 7, 9, 11, 13) lowered all TDD below 15% but left residual non-compliant orders on phases R and S. Adding a second-order high-pass filter (Hybrid Passive Filter) brought every order (h3–h49) into compliance, reducing THDi to 8.01% (R) and 9.96% (S). The Hybrid Passive Filter is the most effective solution.

Keywords:
Harmonics, Variable Frequency Drive, passive filter, Single Tuned Passive Filter, Hybrid Passive Filter, IEEE 519-2022

1. PENDAHULUAN

Energi listrik merupakan penggerak utama produktivitas manufaktur, dan kualitas daya telah menjadi indikator kunci bagi efisiensi serta keandalan pasokan listrik industri. Dalam beberapa tahun terakhir, menjaga kualitas daya yang baik menjadi perhatian utama pada sistem tenaga modern (1). Pada era modernisasi industri saat ini, kebutuhan industri semakin didominasi oleh beban non-linear seperti *Variable Frequency Drive* (VFD). Pesatnya pertumbuhan konverter elektronika daya dan peralatan berbasis mikroprosesor telah mendorong meluasnya beban non-linear di berbagai sistem kelistrikan industri (2). Motor berdaya besar konvensional secara tradisional dirancang untuk beroperasi pada kecepatan tetap dengan keluaran konstan, sedangkan banyak proses industri modern menuntut operasi kecepatan yang berubah-ubah, VFD berbasis elektronika daya menjawab kebutuhan tersebut dengan mengatur kecepatan motor sehingga penggunaan energi menjadi lebih efisien dan ekonomis (3). Namun, di balik manfaat efisiensinya, operasi berbasis semikonduktor menjadikan VFD sumber harmonisa yang signifikan, karakteristik tegangan-arus yang non-linear membuatnya menginjeksikan arus terdistorsi ke sistem. Beban semacam ini menimbulkan gangguan harmonisa yang menurunkan kualitas daya dan memperpendek umur peralatan elektronik (2,4).

Secara teknis, harmonisa adalah komponen tegangan atau arus yang frekuensinya merupakan kelipatan bulat dari frekuensi fundamental (50 Hz menurut standar IEC), dan superposisi/tumpukan gelombang terhadap komponen

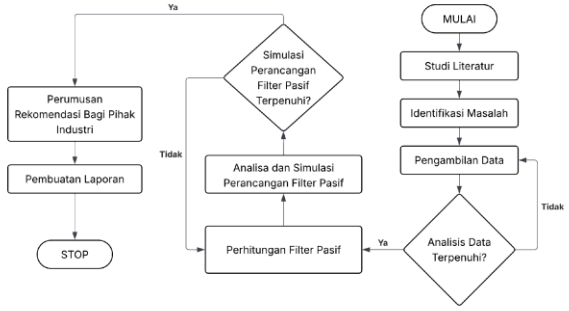
fundamentalnya mendeformasi bentuk gelombang sinusoidal ideal. Kandungan harmonisa yang berlebihan menimbulkan berbagai dampak merugikan, antara lain pemanasan berlebih pada peralatan listrik, kesalahan operasi sistem proteksi, serta percepatan penuaan isolasi akibat kenaikan temperatur kabel, yang mana seluruhnya memperpendek usia pakai peralatan. Apabila tidak dimitigasi, distorsi tersebut dapat menurunkan keandalan peralatan dan pada akhirnya menghentikan proses produksi industri (5,6).

Untuk menjamin operasi yang aman dan berkesinambungan, tingkat harmonisa harus dijaga di dalam ambang batas yang diizinkan oleh standar internasional, dan IEEE 519-2022 merupakan salah satu acuan yang digunakan secara luas (7). Oleh karena itu, pengukuran lapangan menggunakan *power quality analyser* diperlukan untuk mengetahui kandungan harmonisa aktual suatu sistem. Apabila nilai *Total Harmonic Distortion* (THD), *Total Demand Distortion* (TDD), atau *Individual Harmonic Distortion* (IHD) hasil pengukuran melampaui batas standar, solusi mitigasi teknis menjadi keharusan. Reduksi harmonisa dapat dicapai melalui penerapan filter pasif, aktif, maupun *hybrid*, di antara ketiganya, filter pasif merupakan jenis filter yang paling mendasar dan berbiaya rendah (8).

Filter pasif memitigasi harmonisa dengan menyediakan jalur berimpedansi rendah yang mengalihkan orde harmonisa target keluar dari sistem sekaligus memperbaiki faktor daya, dan tetap menjadi opsi paling ekonomis karena hanya tersusun dari komponen pasif seperti resistor, induktor, dan kapasitor (8). Banyak studi terdahulu menerapkan satu topologi filter pasif tunggal pada beban non-linear dan memvalidasinya terutama melalui perangkat simulasi seperti MATLAB/Simulink, sebagai contoh, *single-tuned passive filter* (STPF) mampu menurunkan THD arus dari 14,93% menjadi 4,87% di titik *point of common coupling* sehingga memenuhi batas IEEE 519-2022 (9), sementara *second order high-pass filter* yang dipadukan dengan filter tipe-C dan dirancang dari pengukuran lapangan pada transformator 800 kVA menurunkan THD arus hingga sekitar 2,5% (10). Sebaliknya, konfigurasi pasif *hybrid* yang menggabungkan STPF dengan cabang *high-pass* untuk meredam rentang luas harmonisa orde tinggi relatif lebih jarang dikaji, padahal susunan *hybrid* dipandang sebagai cara paling ekonomis untuk mengompensasi harmonisa pada beban non-linear berdaya besar (8).

Untuk mengisi celah tersebut, penelitian ini mengarakterisasi profil harmonisa arus dan tegangan aktual pada panel mesin *stamping* berpenggerak VFD (SJ300) di sebuah perusahaan manufaktur peralatan listrik berdasarkan pengukuran lapangan riil, mengingat harmonisa yang beragam dan sulit diprediksi dari *variable speed drive* hanya dapat dikarakterisasi secara andal melalui pengukuran langsung (11). Harmonisa hasil pengukuran kemudian dievaluasi terhadap IEEE 519-2022, dan dua topologi filter pasif, yaitu *Single Tuned Passive Filter* (STPF) dan *Hybrid Passive Filter* (STPF yang dikombinasikan dengan *second order high-pass filter*), dirancang serta dibandingkan per fasa dalam MATLAB R2018b/Simulink untuk menentukan solusi mitigasi yang paling efektif. Karena harmonisa terukur tidak seimbang antarfasa, digunakan model per fasa berbasis data pengukuran alih-alih pendekatan seimbang atau aproksimasi domain frekuensi murni yang akan mengaburkan asimetri fasa yang teramati di lapangan (12), spektrum arus terukur dinyatakan relatif terhadap komponen fundamental dan diinjeksikan sebagai sumber arus harmonisa per fasa dalam model simulasi (13). Terakhir, berbeda dengan studi industri yang mengevaluasi dan memitigasi harmonisa di *point of common coupling* (PCC) berdasarkan pengukuran pada titik sambungan jaringan (14), titik pengukuran dalam penelitian ini diperlakukan sebagai bus beban individual yang merepresentasikan sumber harmonisa dominan, bukan sebagai PCC.

2. METODOLOGI



Gambar 1. Diagram Alir Penelitian

Kandungan harmonisa pada panel mesin *stamping* yang digerakkan oleh VFD di sebuah perusahaan manufaktur peralatan listrik diinvestigasi melalui pengukuran kualitas daya secara *real-time*, observasi lapangan, dan wawancara, dengan menggunakan *Power Quality Analyser* Metrel MI2792 PowerQ4 PLUS, parameter tegangan, arus, faktor daya, THDv, THDi, IHDv, IHDi, dan TDD direkam pada kondisi *steady state*, transisi, dan *idle*. Namun, hanya data kondisi *steady state* yang digunakan untuk evaluasi harmonisa, sedangkan data kondisi transisi dan *idle* dikeluarkan dari analisis karena tidak merepresentasikan operasi kontinu normal mesin. Data *steady state* terpilih kemudian dievaluasi terhadap IEEE 519-2022, sementara data *nameplate* transformator *step-down* dikumpulkan untuk menentukan rasio Isc/I_L. Wawancara dengan pembimbing lapangan dan teknisi memberikan informasi pendukung mengenai karakteristik sistem dan kondisi aktual di lokasi.

2.1 Objek Pengukuran

Pengukuran dilaksanakan di sebuah perusahaan manufaktur peralatan listrik di Kota Bandung, Indonesia, pada panel yang menyuplai mesin *stamping* yang kecepatan motornya dikendalikan oleh VFD tipe SJ300. *Power Quality Analyser* Metrel MI2792 PowerQ4 PLUS merekam tegangan, arus, faktor daya, THDv, THDi, IHDv, IHDi, dan TDD. Konfigurasi

tiga fasa tiga kawat digunakan karena tidak terdapat terminal netral yang dapat diakses pada panel. Data direkam pada 5 Maret 2026 (14.51–17.41 WIB) dan 10 Maret 2026 (08.54–15.04 WIB) dengan interval 10 menit (total 540 menit); sebanyak 32 interval beban operasi dipilih sebagai basis analisis. Sebagai catatan tambahan, nilai tegangan fasa ke fasa dari objek penelitian ini bernilai ± 220 Volt, informasi tersebut didapatkan dari hasil wawancara dengan pihak industri dan divalidasi dengan hasil pengukuran. Untuk alasannya sendiri dikarenakan banyak peralatan yang digunakan di industri tersebut merupakan peralatan dari Jepang, yang mana perlu penyesuaian kembali mengenai tegangan inputnya di Indonesia. Alhasil, industri memiliki trafo daya dengan 2 keluaran tegangan fasa ke fasa yakni 380 V dan 220 V.

2.2 Evalausi Kepatuhan

IEEE 519-2022 menetapkan batas distorsi arus yang diizinkan berdasarkan rasio hubung singkat Isc/IL pada titik evaluasi. Arus hubung singkat maksimum diestimasi dari data nameplate transformator step-down (473 kVA, tegangan sekunder 231 V antarfasa, impedansi hubung singkat 4%) sebagai berikut:

$$Isc = \frac{S}{\sqrt{3}.VLL.Z} \quad (1)$$

Dimana:
I_{SC} = arus hubung singkat maksimum (A)
S = daya semu pengenal transformator (VA)
VLL = tegangan antarfasa (V)
Z = impedansi hubung singkat (%)

Dari persamaan 1 diperoleh Isc = 473.000 / (√3 · 231 · 0,04) = 29.554,8 A. Karena riwayat kebutuhan beban 12 bulan tidak tersedia, arus beban maksimum (fundamental) IL diambil dengan pendekatan arus fundamental terukur terbesar, yaitu IL = 49,67 A (fasa R). Rasio yang dihasilkan Isc/IL = 29.554,8 / 49,67 = 595,02, yang mana nilai ini termasuk dalam kategori 100 < 1000 pada IEEE 519-2022, sehingga batas TDD adalah 15% untuk sistem bertegangan ≤ 1,0 kV. Harmonisa hasil pengukuran kemudian dibandingkan terhadap batas arus IEEE 519-2022 (IHDi per orde dan TDD) serta batas tegangan (IHDv 5%, THDv 8%).

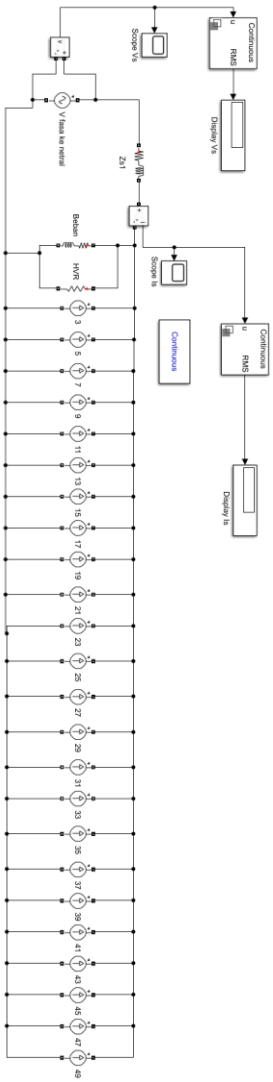
Tabel 1. Batasan distorsi arus untuk sistem dengan rating 120 V hingga 69 kV

Maximum harmonic current distortion in percent of I_L						
	Individual harmonic order[b]					
I_{SC}/I_L	2≤h<11[a]	11≤h<17	17≤h<23	23≤h<35	35≤h<50	TDD
<20[C]	4.0	2.0	1.5	0.6	0.3	5.0
20<50	7.0	3.5	2.5	1.0	0.5	8.0
50<100	10.0	4.5	4.0	1.5	0.7	12.0
100<1000	12.0	5.5	5.0	2.0	1.0	15.0
>1000	15.0	7.0	6.0	2.5	1.4	20.0

Tabel 2. Batasan Distorsi Tegangan

Bus Voltage at PCC	*Individual harmonic (%) h ≤ 50*	*Total harmonic distortion THD (%)*
V ≤ 1.0 kV	5.0	8.0
1 kV < V ≤ 69 kV	3.0	5.0
69 kV < V ≤ 161 kV	1.5	2.5
161 kV < V	1.0	1.5[a]

2.3 Perancangan Filter dan Simulasi



Gambar 2.Simulasi rangkaian non-linear tanpa filter

Sistem eksisting dimodelkan dalam MATLAB R2018b/Simulink menggunakan metode injeksi arus harmonisa per fasa yang diturunkan dari data pengukuran (15), yang dijustifikasi oleh sifat harmonisa terukur yang tidak seimbang (unbalanced). Dua topologi dirancang dan dievaluasi:

1. *Single Tuned Passive Filter* (STPF): enam cabang *single tuned* paralel yang ditune pada orde 3, 5, 7, 9, 11, dan 13. Parameter cabang (C, L, R) dihitung dari kompensasi daya reaktif dan target frekuensi yang akan diredam,

dengan faktor kualitas (Q) sebesar 150 untuk setiap cabang (16).

2. *Hybrid Passive Filter*: STPF yang ditambah *second order high-pass filter* untuk meredam sisa harmonisa orde tinggi (ditune pada orde 23 untuk fasa R dan orde 17 untuk fasa S), dimana untuk nilai kualitas filter (Q) untuk *second order high pass filter* bernilai 2,5.

Efektivitas filter dinilai melalui analisis FFT terhadap gelombang dan data sebelum–sesudah pemasangan filter, dengan membandingkan THDi, IHDi per orde (h3–h49), dan TDD terhadap IEEE 519-2022.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Profil Harmonisa Hasil Pengukuran

Harmonisa arus pada ketiga fasa berada pada tingkat yang parah, dengan THDi sebesar 111,81% (R), 101,68% (S), dan 134,35% (T). Orde ke-5 dan ke-7 mendominasi (IHDi fasa R masing-masing ±71,66% dan 58,83%), konsisten dengan karakteristik penyearah enam pulsa pada VFD SJ300. Sebaliknya, harmonisa tegangan rendah, dengan THDv = 1,86% (U12), 1,43% (U23), dan 1,89% (U31), jauh di dalam batas standar.

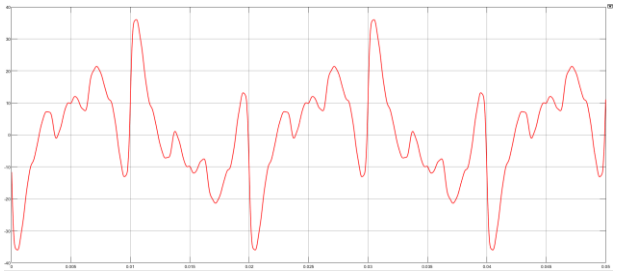
Sebelum kedua topologi filter dievaluasi, model dasar Simulink terlebih dahulu divalidasi terhadap hasil pengukuran lapangan untuk memastikan model merepresentasikan perilaku harmonisa aktual panel secara akurat. Ketika spektrum arus per orde hasil pengukuran diinjeksikan sebagai sumber arus harmonisa per fasa, model mereproduksi distorsi yang teramati dengan sangat akurat: THDi dasar hasil simulasi mencapai 112,42% (R), 102,12% (S), dan 135,09% (T), dibandingkan dengan hasil pengukuran 111,81% (R), 101,68% (S), dan 134,35% (T). Selisih absolutnya hanya 0,61; 0,44; dan 0,74 poin persentase, atau setara error relatif 0,55% (R), 0,43% (S), dan 0,55% (T), di bawah 0,6% pada setiap fasa. Kesesuaian yang sangat dekat ini (< 1% pada ketiga fasa) menunjukkan bahwa model per fasa berbasis data pengukuran merepresentasikan sistem riil secara akurat. Dengan demikian, setiap penurunan distorsi yang teramati setelah filter dipasang dapat diatribusikan pada kerja filter itu sendiri, bukan pada error pemodelan, dan model dasar tervalidasi ini menjadi acuan yang andal bagi hasil simulasi STPF dan Hybrid Passive Filter pada subbagian berikutnya.

3.2 Kepatuhan terhadap IEEE 519-2022

Seluruh orde harmonisa tegangan memenuhi standar (IHDv < 5%, THDv < 8%), sehingga analisis lanjutan untuk tegangan tidak diperlukan. Untuk arus, TDD fasa R (22,12%) dan fasa T (21,63%) melampaui batas 15%, sedangkan fasa S (11,79%) memenuhi batas TDD; meskipun demikian, ketiga fasa menunjukkan banyak nilai IHDi per orde yang melampaui batas. Oleh karena itu, mitigasi harmonisa diperlukan pada seluruh fasa.

Tabel 3. Harmonisa arus hasil simulasi terhadap IEEE 519-2022

Fasa	THDi simulasi	TDD hasil	Batas TDD	IHDi simulasi	Status
R	112,42%	22,12%	15%	Mayoritas Orde melampaui batas	Gagal
S	102,12%	11,79%	15%	Mayoritas orde melampaui batas	Gagal (IHDi)
T	135,09%	21,63%	15%	Mayoritas orde melampaui batas	Gagal

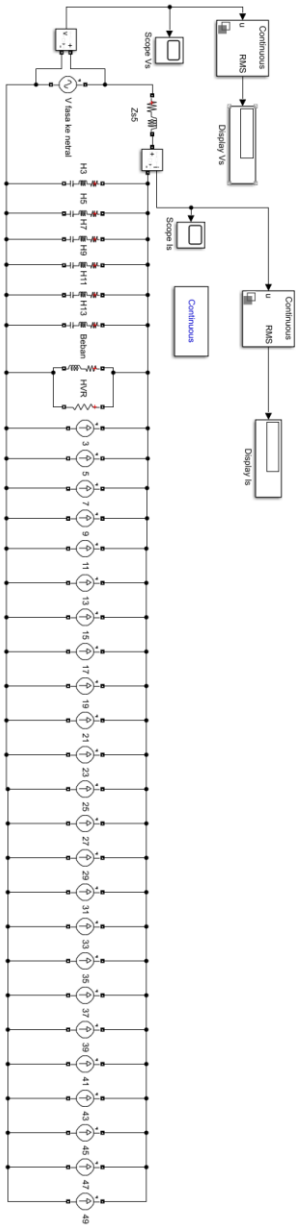


Gambar 3.Gelombang fasa R tanpa filter

3.3 Single Tuned Passive Filter

Enam STPF paralel menurunkan distorsi arus secara signifikan: THDi turun dari 112,42% menjadi 9,89% (R), dari 102,12% menjadi 12,56% (S), dan dari 135,09% menjadi 10,75% (T), sementara TDD turun menjadi 4,5% (R), 3,387% (S), dan 4,57% (T), seluruhnya di dalam batas 15%. Namun, bila dikaji dari parameter IHD_i, beberapa orde masih belum patuh seperti orde 23 pada fasa R, serta orde 17, 23, 29, dan 35 pada fasa S. Fasa T mencapai kepatuhan penuh per orde dan tidak memerlukan mitigasi tambahan.

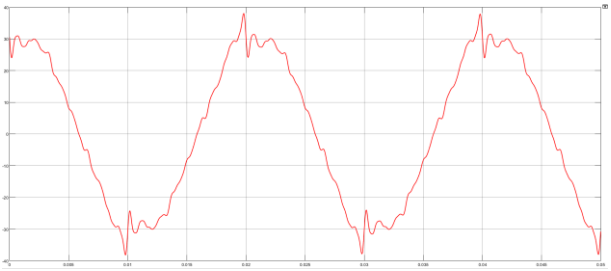
Sisa pelanggaran pada fasa R dan S ini menunjukkan bahwa konfigurasi *single tuned* saja tidak memadai dan mitigasi lanjutan diperlukan pada kedua fasa tersebut. Menambah cabang *single tuned* baru bukan solusi yang efisien, karena komponen yang belum patuh (orde 23 pada fasa R, serta orde 17, 23, 29, dan 35 pada fasa S) tersebar di wilayah orde tinggi, bukan terkonsentrasi pada satu frekuensi. Pendekatan yang lebih efektif adalah melengkapi cabang *single tuned* eksisting dengan filter yang meredam pita lebar harmonisa orde tinggi secara serentak (17). Atas dasar itu, *second order high-pass filter* ditambahkan pada STPF membentuk *Hybrid Passive Filter*, yang kemampuannya menghilangkan sisa orde tak patuh pada fasa R dan S dievaluasi melalui simulasi pada subbagian berikut.



Gambar 4. Simulasi rangkaian non-linear dengan enam *single tuned passive filter* parallel

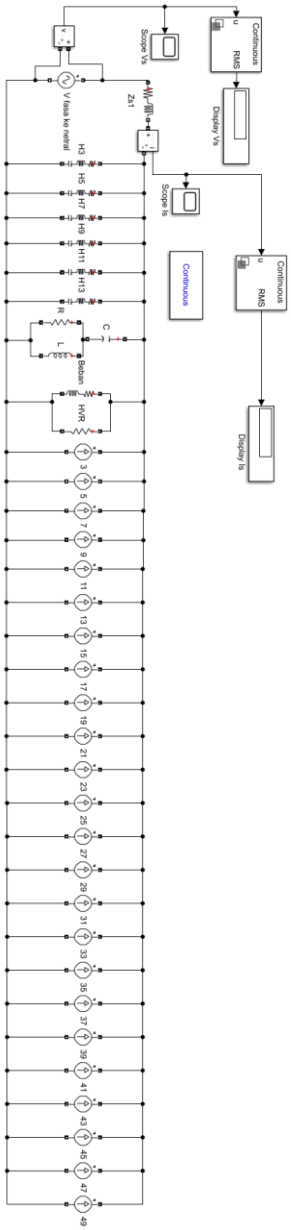
Tabel 4. Hasil simulasi harmonisa arus STPF terhadap IEEE 519-2022

Fasa	THDi simulasi	TDD hasil	Batas TDD	IHDi simulasi	Status
R	9,89%	4,5%	15%	Orde 23 melampaui batas	Gagal
S	12,56%	3,387%	15%	Orde 17, 23, 29, dan 35 melampaui batas	Gagal (IHDi)
T	10,75%	4,57%	15%	Seluruh orde memenuhi	Berhasil



Gambar 5. Gelombang fasa R dengan enam *single tuned passive filter* paralel

3.4 Hybrid Passive Filter

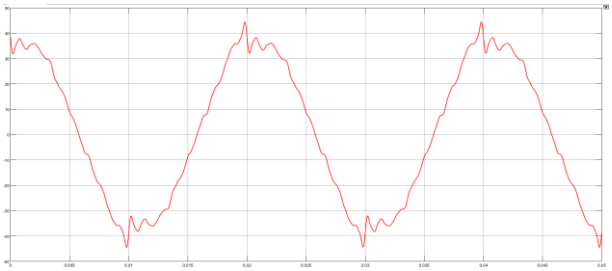


Gambar 6. Simulasi rangkaian non-linear dengan *hybrid passive filter*

Dalam penelitian ini, *Hybrid Passive Filter* adalah konfigurasi yang dibentuk dengan menggabungkan enam cabang single tuned paralel (ditala pada orde 3, 5, 7, 9, 11, dan 13) dengan satu *second order high-pass filter* pada fasa yang sama. Cabang *single tuned* meredam harmonisa dominan orde rendah, sedangkan cabang *high-pass* tambahan mengatenuasi pita lebar sisa komponen orde tinggi yang tidak mampu diselesaikan oleh filter single tuned saja. Penambahan *second order high-pass filter* ini (ditala pada orde 23 untuk fasa R dan orde 17 untuk fasa S) menghilangkan sisa distorsi orde tinggi. THDi turun lebih lanjut menjadi 8,01% (R) dan 9,96% (S), dengan TDD 4,41% (R) dan 3,205% (S). Seluruh orde dari h3 hingga h49 pada kedua fasa kemudian memenuhi IEEE 519-2022.

Tabel 5. Hasil simulasi harmonisa arus hybrid passive filter terhadap IEEE 519-2022

Fasa	THDi simulasi	TDD hasil	Batas TDD	IHDi simulasi	Status
R	8,01%	4,41%	15%	Seluruh orde memenuhi	Berhasil
S	9,96%	3,205%	15%	Seluruh orde memenuhi	Berhasil
T	10,75%	4,57%	15%	Seluruh orde memenuhi	Berhasil



Gambar 7. Gelombang fasa R dengan *hybrid passive filter*

3.5 Perbandingan Kinerja Filter

Hasil keseluruhan menunjukan progresi kinerja mitigasi, yang dapat diringkas sebagai gagal, lalu parsial, lalu patuh penuh. Pada kondisi dasar (tanpa filter), kondisi menunjukan gagal pada seluruh kriteria, THDi arus mencapai 112,42% (R), 102,12% (S), dan 135,09% (T), TDD melampaui batas 15% pada fasa R dan T, dan mayoritas orde arus melanggar batas IHDi per ordenya. Pemasangan enam filter single tuned paralel menghasilkan perbaikan besar namun hanya parsial, THDi turun tajam menjadi 9,89% (R), 12,56% (S), dan 10,75% (T) dan TDD ketiga fasa turun di bawah 15%, tetapi beberapa komponen orde tinggi tetap tidak patuh, orde 23 pada fasa R serta orde 17, 23, 29, dan 35 pada fasa S, sehingga kepatuhan penuh per orde belum tercapai pada kedua fasa tersebut. Melengkapi cabang single tuned dengan *second order high-pass filter* (diterapkan hanya pada fasa R dan S, karena fasa T telah patuh) menghapus sisa pelanggaran tersebut: THDi turun lebih lanjut menjadi 8,01% (R) dan 9,96% (S), TDD menjadi 4,41% (R) dan 3,205% (S), dan setiap orde dari h3 hingga h49 memenuhi IEEE 519-2022.

Sebagai rangkuman, sistem tanpa filter gagal memenuhi standar, filter single tuned hanya mematuhi parsial (memadai untuk fasa T yang distorsinya paling rendah, tetapi tidak untuk fasa R dan S), dan hybrid passive filter merupakan satu-satunya konfigurasi yang membawa ketiga fasa ke kepatuhan penuh pada THDi, IHDi per orde (h3–h49), dan TDD. Dengan demikian, hybrid passive filter adalah solusi mitigasi paling efektif dan optimal, sementara filter single tuned saja tetap menjadi opsi mandiri yang dapat diterima hanya untuk fasa T.

Tabel 6. Perbandingan kinerja filter

Parameter	Simulasi Tanpa Filter (*Baseline*)	Simulasi *STPF*	Simulasi HPF
THDi fasa R	112,42%	9,89%	8,01%
THDi fasa S	102,12%	12,56%	9,96%
THDi fasa T	135,09%	10,75%	10,75%
TDD	>15% pada fasa R dan T	Semua fasa <15% (memenuhi)	Semua fasa <15% (memenuhi)
IHDi	Mayoritas orde melampaui batas	Beberapa orde tinggi gagal pada fasa R dan S	Seluruh orde patuh
Status	Gagal	Gagal pada paramter IHDi	Berhasil

4. KESIMPULAN

Pengukuran lapangan mendapatkan informasi kondisi distorsi harmonisa arus yang parah pada panel mesin *stamping* yang menggunakan VFD (THDi hingga 134,35%, didominasi orde ke-5 dan ke-7), sementara harmonisa tegangan tetap memenuhi standar. Kondisi eksisting dievaluasi terhadap IEEE 519-2022 (batas TDD 15% untuk Isc/IL = 595,02), dimana hasil evaluasi menunjukan diperlukan mitigasi untuk harmonisa arus pada seluruh fasa. Upaya simulasi mitigasi pertama yaitu STPF enam cabang, dimana hasilnya menurunkan TDD di bawah batas pada seluruh fasa tetapi menyisakan orde yang masih melebihi batas IHDi pada fasa R dan S, lalu upaya mitigasi kedua yaitu penambahan *second order high-pass filter* (*hybrid passive filter*), dimana hasilnya mencapai kepatuhan penuh untuk orde h3 sampai h49, dengan THDi turun menjadi 8,01% (R) dan 9,96% (S). Dengan demikian, *hybrid passive filter* merupakan solusi paling efektif, sedangkan STPF saja memadai untuk fasa T. Karena perancangan ini berbasis pengukuran pada bus beban individual dengan kondisi pembebanan tertentu, verifikasi lapangan di PCC serta kajian filter aktif direkomendasikan sebagai penelitian lanjutan.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada pihak perusahaan manufaktur peralatan listrik tempat penelitian dilaksanakan atas izin dan dukungan pengukuran lapangan, serta kepada seluruh pihak lab SDTL Politeknik Negeri Bandung.

DAFTAR PUSTAKA

1. Das SR, Ray PK, Sahoo AK, Ramasubbareddy S, Babu TS, Kumar NM, et al. A Comprehensive Survey on Different Control Strategies and Applications of Active Power Filters for Power Quality Improvement. Energies (Basel). 2021;14(15):4589. doi:10.3390/en14154589
2. Michalec Ł, Jasiński M, Sikorski T, Leonowicz Z, Jasiński Ł, Suresh V. Impact of harmonic currents of nonlinear loads on power quality of a low voltage network—review and case study. Energies (Basel). 2021;14(12).
3. Gençay M, Bozkurt A, Yüzer EÖ. Energy efficiency and green transformation: a VFD case study in an industrial facility. Gumushane Universitesi Fen Bilimleri Dergisi. 2025;15(2):577–89.
4. Safiudin, Suheta T, Patria N. Analisa dan Rancang Single Tuned Passive Filter Untuk Mereduksi Harmonisa Dari Dampak Penggunaan Variable Frequency Drive (VFD). Seminar Nasional Sains dan Teknologi Terapan X 2022. 2022;261–6.
5. Kaur J, Bath SK. Harmonic distortion in power systems due to electronic control and renewable energy integration: a comprehensive review. Discover Electronics. 2025;2(1).
6. Radwan-Pragłowska N, Mamcarz D, Albrechtowicz P, Rozegnał B. The Current Harmonic Impact on Active Power Losses and Temperature Distribution in Power Cables. Energies (Basel). 2024 Aug 1;17(16).
7. 519-2022 - IEEE Standard for Harmonic Control in Electric Power Systems. IEEE; 2022.
8. Mohd Nor KA, Abdullah N. Power quality improvement of three-phase electrical systems using active-passive hybrid harmonic filter. Results in Engineering. 2024;22:102242.
9. Ishaya MM, Adegboye OR, Agyekum EB, Elnaggar MF, Alrashed MM, Kamel S. Single-tuned passive filter (STPF) for mitigating harmonics in a 3-phase power system. Sci Rep. 2023;13(1).
10. Malik MI, Ihsanto E. Design and Simulation High Pass Filter Second Order and C-Type Filter for Reducing Harmonics as Power Quality Repair Effort in the Automotive Industry. Journal of Integrated and Advanced Engineering (JIAE). 2023;3(1):23–36.
11. Arranz-Gimon A, Zorita-Lamadrid A, Morinigo-Sotelo D, Fernandez-Cavero V, Duque-Perez O. Harmonic measurement and analysis system for characterization of adjustable speed drives. International Journal of Electrical Power and Energy Systems. 2024;162.
12. Guerrero-Rodríguez NF, Batista-Jorge RO, Nuñez-Ramírez V, Manilla-García A, Ramírez-Rivera FA, Mercado-Ravelo R, et al. Measurement-Driven Phase-Resolved Modeling of Unbalanced Nonlinear Loads for Harmonic Assessment and Mitigation in Building Distribution Systems. Energies (Basel). 2026;19(12).
13. Mahlalela JS, Massucco S, Mosaico G, Saviozzi M. Harmonic Source Modeling Techniques for Wide-Area Distribution System Monitoring: A Systematic Review. Energies (Basel). 2026;19(7):1810.
14. Ugwuagbo E, Ray B, Balogun A, Okafor F, Sul J, Nabi N, et al. Power Quality Assessment and Harmonic Mitigation at the Point of Common Coupling of Industrial Load. Journal of Control, Automation and Electrical Systems. 2026.
15. Elmi Y, Salman D. Simulation Model for Passive Harmonic Filters Using Matlab/Simulink: A Case Study. Journal of Power and Energy Engineering. 2023;11(03):1–14.
16. Ahmed M, Masood N Al, Aziz T. Optimal selection of single tuned passive filters to enhance post-fault voltage recovery and power quality in a renewable integrated microgrid. IET Renewable Power Generation. 202 May 18;17(7):1747–67.
17. Malik MI, Hamdani YM, Nurdiansyah R, Faridah L, Nurmela. Hybrid Double-Tuned and High-Pass Filter for Harmonic Mitigation in Inverter HVAC Systems. ELECTRON Jurnal Ilmiah Teknik Elektro. 2025;6(2).