

Analisis Total Harmonic Distortion Tegangan dan Arus pada Sistem Tiga Fasa Berbeban Nonlinier Berdasarkan IEEE Std 519-2014

Vito Badrul Fikri¹, Pratomo Budi Santosa²

^{1,2} Teknik Elektro, Universitas Muhammadiyah Surakarta
e-mail: d400220067@student.ums.ac.id

Abstrak

Distorsi harmonik akibat beban nonlinier merupakan salah satu permasalahan utama kualitas daya pada sistem tenaga listrik karena dapat menurunkan efisiensi sistem, meningkatkan rugi-rugi daya, menyebabkan pemanasan berlebih pada peralatan, serta memperpendek umur operasi peralatan listrik. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis Total Harmonic Distortion (THD) tegangan dan arus pada sistem penyearah jembatan dioda tiga fasa berbeban RL serta mengevaluasi kesesuaiannya dengan ketentuan IEEE Std 519-2014. Penelitian dilakukan menggunakan metode simulasi dengan memodelkan sistem tiga fasa 380 V, 50 Hz pada perangkat lunak simulasi sistem tenaga. Analisis harmonik dilakukan menggunakan metode Fast Fourier Transform (FFT) untuk memperoleh spektrum harmonik serta nilai THD pada sisi tegangan dan arus. Hasil simulasi menunjukkan bahwa rata-rata tegangan fundamental sebesar 309,13 Vpuncak (218,60 Vrms) dengan rata-rata THDv sebesar 30,97%, sehingga melebihi batas yang direkomendasikan oleh IEEE Std 519-2014. Spektrum harmonik arus didominasi oleh harmonik orde ke-5 dan ke-7 yang merupakan karakteristik khas penyearah dioda enam pulsa. Hasil penelitian juga menunjukkan bahwa distorsi harmonik lebih dominan terjadi pada sisi arus dibandingkan sisi tegangan, sehingga diperlukan penerapan metode mitigasi harmonik, seperti filter harmonik pasif maupun aktif, untuk menurunkan nilai THD dan meningkatkan kualitas daya agar memenuhi standar IEEE Std 519-2014.

Kata Kunci: Analisis FFT, Beban Nonlinier, Harmonik, IEEE Std 519-2014, Total Harmonic Distortion

Abstract

Harmonic distortion caused by nonlinear loads is one of the major power quality problems in electrical power systems because it can reduce system efficiency, increase power losses, cause excessive heating in electrical equipment, and shorten equipment service life. This study aims to analyze the Total Harmonic Distortion (THD) of voltage and current in a three-phase diode bridge rectifier with an RL load and to evaluate its compliance with IEEE Std 519-2014. The research was conducted through simulation by modeling a 380 V, 50 Hz three-phase system using power system simulation software. Harmonic analysis was performed using the Fast Fourier Transform (FFT) method to obtain the harmonic spectrum and THD values of both

voltage and current. The simulation results indicate that the average fundamental voltage is 309.13 V_{peak} (218.60 V_{rms}), with an average Total Harmonic Distortion of Voltage (THD_v) of 30.97%, which exceeds the limit recommended by IEEE Std 519-2014. The current harmonic spectrum is dominated by the 5th and 7th harmonic orders, which are characteristic of a six-pulse diode rectifier. The findings also reveal that harmonic distortion is more dominant on the current side than on the voltage side. Therefore, harmonic mitigation techniques, such as passive or active harmonic filters, are required to reduce THD levels and improve power quality in order to comply with IEEE Std 519-2014.

Keywords : FFT Analysis, Harmonics, IEEE Std 519-2014, Nonlinear Load, Total Harmonic Distortion

LATAR BELAKANG

Kualitas daya (*power quality*) merupakan salah satu indikator penting dalam keandalan sistem tenaga listrik modern. Meningkatnya penggunaan beban nonlinier, seperti penyearah, inverter, dan *variable speed drive* (VSD), menyebabkan arus yang ditarik dari sumber tidak lagi berbentuk sinusoidal sehingga memunculkan distorsi harmonik. Kondisi ini dapat menurunkan kualitas daya, meningkatkan rugi-rugi daya, memicu pemanasan pada transformator dan motor, mengganggu sistem proteksi, serta memperpendek umur peralatan listrik (Kumar et al., 2022)(Maciążek, 2022).

Pada sistem tiga fasa, penyearah dioda enam pulsa merupakan salah satu beban nonlinier yang paling banyak digunakan pada aplikasi industri karena konstruksinya sederhana, andal, dan ekonomis. Namun, karakteristik pensaklaran dioda menyebabkan arus masukan mengandung harmonik dengan pola karakteristik, sehingga harmonik orde ke-5 dan ke-7 menjadi komponen dominan yang berpotensi menurunkan kualitas daya sistem (Pool-Mazun et al., 2021)(Gonçalves et al., 2021)(Motegi & Nishida, 2021).

Evaluasi tingkat distorsi harmonik umumnya mengacu pada IEEE Std 519-2014, yang menetapkan batas maksimum *Total Harmonic Distortion* tegangan sebesar 5% pada *Point of Common Coupling* (PCC), sedangkan batas *Total Harmonic Distortion* arus ditentukan berdasarkan rasio arus hubung singkat terhadap arus beban (Shelar et al., 2024). Kepatuhan terhadap standar tersebut penting untuk menjamin kualitas daya dan keandalan sistem tenaga listrik.

Berbagai penelitian telah membahas analisis harmonik pada sistem tiga fasa dengan beban nonlinier menggunakan simulasi maupun pengujian eksperimental (Raguz et al., 2022)(Yusuf et al., 2022)(Ishaya et al., 2023)(Bakar et al., 2024). Namun, sebagian besar penelitian masih berfokus pada analisis nilai THD atau pengembangan metode mitigasi harmonik, sedangkan kajian yang mengintegrasikan evaluasi THD_v, THD_i, dan karakteristik spektrum harmonik berdasarkan IEEE Std 519-2014 pada penyearah dioda tiga fasa dengan beban RL masih relatif terbatas.

Berdasarkan kondisi tersebut, penelitian ini bertujuan menganalisis karakteristik THD_v dan THD_i pada sistem tiga fasa dengan beban nonlinier menggunakan metode *Fast Fourier Transform* (FFT), serta mengevaluasi kesesuaiannya terhadap IEEE Std 519-2014. Kebaruan

penelitian ini terletak pada analisis terpadu antara distorsi harmonik tegangan dan arus, identifikasi spektrum harmonik hingga orde ke-19, serta penyusunan rekomendasi mitigasi harmonik berdasarkan hasil simulasi untuk meningkatkan kualitas daya sistem.

KAJIAN TEORITIS

Konsep Harmonik dalam Sistem Tenaga Listrik

Harmonik merupakan komponen frekuensi yang bernilai kelipatan bulat dari frekuensi fundamental dan umumnya dihasilkan oleh beban nonlinier yang menarik arus tidak sinusoidal dari sumber tegangan sinusoidal. Pada sistem 50 Hz, harmonik dominan muncul pada frekuensi kelipatan seperti 150 Hz (orde ke-3) dan 250 Hz (orde ke-5). Keberadaan harmonik dapat menurunkan kualitas daya melalui peningkatan rugi-rugi, pemanasan berlebih pada transformator dan motor, interferensi elektromagnetik, serta gangguan pada peralatan elektronik sensitif (Kumar et al., 2022).

Total Harmonic Distortion (THD) merupakan parameter yang digunakan untuk mengukur tingkat distorsi harmonik pada suatu sistem tenaga listrik. Nilai THD didefinisikan sebagai perbandingan antara nilai RMS seluruh komponen harmonik dengan nilai RMS komponen fundamental, yang dinyatakan dalam persen. Perhitungan THD dapat dinyatakan dengan Persamaan (1).

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} V_h^2}}{V_1} \times 100\% \quad (1)$$

dengan V_h adalah nilai RMS harmonik orde ke- h dan V_1 adalah nilai RMS komponen fundamental. Semakin besar nilai THD, semakin tinggi tingkat distorsi harmonik dan semakin rendah kualitas daya sistem.

Penyearah Dioda Tiga Fasa

Penyearah dioda tiga fasa merupakan salah satu jenis konverter AC–DC yang banyak diterapkan pada sistem tenaga listrik untuk aplikasi daya menengah hingga tinggi. Konverter ini terdiri atas enam dioda yang disusun dalam konfigurasi *three-phase bridge rectifier*. Mekanisme konduksi dioda yang berlangsung secara bergantian menyebabkan arus masukan menjadi tidak sinusoidal, sehingga menghasilkan komponen harmonik pada sisi AC. Pada penyearah enam pulsa (*six-pulse rectifier*), orde harmonik karakteristik dinyatakan dengan Persamaan (2) (Pool-Mazun et al., 2021).

$$h = 6n \pm 1 \quad (2)$$

dengan n merupakan bilangan bulat positif. Oleh karena itu, harmonik dominan secara teoritis adalah orde ke-5, ke-7, ke-11, ke-13, ke-17, dan ke-19, sedangkan harmonik orde ke-3 pada sistem tiga fasa seimbang umumnya sangat kecil atau tidak muncul karena komponen *triplen* saling meniadakan pada titik netral (Gonçalves et al., 2021).

Pada kondisi ideal, tegangan keluaran DC rata-rata (V_{dc}) pada penyearah jembatan tiga fasa ditentukan oleh tegangan efektif antar-fasa (V_{LL}) pada sisi masukan. Hubungan tersebut dinyatakan pada Persamaan (3).

$$V_{dc} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} \times V_{LL} \quad (3)$$

dengan V_{LL} adalah nilai efektif tegangan line-to-line.

Standar IEEE 519

IEEE Std 519-2014 merupakan standar yang menetapkan batas distorsi harmonik tegangan dan arus pada *Point of Common Coupling* (PCC) untuk menjaga kualitas daya sistem tenaga listrik. Pada sistem dengan tegangan hingga 69 kV, batas maksimum THDv adalah 5%, sedangkan batas THDi ditentukan berdasarkan rasio arus hubung singkat terhadap arus beban maksimum (I_{sc}/I_L) di PCC (Shelar et al., 2024), sebagaimana disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Batas THD Arus Berdasarkan IEEE 519-2014

Rasio I_{sc}/I_L	THDi(%)
< 20	5,0
20 - 50	8,0
50 - 100	12,0
100 - 1000	15,0
>1000	20,0

Metode Analisis Harmonik dengan FFT

Fast Fourier Transform (FFT) merupakan algoritma yang digunakan untuk menghitung *Discrete Fourier Transform* (DFT) secara efisien. DFT mengubah sinyal dari domain waktu ke domain frekuensi dan dinyatakan pada Persamaan (4).

$$X_k = \sum_{n=0}^{N-1} x[n] \cdot e^{-j2\pi kn/N} \quad (4)$$

dengan $k=0,1,2,\dots,N-1$, di mana X_k adalah spektrum frekuensi diskrit, $x[n]$ adalah sinyal pada domain waktu, dan N adalah jumlah sampel. Dalam analisis harmonik, FFT digunakan untuk mengidentifikasi komponen harmonik melalui transformasi sinyal dari domain waktu ke domain frekuensi. Resolusi frekuensi FFT dinyatakan pada Persamaan (5).

$$\Delta f = \frac{f_s}{N} \quad (5)$$

dengan f_s merupakan frekuensi pencuplikan (*sampling frequency*). Dalam penelitian ini, metode FFT digunakan untuk memperoleh nilai RMS, *Total Harmonic Distortion*, spektrum harmonik, dan komponen DC dari sinyal tegangan maupun arus.

Nilai RMS dan Hubungannya dengan THD

Nilai *Root Mean Square* (RMS) pada sinyal periodik yang mengandung harmonik diperoleh dari akar jumlah kuadrat nilai RMS setiap komponen frekuensi, sebagaimana dinyatakan pada Persamaan (6).

$$V_{RMS} = \sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} V_h^2} \quad (6)$$

Hubungan antara *Total Harmonic Distortion* (THD) dan nilai RMS total dinyatakan pada Persamaan (7).

$$V_{RMS} = V_1 \cdot \sqrt{1 + THD^2} \quad (7)$$

dengan THD dinyatakan dalam satuan desimal. Persamaan ini menunjukkan bahwa THD yang tinggi akan meningkatkan nilai RMS total secara signifikan, yang berpotensi menyebabkan pemanasan berlebih pada peralatan (Maciążek et al., 2022)

METODE

Penelitian ini menggunakan metode simulasi pada sistem tenaga listrik tiga fasa dengan sumber tegangan AC 380 V (line-to-line), frekuensi 50 Hz, dan konfigurasi hubungan bintang. Beban nonlinier dimodelkan menggunakan penyearah dioda tiga fasa (*Universal Bridge*) yang dihubungkan dengan beban resistif-induktif (R–L). Model simulasi juga dilengkapi blok pengukuran tegangan dan arus tiga fasa (*Three-Phase V-I Measurement*) untuk memperoleh sinyal tegangan dan arus yang selanjutnya dianalisis menggunakan metode *Fast Fourier Transform* (FFT). Parameter simulasi yang digunakan disajikan pada Tabel 2.

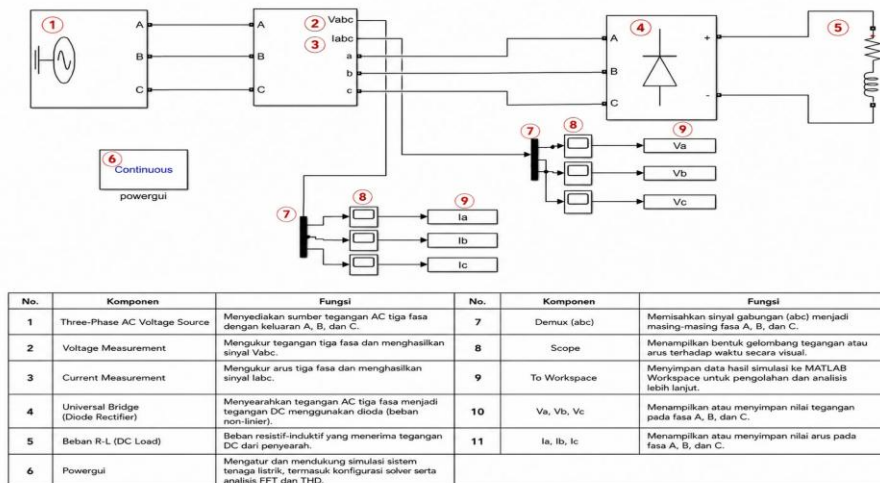
Tabel 2. Parameter Sistem Simulasi

Parameter	Nilai	Satuan
Sistem	Tiga Fasa	-
Tegangan Line-to-Line	380	V
Tegangan Fasa-Netral	220	V
Frekuensi	50	Hz
Jenis Beban	Penyearah Dioda Tiga Fasa + Beban RL	-
Metode Analisis	FFT (alat analisis harmonik)	-
Samples per Cycle	48	-
Waktu Pencuplikan	0,000413565	s

Pada sistem tiga fasa, hubungan antara tegangan fasa-netral V_{ph} dan tegangan antar-fasa V_{LL} dinyatakan pada Persamaan (8).

$$V_{LL} = \sqrt{3} \cdot V_{ph} \tag{8}$$

Dengan $V_{LL} = 380$ V, diperoleh $V_{ph} = 220$ V. yang mendekati hasil analisis FFT sebesar 218,5 Vrms sehingga menunjukkan kesesuaian antara model simulasi dan teori. Model simulasi yang digunakan ditunjukkan pada Gambar 1.



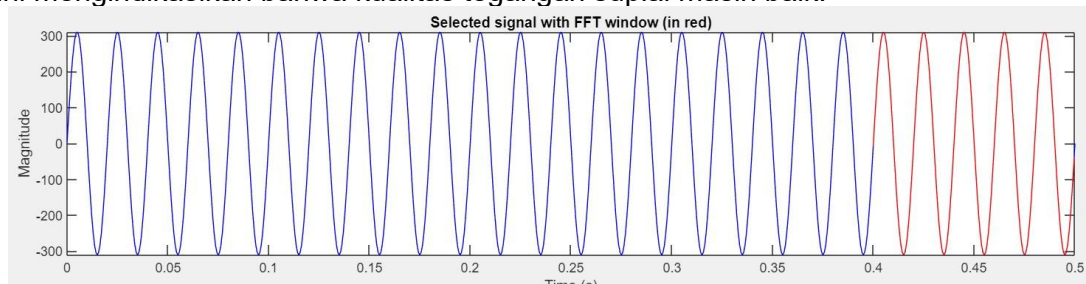
Gambar 1. Model simulasi sistem penyearah tiga fasa menggunakan jembatan dioda dengan beban R-L.

Sinyal tegangan dan arus hasil simulasi dianalisis menggunakan FFT untuk memperoleh nilai komponen fundamental, spektrum harmonik, *Total Harmonic Distortion tegangan* (THDv), dan *Total Harmonic Distortion arus* (THDi). Selanjutnya, hasil analisis dibandingkan dengan batas distorsi harmonik berdasarkan IEEE Std 519-2014 untuk mengevaluasi kualitas daya sistem.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Bentuk Gelombang Tegangan dan Arus Fasa A

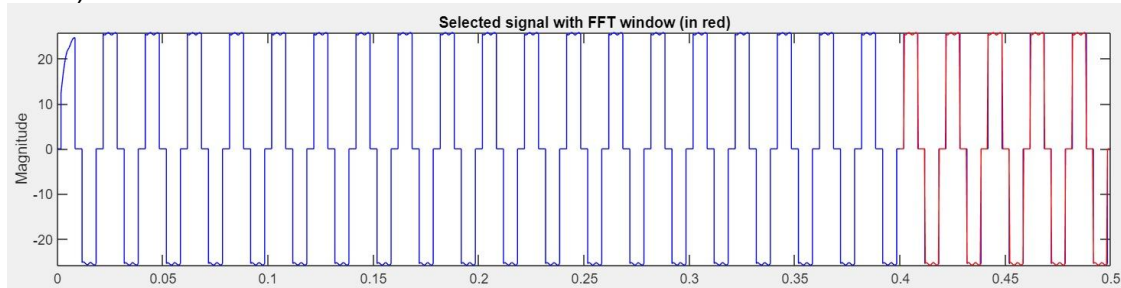
Simulasi sistem tiga fasa 380 V/50 Hz dengan beban nonlinier berupa penyearah dioda tiga fasa dan beban RL menunjukkan bahwa tegangan fasa A (V_a) pada Gambar 2 tetap berbentuk sinusoidal dengan amplitudo puncak sekitar ± 309 V tanpa distorsi yang signifikan. Hal ini mengindikasikan bahwa kualitas tegangan suplai masih baik.



Gambar 2. Bentuk Gelombang Tegangan Fasa A (V_a) Hasil Simulasi

Sebaliknya, bentuk gelombang arus fasa A (I_a) pada Gambar 3 menunjukkan distorsi non-sinusoidal berupa pulsa-pulsa periodik dengan amplitudo puncak sekitar ± 25 – 26 A. Karakteristik ini merupakan ciri khas arus masukan penyearah dioda yang menghantar pada

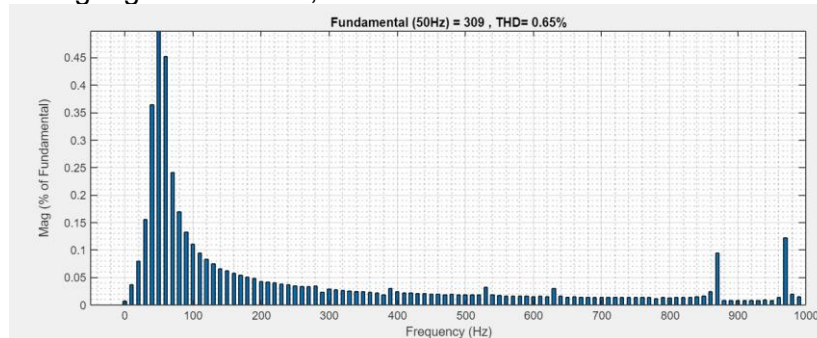
interval konduksi tertentu, sehingga menjadi sumber utama harmonik pada sistem (Kumar et al., 2022).



Gambar 3. Bentuk Gelombang Arus Fasa A (Ia) Hasil Simulasi

Analisis FFT Tegangan

Analisis FFT pada tegangan fasa A (Va) menghasilkan spektrum harmonik seperti pada Gambar 4. Komponen fundamental 50 Hz memiliki magnitudo 309 Vpuncak (218,5 Vrms) dengan nilai THD tegangan sebesar 0,65%.



Gambar 4. Spektrum Harmonik Tegangan Fasa A Hasil Analisis FFT

Pada sinyal sinusoidal, nilai RMS dapat dihitung dari nilai puncaknya menggunakan hubungan pada Persamaan (9).

$$V_{RMS} = \frac{V_{peak}}{\sqrt{2}} = \frac{309}{\sqrt{2}} \approx 218,5 V \quad (9)$$

Nilai tersebut sesuai dengan nilai tegangan RMS fundamental hasil analisis FFT sebesar 218,5 V dan mendekati tegangan nominal fasa-netral sistem sebesar 220 V, sehingga menunjukkan bahwa tegangan suplai masih berada dalam batas toleransi yang wajar. Hasil analisis FFT tegangan fasa A disajikan pada Tabel 3.

Tabel 3. Hasil Analisis FFT Tegangan dan Arus Fasa A

Parameter	Tegangan (Va)	Arus (Ia)
Frekuensi Fundamental	50 Hz	50 Hz
Tegangan dan Arus Fundamental	309 Vpuncak (218,5 Vrms)	28,12 Apuncak (19,88 Arms)

THD	0,65%	31,06%
Komponen DC (%)	0,02024%	0,1052 %
Waktu Pencuplikan	0,000413565 s	0,000413565 s
Samples per Cycle	48	48

Berdasarkan Tabel 3, tegangan fundamental sebesar 309 Vpuncak (218,5 Vrms) dan arus fundamental sebesar 28,12 Apuncak (19,88 Arms) menunjukkan kondisi operasi penyearah yang normal. Nilai THDv sebesar 0,65% masih memenuhi batas IEEE Std 519-2014, sedangkan THDi sebesar 31,06% menunjukkan bahwa distorsi harmonik didominasi oleh sisi arus akibat karakteristik nonlinier penyearah dioda enam pulsa. Rendahnya THDv mengindikasikan bahwa kualitas tegangan suplai tetap terjaga meskipun sistem dibebani beban nonlinier, sejalan dengan hasil yang dilaporkan oleh (Bonilla & Le, 2024). Spektrum harmonik tegangan dan Arus secara rinci disajikan pada Tabel 4.

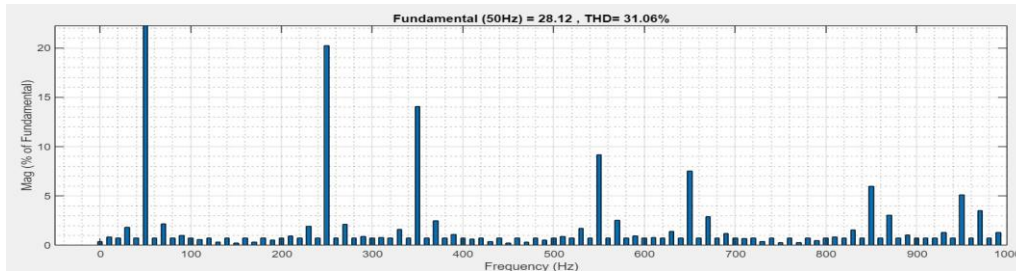
Tabel 4. Spektrum Harmonik Tegangan dan Arus Fasa A

Orde	Frekuensi (Hz)	Magnitudo Tegangan (%)	Sudut Fasa Tegangan (°)	Magnitudo Arus (%)	Sudut Fasa Arus (°)
H1 (Fundamental)	50	100,00	-5,2	100,00	-5,7
H3	150	0,06	188,6	0,25	159,8
H5	250	0,03	197,6	20,26	150,5
H7	350	0,02	202,6	14,04	142,9
H11	550	0,01	217,8	9,18	-61,2
H13	650	0,02	227,5	7,53	-71,7
H17	850	0,01	269,4	5,97	85,2
H19	950	0,01	210,6	5,10	74,7

Spektrum harmonik memperlihatkan bahwa distorsi tegangan relatif rendah pada seluruh orde, sedangkan distorsi arus didominasi oleh harmonik orde ke-5 dan ke-7, diikuti orde ke-11, ke-13, ke-17, dan ke-19. Komponen harmonik orde ke-3 sangat kecil akibat eliminasi harmonik triplen pada sistem tiga fasa seimbang. Karakteristik ini sesuai dengan teori penyearah dioda enam pulsa, sehingga memvalidasi model simulasi (Motegi & Nishida, 2021)(Pool-Mazun et al., 2021)(Gonçalves et al., 2021)(Dubey & Jarial, 2022)

Analisis FFT Arus

Analisis FFT terhadap sinyal arus fasa A menghasilkan spektrum harmonik yang jauh berbeda karakteristiknya dari spektrum tegangan, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 5. Komponen fundamental arus pada frekuensi 50 Hz tercatat sebesar 28,12 Apuncak (19,88 Arms), dengan THD arus mencapai 31,06%.



Gambar 5. Spektrum Harmonik Arus Fasa A Hasil Analisis FFT

Nilai RMS arus fundamental diperoleh dari hubungan antara nilai puncak dan nilai RMS pada sinyal sinusoidal, sebagaimana dinyatakan pada Persamaan (10).

$$I_{RMS} = \frac{I_{peak}}{\sqrt{2}} = \frac{28,12}{\sqrt{2}} \approx 19,88 \text{ A} \quad (10)$$

Nilai arus fundamental sebesar 19,88 Arms menunjukkan komponen utama arus pada frekuensi dasar. Adanya kandungan harmonik menyebabkan nilai RMS total arus meningkat dibandingkan arus fundamental.

Perbandingan Antar Fasa dan Evaluasi Keseimbangan Sistem

Perbandingan parameter antar fasa dilakukan untuk mengevaluasi keseimbangan sistem tiga fasa serta memastikan konsistensi hasil simulasi pada setiap fasa. Hasil perbandingan tegangan fundamental disajikan pada Tabel 5.

Tabel 5. Perbandingan Tegangan Antar Fasa

Fasa	V Fund. Puncak (V)	V Fund. RMS (V)	THDv (%)	V RMS Total (V)
A	309,000	218,496	0,65	218,50
B	309,173	218,619	0,55	218,65
C	309,244	218,669	0,50	218,65

Berdasarkan Tabel 5, tegangan fundamental antar fasa memiliki nilai yang hampir sama dengan perbedaan maksimum 0,15 V. Nilai THDv berada pada rentang 0,50–0,65%, menunjukkan bahwa distorsi tegangan antar fasa sangat rendah dan masih memenuhi batas IEEE Std 519-2014. Perbandingan parameter arus antar fasa ditunjukkan pada Tabel 6.

Tabel 6. Perbandingan Arus Antar Fasa

Fasa	I Fund. Puncak (A)	I Fund. RMS (A)	THDi (%)	I RMS Total (A)
A	28,12	19,88	31,06	20,82
B	28,12	19,88	31,06	20,82
C	28,22	19,95	30,79	20,87

Berdasarkan Tabel 6, arus fundamental pada ketiga fasa menunjukkan nilai yang seimbang dengan perbedaan kurang dari 0,7 A. Nilai THDi yang relatif sama pada setiap fasa menunjukkan bahwa sumber distorsi harmonik berasal dari karakteristik beban nonlinier penyearah dioda tiga fasa, bukan akibat ketidakseimbangan sistem.

Evaluasi tingkat ketidakseimbangan sistem dirangkum pada Tabel 7.

Tabel 7. Ketidakseimbangan (Unbalance) Antar Fasa

Besaran	Rata-rata	Deviasi Maks.	Unbalance Factor
V fundamental puncak	309,13 V	0,13 V (Fasa A)	≈ 0,04%
I fundamental puncak	28,15 A	0,07 A (Fasa C)	≈ 0,24%

Hasil pada Tabel 7 menunjukkan bahwa sistem berada dalam kondisi seimbang dengan faktor ketidakseimbangan tegangan dan arus masing-masing sebesar 0,04% dan 0,24%. Dengan demikian, variasi antar fasa tidak memberikan pengaruh signifikan terhadap hasil analisis harmonik, sehingga distorsi yang terjadi terutama disebabkan oleh karakteristik pensaklaran penyearah dioda tiga fasa.

Evaluasi Kepatuhan terhadap Standar IEEE 519

Berdasarkan hasil analisis FFT, nilai THDv dan THDi dibandingkan dengan batas IEEE Std 519-2014. Hasil evaluasi disajikan pada Tabel 8.

Tabel 8. Evaluasi Kepatuhan THD Tegangan dan Arus terhadap IEEE Std 519-2014

Fasa	THDv (%)	Batas IEEE 59	Status THDv	THDi (%)	Batas IEEE 519-2014	Status THDi
A	0,65	≤ 5%	Memenuhi	31,06	≤ 20%	Tidak Memenuhi
B	0,55	≤ 5%	Memenuhi	31,06	≤ 20%	Tidak Memenuhi
C	0,50	≤ 5%	Memenuhi	30,79	≤ 20%	Tidak Memenuhi

Analisis THDv menunjukkan nilai sebesar 0,50 - 0,65%, jauh di bawah batas 5% menurut standar IEEE 519, sehingga kualitas tegangan masih tergolong baik. Rendahnya THDv menunjukkan bahwa impedansi sumber mampu mempertahankan bentuk gelombang tegangan tetap sinusoidal meskipun terjadi distorsi arus akibat beban nonlinier (Bakar et al., 2024)(Ragus et al., 2022).

Sebaliknya, nilai THDi sebesar 30,79-31,06% melebihi batas IEEE 519, sehingga berpotensi menurunkan kualitas daya. Tingginya THDi disebabkan oleh karakteristik penyearah dioda tiga fasa yang menghasilkan arus masukan berbentuk pulsa dengan dominasi harmonik orde $6n \pm 1$, sebagaimana dilaporkan pada penelitian sebelumnya (Yusuf et al., 2022)(Espinosa & Magwili, 2022)(Sang Hoo et al., 2021).

Implikasi dan Rekomendasi Mitigasi Harmonik

Tingginya nilai THDi menunjukkan perlunya penerapan metode mitigasi harmonik agar distorsi arus memenuhi batas yang ditetapkan dalam IEEE 519. Salah satu metode yang paling banyak digunakan adalah filter pasif, khususnya *single-tuned filter*, yang efektif mereduksi harmonik dominan orde ke-5 dan ke-7 dengan biaya implementasi yang relatif rendah (Ishaya et al., 2023). Penelitian (Shrestha et al., 2025) menunjukkan bahwa penggunaan *single-tuned filter* mampu menurunkan THDv dari 16,06% menjadi 3,89% dan THDi dari 17,57% menjadi 2,52%, sedangkan (Tahersima et al., 2026) melaporkan efektivitas metode tersebut dalam meredam harmonik pada sistem berbasis *Variable Frequency Drive* (VFD).

Selain filter pasif, *Active Power Filter* (APF) mampu mengompensasi arus harmonik secara adaptif sehingga efektif untuk berbagai kondisi operasi (Maciążek et al., 2022). Pendekatan lain yang dapat diterapkan meliputi penggunaan penyearah multipulsa (Dubey & Jarial et al., 2022), pemasangan *AC line reactor*, transformator berkonfigurasi Y- Δ atau zig-zag, serta filter hibrida yang mengombinasikan filter pasif dan aktif. Filter hibrida dilaporkan memberikan kinerja mitigasi yang lebih baik dibandingkan penggunaan filter tunggal (Nazlan et al., 2026).

Berdasarkan hasil simulasi yang menunjukkan dominasi harmonik orde ke-5 dan ke-7, metode yang paling sesuai untuk penelitian ini adalah pemasangan filter pasif *single-tuned* yang ditala pada kedua orde tersebut, disertai *AC line reactor* sebagai solusi tambahan yang ekonomis. Pendekatan ini berpotensi menurunkan THDi hingga memenuhi batas IEEE 519 sekaligus meningkatkan kualitas daya sistem (Qasim et al., 2021)(Hasan et al., 2024).

SIMPULAN

Berdasarkan hasil simulasi dan analisis *Fast Fourier Transform* (FFT), sistem tiga fasa 380 V/50 Hz dengan beban nonlinier memenuhi standar IEEE Std 519-2014 untuk tegangan (THDv 0,65%), namun belum memenuhi standar untuk arus (THDi 31,06%). Harmonik arus didominasi orde ke-5 dan ke-7, sesuai karakteristik penyearah dioda enam pulsa. Metode FFT terbukti efektif untuk mengevaluasi kualitas daya dan kepatuhan terhadap standar. Untuk menurunkan THDi, disarankan penerapan filter pasif, filter aktif, atau *AC line reactor*, serta validasi hasil melalui pengujian pada sistem nyata pada penelitian selanjutnya.

DAFTAR PUSTAKA

- Arteaga, J. A., López, Y. U., López, J. A., & Posada, J. (2025). Decoding Harmonics: Total Harmonic Distortion In Solar Photovoltaic Systems With Integrated Battery Storage. *Electricity*, 6(2), 28. <https://doi.org/10.3390/Electricity6020028>
- Bakar, M. I. A., Magsi, M. H., Uddin, S. M., & Arif, M. (2024). Simulation-Based Study On Harmonic Generation By Non-Linear Loads In 33kv Distribution Systems. In *2024 International Conference On ICSIMA*. <https://doi.org/10.1109/ICSIMA62563.2024.10675587>
- Bonilla, A. R., & Le, H. T. (2024). Analysis And Mitigation Of Harmonics For A Wastewater Treatment Plant Electrical System. *WSEAS Transactions On Circuits And Systems*, 23(1). <https://doi.org/10.37394/23201.2024.23.1>

- Dubey, A., & Jarial, R. (2022). Improvement Of Harmonic Mitigation Capability Of 12-Pulse Diode Bridge Rectifier Using Interphase Transformer And High Frequency Solid State Transformer For EV Fast Charging Applications. In *2022 IEEE International Conference On Distributed Computing And Electrical Circuits And Electronics (ICDCECE)*. <https://doi.org/10.1109/icdcece53908.2022.9793173>
- Espinosa, T. B. P., & Magwili, G. (2022). Synchronous Reference Frame Method With PLL And Hysteresis Current Controller For Three Phase Shunt Active Power Filter To Mitigate Harmonics Caused By Nonlinear Loads. In *International Conference On Computer And Automation Engineering*. <https://doi.org/10.1109/ICCAE55086.2022.9762417>
- Gonçalves, J., Valtchev, S., Melício, R., Gonçalves, A., & Blaabjerg, F. (2021). Hybrid Three-Phase Rectifiers With Active Power Factor Correction: A Systematic Review. *Electronics*, 10(13), 1520. <https://doi.org/10.3390/Electronics10131520>
- Hasan, M., Ratul, M. R. A., & Sheikh, M. I. (2024). Voltage Harmonics Mitigation Of Non-Linear Loads Using Model Predictive Control In A Three Phase System. In *2024 3rd International Conference On Advancement In Electrical And Electronic Engineering (ICAEEE)*. <https://doi.org/10.1109/ICAEEE62219.2024.10561641>
- Ishaya, M. M., Adegboye, O., Agyekum, E. B., Elnaggar, M. F., Alrashed, M. M., & Kamel, S. (2023). Single-Tuned Passive Filter (STPF) For Mitigating Harmonics In A 3-Phase Power System. *Scientific Reports*, 13. <https://doi.org/10.1038/S41598-023-47614-7>
- Kumar, A. (2022). Power Quality Issues And Harmonics Performance Analysis For Non-Linear Load In Power Distribution System. In *International Conference On Electrical Engineering, Computing Science And Automatic Control*. <https://doi.org/10.1109/CCE56709.2022.9975948>
- Maciążek, M. (2022). Active Power Filters And Power Quality. *Energies*, 15(22), 8483. <https://doi.org/10.3390/En15228483>
- Motegi, S., & Nishida, Y. (2021). A New Three-Phase Diode Rectifier With Improved Characteristics. In *EPE*. <https://doi.org/10.23919/Epe21ecceurope50061.2021.9570704>
- Paunekar, R., Gaygowad, S., Ghushey, A., Bhonde, K., Gedam, S., Padole, P., Honshette, N., & Halmare, A. (2023). Automatic Reduction Of THD For Non-Linear Load By Using Microcontroller. *International Journal For Research In Applied Science And Engineering Technology*. <https://doi.org/10.22214/Ijrasnet.2023.50333>
- Pool-Mazun, E. I., Sandoval, J., & Enjeti, P. (2021). A Modular Three-Phase Diode Rectifier With High-Frequency Isolation And Sinusoidal Input Currents. In *2021 IEEE Energy Conversion Congress And Exposition (ECCE)*. <https://doi.org/10.1109/ECCE47101.2021.9595980>
- Qasim, A. Y., Tahir, F., & Alsammak, A. (2021). Voltage Sag, Voltage Swell And Harmonics Reduction Using Unified Power Quality Conditioner (UPQC) Under Nonlinear Loads. *Iraqi Journal For Electrical And Electronic Engineering*, 17(2), 16. <https://doi.org/10.37917/Ijeee.17.2.16>
- Raguz, K. R., Miletic, M., Zelenicic, V., Sumina, D., Erceg, I., & Nastasic, Z. (2022). Analysis Of Current Harmonics In Data Center Power System. In *2022 International Convention*

- On Information And Communication Technology, Electronics And Microelectronics (MIPRO)*. <https://doi.org/10.23919/MIPRO55190.2022.9803460>
- Sang Hoo, D., Chua, K., Lim, Y. S., Chen, T. H., Chan, M. E., Ching, K. J., Goo, C. W., Hor, J. Y., & Khan, M. S. A. (2021). Mitigation Of Harmonic Distortions With Shunt Active Harmonic Filter Using SVPWM Technique. In *2021 Innovations In Power And Advanced Computing Technologies (I-PACT)*. <https://doi.org/10.1109/I-PACT52855.2021.9696506>
- Shelar, S. V., Bankar, D., & Bakre, S. (2024). Review Of Revisions Of IEEE 519 Standard On Power System Harmonics (1981 To 2022). In *2024 International Conference On Harmonics And Quality Of Power (ICHQP)*. <https://doi.org/10.1109/ICHQP61174.2024.10768696>
- Shrestha, S., Poudel, S., & Ghimire, S. (2025). Design And Analysis Of Single-Tuned Passive Filters For Total Harmonic Distortion (THD) Mitigation And Power Quality Enhancement. *Journal Of Engineering And Sciences*, 4(1). <https://doi.org/10.3126/Jes2.V4i1.76171>
- Tovar, J. A. E., Ramos, G., Celeita, D. F., & Dehghanian, P. (2025). Harmonic Characterization And Mitigation Strategies For PV-Integrated Distribution Systems: IEEE Std 519-1992 Compliance. In *2025 IEEE Workshop On Power Electronics And Power Quality Applications (PEPQA)*. <https://doi.org/10.1109/PEPQA66960.2025.11073400>
- Yusuf, S., Loko, A. Z., Abdullahi, J., & Abdulhamid, A. (2022). Performance Analysis Of Three-Phase Shunt Active Power Filter For Harmonic Mitigation. *Asian Journal Of Research And Reviews In Physics*, 6(3), 118. <https://doi.org/10.9734/Ajr2p/2022/V6i3118>