

Analisis Pengaruh Jumlah *Pulse* pada VFD terhadap Harmonisa dan Faktor Daya Motor Induksi *Booster Fan* di Indarung VI PT Semen Padang

Lathifah Khairunnisa¹, Muhammad Ikhwanus², Teuku Iqbal Faridiansyah³

^{1,2,3}*Program Studi Teknik Elektro, Universitas Malikussaleh, Indonesia*
Email: lathifah.220150004@mhs.unimal.ac.id¹

Article Info

Article history:

Received July 08, 2026
Revised July 30, 2026
Accepted August 04, 2026

Keywords:

Power Factor, Harmonics,
Number Of Pulses,
MATLAB/Simulink, Total
Harmonic Distortion, Variable
Frequency Drive.

ABSTRACT

The research method used is a simulation-based quantitative analysis, comparing the three pulse configurations under equivalent operating conditions. The results show that increasing the number of pulses significantly affects the current THD (THDi), which decreases from 26.531%-50.968% in the 6-pulse configuration to 1.525%-13.837% in the 12-pulse configuration, while the 18-pulse configuration yields 3.496%-8.978%. The True Power Factor (TPF) on the input side also increases from 0.32-0.42 in the 6-pulse to 0.64-0.68 in the 12-pulse and 0.66-0.71 in the 18-pulse, with the largest improvement occurring in the transition from 6-pulse to 12-pulse.

This is an open access article under the [CC BY-SA](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/) license.



Article Info

Article history:

Received July 08, 2026
Revised July 30, 2026
Accepted August 04, 2026

Kata kunci:

Faktor Daya, Harmonisa,
Jumlah Pulse,
MATLAB/Simulink, Total
Harmonic Distortion, Variable
Frequency Drive.

ABSTRAK

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh variasi jumlah *pulse* pada VFD (6-*pulse*, 12-*pulse*, dan 18-*pulse*) terhadap *Total Harmonic Distortion* (THD) dan faktor daya sistem motor induksi *booster fan* melalui simulasi menggunakan perangkat lunak MATLAB/Simulink. Metode penelitian yang digunakan adalah analisis kuantitatif berbasis simulasi dengan membandingkan hasil ketiga konfigurasi *pulse* pada kondisi operasi yang setara. Hasil penelitian menunjukkan bahwa peningkatan jumlah *pulse* berpengaruh signifikan terhadap THD arus (THDi), yaitu menurun dari 26,531%–50,968% pada konfigurasi 6-*pulse* menjadi 1,525%–13,837% pada 12-*pulse*, sementara pada 18-*pulse* diperoleh 3,496%–8,978%. Nilai *True Power Factor* (TPF) sisi input juga meningkat dari 0,32–0,42 pada 6-*pulse* menjadi 0,64–0,68 pada 12-*pulse* dan 0,66–0,71 pada 18-*pulse*.

This is an open access article under the [CC BY-SA](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/) license.



Corresponding Author:

Lathifah Khairunnisa
Universitas Malikussaleh, Indonesia
Email: lathifah.220150004@mhs.unimal.ac.id¹

PENDAHULUAN

Dalam proses produksi semen, unit *coal mill* memiliki peran penting dalam mengubah batu bara padat menjadi serbuk halus (*pulverized coal*) sebagai bahan bakar utama *kiln*. Pada sistem ini, *booster fan* berfungsi untuk menjaga aliran udara dan tekanan yang stabil, sehingga proses pengeringan dan transportasi batu bara berjalan efisien. Motor induksi tiga fasa banyak digunakan sebagai penggerak utama pada peralatan industri semacam ini karena konstruksinya sederhana, andal, dan biaya perawatannya relatif rendah (Hafiz Ashabullah et al., 2024). Motor

induksi penggerak *booster fan* pada umumnya dikendalikan menggunakan *Variable Frequency Drive* (VFD) agar kecepatan motor dapat disesuaikan dengan kebutuhan proses secara dinamis.

Penggunaan VFD secara umum mampu meningkatkan fleksibilitas operasi motor dan berpotensi mengurangi konsumsi energi, terutama pada sistem dengan variasi beban (Safrizal et al., 2024). VFD bekerja dengan mengatur frekuensi dan tegangan yang disuplai ke motor melalui tiga tahapan utama, yaitu penyearahan, penapisan pada *DC link*, dan pembentukan kembali gelombang keluaran oleh *inverter* (Nugrahanto et al., 2022). Melalui pengaturan frekuensi tersebut, kecepatan motor dapat dikendalikan secara halus sesuai kebutuhan proses tanpa memerlukan pengasutan mekanis tambahan (Aripriharta, 2023).

Berdasarkan data operasional yang diperoleh dari *Central Control Room* (CCR) Indarung VI, motor induksi *booster fan* beroperasi dengan frekuensi kerja yang bervariasi dan cenderung berada di bawah frekuensi maksimum VFD, yaitu sebesar 27,2 Hz. Hasil pengolahan data menunjukkan nilai $\cos \phi$ pada sisi output motor berada pada kisaran 0,25 hingga 0,56, lebih rendah dibandingkan nilai faktor daya nominal motor sebesar 0,85. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa motor beroperasi pada titik operasi yang berbeda dari kondisi nominal akibat variasi frekuensi dan beban. Di sisi lain, penggunaan VFD juga berpotensi menimbulkan permasalahan kualitas daya pada sisi input berupa munculnya harmonisa akibat proses penyearahan (*rectifier*) yang menghasilkan arus tidak sinusoidal dari jaringan.

Pada sistem berbasis VFD, kualitas daya dipengaruhi oleh karakteristik pada sisi output maupun sisi input. Pada sisi output, faktor daya dipengaruhi oleh kondisi operasi motor, seperti frekuensi kerja dan pembebanan. Sementara itu, pada sisi input, proses konversi daya pada bagian *rectifier* menyebabkan bentuk gelombang arus menjadi tidak sinusoidal sehingga mengandung komponen harmonisa (Rahman Maulana et al., 2024). Keberadaan harmonisa tersebut dapat meningkatkan distorsi arus, menurunkan nilai *true power factor*, serta meningkatkan rugi-rugi daya pada sistem. Oleh karena itu, analisis terhadap harmonisa dan faktor daya menjadi penting untuk mengevaluasi kualitas daya pada sistem berbasis VFD.

Menurut Nasir (2022), besarnya distorsi harmonisa dapat dipengaruhi oleh jumlah *pulse* pada rangkaian penyearah (*rectifier*). VFD umumnya menggunakan penyearah 6-*pulse* yang menghasilkan harmonisa dominan pada orde ke-5 dan ke-7. Sementara itu, konfigurasi *multi-pulse* seperti 12-*pulse* atau 18-*pulse* mampu menurunkan tingkat distorsi harmonisa secara signifikan (Albalawi et al., 2024). Penerapan topologi *multi-pulse* pada penyearah terbukti efektif dalam menekan harmonisa orde rendah tanpa memerlukan filter tambahan yang kompleks (Li et al., 2022). Meskipun berbagai penelitian telah membahas pengaruh harmonisa terhadap kualitas daya pada sistem berbasis VFD, kajian yang secara spesifik mengaitkan variasi jumlah *pulse* dengan karakteristik harmonisa dan faktor daya pada sistem motor induksi *booster fan* di industri semen masih terbatas, terutama yang berbasis pada data operasional nyata.

Sistem motor *booster fan* Indarung VI saat ini menggunakan VFD dengan konfigurasi 6-*pulse*. Mengingat kajian langsung di lapangan terhadap konfigurasi *multi-pulse* tidak dapat dilakukan tanpa penggantian perangkat, pendekatan berbasis simulasi untuk konfigurasi 12-*pulse* dan 18-*pulse* memungkinkan dilakukannya perbandingan kuantitatif antara ketiga konfigurasi tersebut dalam kondisi operasi yang setara (Nahin et al., 2022). Dengan demikian, diperlukan suatu analisis berbasis simulasi untuk mengkaji secara terukur pengaruh variasi jumlah *pulse* pada VFD terhadap besarnya distorsi harmonisa dan faktor daya pada sistem motor induksi *booster fan*.

Berdasarkan kondisi tersebut, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh variasi jumlah *pulse* pada VFD terhadap besarnya distorsi harmonisa dan faktor daya pada sistem motor induksi penggerak *booster fan* di Indarung VI PT Semen Padang. Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan gambaran teknis mengenai hubungan antara konfigurasi

pulse VFD, karakteristik harmonisa, dan faktor daya sebagai parameter kualitas daya pada sistem *booster fan*, serta menjadi dasar pertimbangan dalam pemilihan konfigurasi VFD yang lebih optimal untuk meningkatkan kualitas daya pada sistem kelistrikan industri semen.

METODE

Penelitian ini merupakan penelitian kuantitatif berbasis simulasi yang bertujuan menganalisis pengaruh variasi jumlah *pulse* pada *Variable Frequency Drive* (VFD) terhadap harmonisa dan faktor daya sistem motor induksi *booster fan* unit *coal mill* di Indarung VI PT Semen Padang. Objek penelitian adalah motor induksi tiga fasa penggerak *booster fan* berdaya 460 kW, tegangan 690 V, arus 460 A, dan frekuensi 50 Hz, yang dikendalikan VFD tipe ACS 800 berkonfigurasi 6-*pulse*. Data yang digunakan merupakan data sekunder berupa data operasional (arus, daya aktif, dan kecepatan putar motor) yang diperoleh dari *Central Control Room* (CCR) PT Semen Padang selama 24 jam pengamatan, serta data *nameplate* motor dan spesifikasi VFD. Instrumen utama penelitian adalah perangkat lunak MATLAB/Simulink R2016a yang digunakan untuk memodelkan sistem kelistrikan dan menganalisis *Total Harmonic Distortion* arus (THDi), *Total Harmonic Distortion* tegangan (THDv), serta faktor daya melalui analisis *Fast Fourier Transform* (FFT).

Prosedur penelitian diawali dengan studi literatur dan pengumpulan data operasional, dilanjutkan dengan pengolahan data untuk memperoleh parameter kelistrikan seperti frekuensi kerja, arus aktual, daya semu, dan faktor daya. Berdasarkan data tersebut ditetapkan tiga skenario operasi yang mewakili beban rendah, sedang, dan tinggi, yaitu frekuensi 13,87 Hz, 16,67 Hz, dan 21,25 Hz. Selanjutnya dibangun model sistem VFD pada MATLAB/Simulink dan disimulasikan pada tiga konfigurasi *rectifier*, yaitu 6-*pulse*, 12-*pulse*, dan 18-*pulse*, dengan menjaga parameter lain tetap konstan. Nilai THDi dan THDv diperoleh melalui analisis FFT, sedangkan *True Power Factor* (TPF) dihitung dari *Displacement Power Factor* (DPF) dengan memperhitungkan pengaruh distorsi harmonisa. Seluruh hasil kemudian dievaluasi terhadap standar IEEE Std 519-2022 melalui parameter *Total Demand Distortion* (TDD) untuk menentukan konfigurasi *pulse* dengan kualitas daya terbaik.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Data Hasil Pengukuran

Pengumpulan data dilakukan pada motor induksi penggerak *booster fan* unit *coal mill* Indarung VI yang dioperasikan menggunakan *Variable Frequency Drive* (VFD). Data operasional yang dikumpulkan meliputi persentase arus (I), daya aktif (P), dan kecepatan putar motor (Ns) selama 24 jam pengamatan, sebagaimana disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Data Operasional Motor *Booster Fan*

Time	I (%)	P (kW)	Ns (rpm)
00:00:00	43,75	60,90	277,34
01:00:00	44,89	69,09	290,12
02:00:00	45,02	70,22	292,14
03:00:00	46,78	82,98	310,83
04:00:00	46,65	82,21	310,21
05:00:00	47,80	90,47	321,09
06:00:00	48,02	91,68	321,84
07:00:00	49,63	103,67	337,49
08:00:00	48,07	92,52	324,15
09:00:00	49,13	100,05	333,40
10:00:00	49,59	103,58	338,07

Time	I (%)	P (kW)	Ns (rpm)
11:00:00	48,54	95,84	328,41
12:00:00	48,85	97,74	330,08
13:00:00	49,50	102,59	336,33
14:00:00	49,04	99,20	332,11
15:00:00	48,20	92,98	324,08
16:00:00	51,15	114,22	348,51
17:00:00	56,72	154,60	388,73
18:00:00	56,52	153,70	388,89
19:00:00	57,67	162,84	396,45
20:00:00	60,30	183,21	415,43
21:00:00	59,14	174,82	408,44
22:00:00	61,43	193,20	425,02
23:00:00	59,45	177,32	410,76

Berdasarkan Tabel 1, terlihat bahwa persentase arus motor bervariasi dari 43,75% hingga 61,43% dengan daya aktif berkisar antara 60,90 kW hingga 193,20 kW dan kecepatan putar 277,34 rpm hingga 425,02 rpm selama periode pengamatan. Variasi nilai tersebut menunjukkan bahwa motor *booster fan* beroperasi pada pembebanan yang berubah-ubah mengikuti kebutuhan proses, dengan beban terendah terjadi pada dini hari dan beban tertinggi pada malam hari. Kondisi ini menegaskan bahwa motor tidak bekerja pada titik operasi nominal, melainkan pada kondisi beban parsial yang diatur melalui pengaturan frekuensi oleh VFD.

Data operasional tersebut selanjutnya diolah untuk memperoleh parameter kelistrikan berupa frekuensi kerja (F), arus aktual (I), daya semu (S), dan faktor daya ($\cos \phi$) sebagai gambaran kondisi sistem, sebagaimana disajikan pada Tabel 2.

Tabel 2. Pengolahan Data Operasional

Time	F (Hz)	I (A)	S (kVA)	Cos ϕ
00:00:00	13,87	205,63	245,74	0,25
01:00:00	14,51	210,98	252,14	0,27
02:00:00	14,61	211,59	252,87	0,28
03:00:00	15,54	219,87	262,76	0,32
04:00:00	15,51	219,26	262,03	0,31
05:00:00	16,05	224,66	268,49	0,34
06:00:00	16,09	225,69	269,72	0,34
07:00:00	16,87	233,26	278,77	0,37
08:00:00	16,21	225,93	270,00	0,34
09:00:00	16,67	230,91	275,96	0,36
10:00:00	16,90	233,07	278,54	0,37
11:00:00	16,42	228,14	272,64	0,35
12:00:00	16,50	229,60	274,38	0,36
13:00:00	16,82	232,65	278,04	0,37
14:00:00	16,61	230,49	275,45	0,36
15:00:00	16,20	226,54	270,73	0,34
16:00:00	17,43	240,41	287,30	0,40
17:00:00	19,44	266,58	318,59	0,49
18:00:00	19,44	265,64	317,47	0,48
19:00:00	19,82	271,05	323,93	0,50
20:00:00	20,77	283,41	338,70	0,54
21:00:00	20,42	277,96	332,18	0,53

Time	F (Hz)	I (A)	S (kVA)	Cos ϕ
22:00:00	21,25	288,72	345,04	0,56
23:00:00	20,54	279,42	333,92	0,53

Berdasarkan Tabel 2, nilai faktor daya ($\cos \phi$) aktual motor berada pada kisaran 0,25 hingga 0,56, jauh lebih rendah dibandingkan faktor daya nominal motor sebesar 0,85. Selama periode pengamatan, motor dioperasikan pada frekuensi antara 13,87 Hz hingga 21,25 Hz. Penurunan frekuensi melalui VFD menyebabkan kecepatan putaran motor menurun sehingga beban yang diterima motor juga berkurang, yang mengakibatkan nilai faktor daya aktual menjadi lebih rendah dibandingkan nilai nominalnya. Berdasarkan data operasional tersebut, digunakan tiga kondisi operasi sebagai skenario simulasi, yaitu frekuensi 13,87 Hz, 16,67 Hz, dan 21,25 Hz yang masing-masing mewakili kondisi beban rendah, beban sedang, dan beban tinggi.

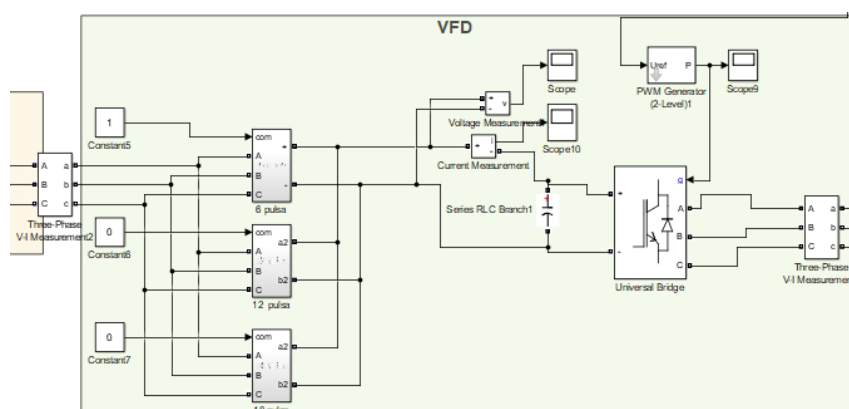
Parameter dan Skenario Simulasi

Simulasi dilakukan menggunakan MATLAB/Simulink R2016a dengan mengasumsikan tegangan antar fasa (Vrms) sebesar 20000 V, *rectifier* dioda (6-pulse, 12-pulse, dan 18-pulse), kapasitansi DC Link 0,008 F, dan inverter IGBT. Simulasi dijalankan pada tiga skenario frekuensi operasi yang merepresentasikan data aktual lapangan, dengan nilai torsi beban pada masing-masing skenario dihitung dari data daya dan kecepatan aktual. Skenario simulasi selengkapanya disajikan pada Tabel 3.

Tabel 3. Skenario Penelitian

Skenario	Frekuensi (Hz)	Kecepatan (rpm)	Torsi (Nm)	Konfigurasi Pulse
1	13,87	277,34	2097,10	6, 12, 18-pulse
2	16,67	333,40	2865,94	6, 12, 18-pulse
3	21,25	425,02	4341,57	6, 12, 18-pulse

Berdasarkan Tabel 3, setiap skenario frekuensi operasi disimulasikan pada tiga konfigurasi VFD, yaitu 6-pulse, 12-pulse, dan 18-pulse. Nilai torsi beban meningkat seiring bertambahnya frekuensi dan kecepatan, yaitu 2097,10 Nm pada 13,87 Hz, 2865,94 Nm pada 16,67 Hz, dan 4341,57 Nm pada 21,25 Hz. Analisis harmonisa dan faktor daya dilakukan pada sisi input VFD untuk mengevaluasi pengaruh jumlah *pulse* terhadap harmonisa arus, harmonisa tegangan, dan faktor daya sistem. Model rangkaian VFD yang dibangun pada MATLAB/Simulink ditunjukkan pada Gambar 1.

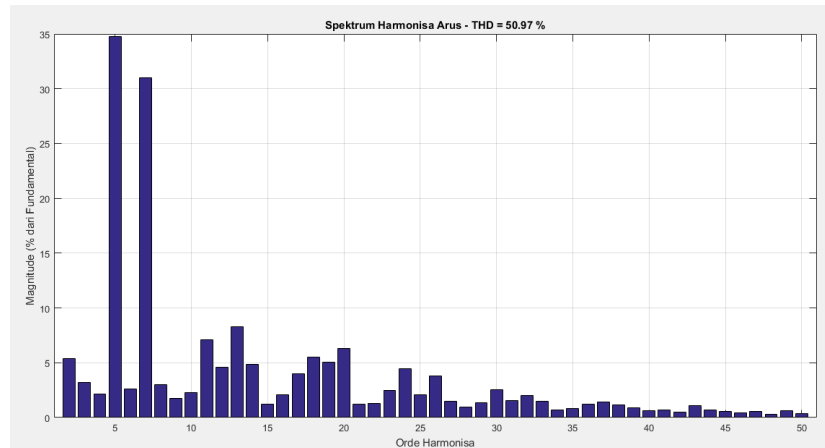


Gambar 1. Rangkaian VFD Simulasi

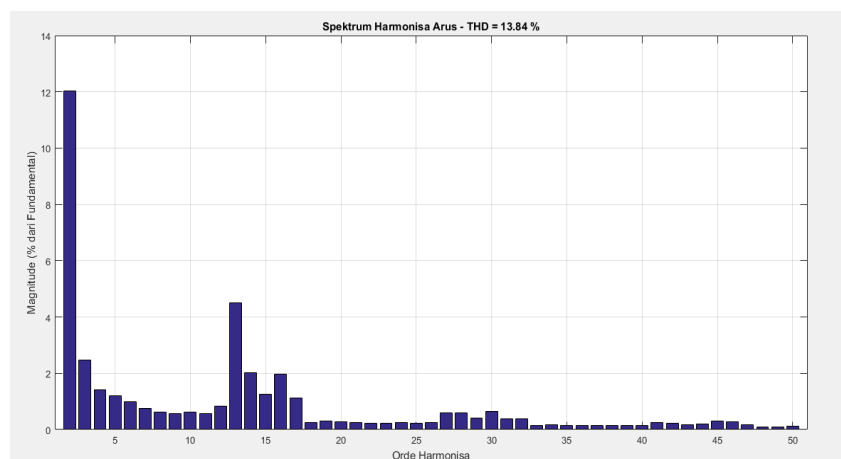
Analisis Pengaruh Jumlah *Pulse* terhadap Harmonisa

Analisis harmonisa dilakukan terhadap konfigurasi VFD 6-pulse, 12-pulse, dan 18-pulse pada tiga kondisi operasi *booster fan* menggunakan dua parameter kualitas daya, yaitu

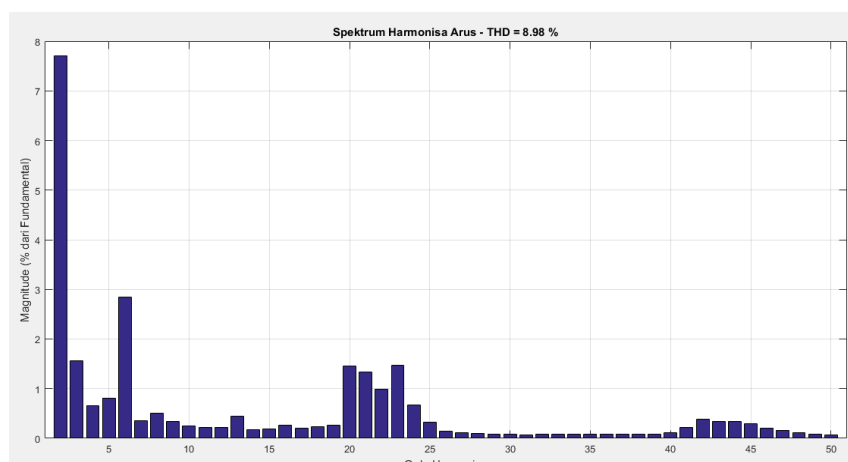
Total Harmonic Distortion arus (THDi) dan *Total Harmonic Distortion* tegangan (THDv). Nilai THDi dan THDv diperoleh dari hasil pengolahan sinyal arus dan tegangan menggunakan script MATLAB yang menerapkan algoritma *Fast Fourier Transform* (FFT), dengan membandingkan nilai RMS komponen harmonisa terhadap komponen fundamentalnya. Sebagai ilustrasi spektrum harmonisa arus, hasil analisis FFT pada frekuensi 13,87 Hz untuk masing-masing konfigurasi ditunjukkan pada Gambar 2, Gambar 3, dan Gambar 4.



Gambar 2. THDi Konfigurasi 6-pulse pada Frekuensi 13,87 Hz



Gambar 3. THDi Konfigurasi 12-pulse pada Frekuensi 13,87 Hz



Gambar 4. THDi Konfigurasi 18-pulse pada Frekuensi 13,87 Hz

Berdasarkan Gambar 2 sampai Gambar 4, terlihat bahwa spektrum harmonisa arus pada konfigurasi 6-pulse memiliki amplitudo komponen harmonisa yang jauh lebih besar

dibandingkan konfigurasi 12-*pulse* dan 18-*pulse*. Pada konfigurasi 6-*pulse*, nilai THDi mencapai 50,968% dengan harmonisa dominan pada orde ke-5 dan ke-7, sedangkan pada konfigurasi 12-*pulse* dan 18-*pulse* harmonisa orde rendah tersebut tereliminasi sehingga nilai THDi menurun drastis menjadi 13,837% dan 8,978%. Hal ini menunjukkan bahwa penambahan jumlah *pulse* pada *rectifier* efektif menekan distorsi harmonisa arus pada sisi input VFD. Rekapitulasi nilai THDi dan THDv untuk seluruh konfigurasi dan frekuensi operasi disajikan pada Tabel 4.

Tabel 4. Rekapitulasi Hasil Simulasi THD

Konfigurasi	Frekuensi (Hz)	THDi (%)	THDv (%)
6- <i>pulse</i>	13,87	50,968	3,249
6- <i>pulse</i>	16,67	26,531	2,234
6- <i>pulse</i>	21,25	28,163	2,225
12- <i>pulse</i>	13,87	13,837	3,243
12- <i>pulse</i>	16,67	6,613	2,232
12- <i>pulse</i>	21,25	1,525	2,225
18- <i>pulse</i>	13,87	8,978	3,244
18- <i>pulse</i>	16,67	6,550	2,232
18- <i>pulse</i>	21,25	3,496	2,225

Berdasarkan Tabel 4, peningkatan jumlah *pulse* dari 6-*pulse* menjadi 12-*pulse* memberikan penurunan nilai THDi yang paling signifikan, yaitu dari kisaran 26,531%–50,968% menjadi 1,525%–13,837%. Pada konfigurasi 18-*pulse*, nilai THDi berada pada kisaran 3,496%–8,978%, sehingga tidak selalu lebih rendah dibandingkan 12-*pulse* pada seluruh kondisi operasi; pada frekuensi 21,25 Hz, THDi 18-*pulse* (3,496%) justru lebih tinggi dibandingkan 12-*pulse* (1,525%). Perbedaan tersebut diduga dipengaruhi oleh konfigurasi model simulasi, parameter sistem, serta konfigurasi transformator *phase-shifting* yang digunakan. Sementara itu, nilai THDv relatif stabil pada seluruh konfigurasi, yaitu pada kisaran 2,225%–3,249%, yang menunjukkan bahwa variasi jumlah *pulse* tidak berpengaruh signifikan terhadap harmonisa tegangan. Hasil ini sejalan dengan penelitian Nahin et al. (2022) yang menunjukkan bahwa peningkatan jumlah *pulse* pada *multi-pulse rectifier* menghasilkan penurunan nilai THD arus sisi input sehingga kualitas daya sisi input menjadi lebih baik.

Analisis TDD dan Evaluasi IEEE 519-2022

Untuk menilai kesesuaian tingkat distorsi harmonisa arus terhadap standar IEEE Std 519-2022, digunakan parameter *Total Demand Distortion* (TDD) yang membandingkan komponen harmonisa terhadap arus beban maksimum (*maximum demand load current*), sehingga lebih representatif dalam mengevaluasi dampak harmonisa pada sistem tenaga. Nilai arus beban maksimum (IL) yang digunakan adalah 288,72 A, yaitu arus operasi tertinggi yang tercatat pada data CCR PT Semen Padang. Perhitungan TDD dilakukan berdasarkan nilai THDi dan arus fundamental hasil simulasi untuk setiap konfigurasi, dengan hasil rekapitulasi disajikan pada Tabel 5.

Tabel 5. Rekapitulasi Nilai TDD

Konfigurasi	Frekuensi (Hz)	TDD (%)
6- <i>pulse</i>	13,87	1,34
6- <i>pulse</i>	16,67	2,27
6- <i>pulse</i>	21,25	2,37
12- <i>pulse</i>	13,87	0,16

Konfigurasi	Frekuensi (Hz)	TDD (%)
12-pulse	16,67	0,12
12-pulse	21,25	0,03
18-pulse	13,87	0,09
18-pulse	16,67	0,12
18-pulse	21,25	0,07

Berdasarkan Tabel 5, seluruh konfigurasi *rectifier* menghasilkan nilai TDD yang relatif rendah pada setiap variasi frekuensi operasi. Nilai TDD tertinggi diperoleh pada konfigurasi 6-pulse frekuensi 21,25 Hz sebesar 2,37%, sedangkan nilai terendah diperoleh pada konfigurasi 12-pulse frekuensi yang sama sebesar 0,03%. Secara keseluruhan, seluruh nilai TDD berada di bawah 5%, sehingga memenuhi batas distorsi harmonisa arus yang ditetapkan dalam IEEE Std 519-2022. Peningkatan jumlah *pulse* juga terbukti menurunkan nilai TDD, di mana konfigurasi 12-pulse dan 18-pulse menghasilkan TDD yang lebih rendah dibandingkan 6-pulse pada hampir seluruh variasi frekuensi. Hal ini menegaskan bahwa penggunaan *multi-pulse rectifier* mampu mengurangi distorsi harmonisa arus dibandingkan konfigurasi 6-pulse.

Analisis Faktor Daya pada Sisi Input VFD

Analisis faktor daya pada sisi input VFD dilakukan untuk mengevaluasi pengaruh jumlah *pulse rectifier* terhadap kualitas daya jaringan. Dua jenis faktor daya yang dianalisis yaitu *Displacement Power Factor* (DPF), yang diperoleh dari beda sudut fasa antara komponen fundamental tegangan dan arus sisi input, serta *True Power Factor* (TPF), yang diperoleh dengan memperhitungkan pengaruh harmonisa terhadap DPF. Rekapitulasi nilai TPF sisi input untuk seluruh konfigurasi *pulse* dan frekuensi operasi disajikan pada Tabel 6.

Tabel 6. Perbandingan TPF Antar Konfigurasi *Pulse* pada Sisi Input VFD

Frekuensi (Hz)	TPF 6-pulse	TPF 12-pulse	TPF 18-pulse
13,87	0,32	0,67	0,69
16,67	0,40	0,64	0,66
21,25	0,42	0,68	0,71

Berdasarkan Tabel 6, nilai *True Power Factor* (TPF) pada sisi input VFD meningkat seiring bertambahnya jumlah *pulse rectifier*. Pada konfigurasi 6-pulse, nilai TPF berada pada kisaran 0,32–0,42, kemudian meningkat menjadi 0,64–0,68 pada konfigurasi 12-pulse, dan 0,66–0,71 pada konfigurasi 18-pulse. Peningkatan nilai TPF ini sejalan dengan penurunan nilai THDi, karena berdasarkan hubungan antara DPF dan THDi, berkurangnya distorsi harmonisa arus memberikan kontribusi terhadap perbaikan faktor daya sebenarnya pada sisi input VFD. Meskipun konfigurasi 18-pulse menghasilkan nilai TPF tertinggi pada sebagian besar kondisi operasi, peningkatannya dibandingkan 12-pulse relatif kecil, sedangkan peningkatan terbesar justru terjadi pada peralihan dari 6-pulse ke 12-pulse. Hal ini menunjukkan bahwa penambahan jumlah *pulse* dari 6 menjadi 12 memberikan perbaikan kualitas daya sisi input yang paling signifikan.

Analisis Faktor Daya pada Sisi Output VFD

Analisis faktor daya pada sisi output VFD dilakukan untuk mengetahui karakteristik nilai faktor daya motor pada setiap konfigurasi *pulse* dan variasi frekuensi operasi. Nilai *True Power Factor* (TPF) dihitung pada masing-masing konfigurasi, kemudian hasil pada konfigurasi 6-pulse divalidasi menggunakan nilai $\cos \phi$ aktual dari data *Central Control Room* (CCR) PT Semen Padang Indarung VI, mengingat kondisi eksisting *booster fan* menggunakan VFD 6-pulse. Rekapitulasi nilai TPF sisi output disajikan pada Tabel 7.

Tabel 7. Perbandingan TPF Antar Konfigurasi *Pulse* pada Sisi Output VFD

Frekuensi (Hz)	TPF 6-pulse	TPF 12-pulse	TPF 18-pulse
13,87	0,26	0,32	0,29
16,67	0,25	0,24	0,22
21,25	0,56	0,57	0,57

Berdasarkan Tabel 7, nilai *True Power Factor* (TPF) pada sisi output VFD tidak menunjukkan perubahan yang signifikan seiring peningkatan jumlah *pulse rectifier*. Perbedaan nilai TPF antar konfigurasi 6-pulse, 12-pulse, dan 18-pulse relatif kecil pada setiap frekuensi operasi, misalnya pada frekuensi 21,25 Hz seluruh konfigurasi menghasilkan nilai TPF yang hampir sama, yaitu 0,56–0,57. Berbeda dengan sisi input yang menunjukkan peningkatan kualitas daya akibat penurunan distorsi harmonisa, nilai TPF pada sisi output lebih dipengaruhi oleh kondisi operasi motor, seperti frekuensi kerja dan tingkat pembebanan. Hal ini mengindikasikan bahwa perubahan konfigurasi *rectifier* lebih berpengaruh terhadap karakteristik sisi input dibandingkan terhadap faktor daya pada sisi output VFD. Untuk mengetahui tingkat kesesuaian model simulasi dengan kondisi aktual di lapangan, nilai TPF hasil simulasi pada konfigurasi 6-pulse dibandingkan dengan nilai $\cos \phi$ aktual dari data CCR PT Semen Padang, sebagaimana disajikan pada Tabel 8.

Tabel 8. Perbandingan TPF Simulasi dengan $\cos \phi$ Data CCR (6-pulse)

Frekuensi (Hz)	TPF Simulasi	$\cos \phi$ CCR
13,87	0,26	0,25
16,67	0,25	0,36
21,25	0,56	0,56

Berdasarkan Tabel 8, hasil simulasi menunjukkan tingkat kesesuaian yang cukup baik dengan data aktual CCR PT Semen Padang. Pada frekuensi 13,87 Hz dan 21,25 Hz, nilai TPF simulasi sangat mendekati bahkan sama dengan nilai $\cos \phi$ aktual, yaitu masing-masing 0,26 terhadap 0,25 dan 0,56 terhadap 0,56. Sementara itu, pada frekuensi 16,67 Hz masih terdapat perbedaan antara hasil simulasi (0,25) dan data lapangan (0,36). Meskipun demikian, secara umum model simulasi telah mampu merepresentasikan kecenderungan nilai faktor daya motor pada kondisi operasi yang diamati, sehingga dapat digunakan sebagai dasar analisis pada penelitian ini.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil simulasi menggunakan MATLAB/Simulink, variasi jumlah *pulse* pada VFD berpengaruh signifikan terhadap harmonisa arus (THDi), namun tidak berpengaruh berarti terhadap harmonisa tegangan (THDv) yang relatif stabil pada kisaran 2,225%–3,249%; nilai THDi menurun dari 26,531%–50,968% pada konfigurasi 6-pulse menjadi 1,525%–13,837% pada 12-pulse dan 3,496%–8,978% pada 18-pulse. Variasi jumlah *pulse* juga meningkatkan *True Power Factor* (TPF) sisi input dari 0,32–0,42 pada 6-pulse menjadi 0,64–0,68 pada 12-pulse dan 0,66–0,71 pada 18-pulse, dengan peningkatan terbesar pada peralihan dari 6-pulse ke 12-pulse, sementara TPF sisi output relatif tidak berubah karena lebih dipengaruhi frekuensi operasi dan pembebanan motor. Seluruh nilai TDD berada di bawah batas IEEE Std 519-2022. Dengan mempertimbangkan keseimbangan antara kualitas daya dan kompleksitas sistem, konfigurasi 12-pulse merupakan konfigurasi paling optimal untuk sistem motor induksi *booster fan* di Indarung VI PT Semen Padang.

DAFTAR PUSTAKA

- Albalawi, H., Wadood, A., Khan, S., & Alatwi, A. M. (2024). Harmonic Mitigation in Multi-Pulse Rectification: A Comparative Study of 12-, 18-, and 24-Pulse Systems. *Mathematics*, 12(20). <https://doi.org/10.3390/math12203257>
- Aripriharta, A. (2023). Kendali Motor Induksi Menggunakan Variable Speed Drive. *Jurnal Kajian Teknik Elektro*, 8(1), 1–6. <https://doi.org/10.52447/jkte.v8i1.6567>
- Hafiz Ashabullah, M., & Yadie, E. (2024). Analisis Kinerja dan Harmonik Motor Induksi 3 Fasa dengan Variable Frequency Drive pada Boiler Feed Water Pump di PT. Cahaya Fajar Kaltim Menggunakan ETAP. *JTE UNIBA*, 9(1).
- Li, Q., Yin, X., Meng, F., He, X., Wang, G., & Guo, C. (2022). Hybrid Harmonic Suppression Method at DC Link of Series-Connected 18-Pulse Rectifier. *Applied Sciences (Switzerland)*, 12(11). <https://doi.org/10.3390/app12115544>
- Nahin, N. I., Nafis, M., Prokash Biswas, S., Kamal Hosain, M., Das, P., & Haq, S. (2022). Investigating the input power quality of multi-pulse AC-DC power converter fed induction motor drives. *Heliyon*, 8(12). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e11733>
- Nasir, B. A. (2022). Determination of the Harmonic Losses in an Induction Motor Fed by an Inverter. *Engineering, Technology & Applied Science Research*, 12(6). www.etasr.com
- Nugrahanto, I., Putra Riatma, G., & Dwi Risdhayanti, A. (2022). *Perancangan Variable Frequency Drive (VFD) Satu Fasa dengan Menggunakan Metode Sinusoida Pulse Width Modulation Berbasis Mikrokontroler*. Politeknik Negeri Malang.
- Rahman Maulana, F., Daud, M., & Meliala, S. (2024). *Analisis Kemunculan Harmonisa pada Variable Frequency Drive dan Dampaknya terhadap Pengaturan Kecepatan Motor Induksi Tiga Fase* (Vol. 18, No. 03).
- Safrizal, T., Sastra, A., Tarigan, P., & Annisah, S. (2024). Analysis of the Effect Rotation Speed Control on Three Phase Induction Motor Using VFD Powtech. *International Journal of Economic, Technology and Social Sciences (Injects)*, 6, 56–68.