Analisis Penyebaran Harmonisa dan Efektivitas Penempatan Filter Pasif dalam Mengurangi Distorsi Harmonisa pada Smart Grid

Sulfikar[1], Muhira Dzar Faraby[2],

[1] Teknologi Rekayasa Instalasi Listrik, Universitas Muhammadiyah Sinjai, Sinjai, Indonesia

[2] Teknik Listrik, Politeknik Negeri Ujung Pandang, Makassar, Indonesia

Coprespondent Author : sulfikar1790@gmail.com

***Abstract* — This study aims to analyze harmonic propagation and evaluate the effectiveness of passive filter placement in reducing harmonic distortion within a smart grid system. The system under study comprises several primary harmonic sources: non-linear loads, solar panel inverters, and Variable Frequency Drives (VFDs). Simulations were conducted using ETAP software across two scenarios: before and after the installation of passive filters. Two types of filters were employed: two single-tuned filters installed at the industrial bus to mitigate 5th and 7th-order harmonics, and one high-pass damped filter installed at the SS-05A bus to absorb high-order harmonics. Simulation results indicate that the highest current Total Harmonic Distortion (THD) values prior to filter installation were observed at the non-linear load bus and the SS-05A bus, at 12.93% and 12.81%, respectively. Following filter installation, these values decreased to 6.86% and 6.83%. Overall, the system experienced an average reduction in current THD of 46.3%. This reduction demonstrates that a combination of strategically placed passive filters can significantly mitigate harmonics and improve power quality. Furthermore, the results show that the system complies with harmonic tolerance limits set by the IEEE 519 standard, suggesting that this approach offers an effective solution for power quality management in modern smart grid systems.**

***Keyword* — Harmonic, Smart Grid, Single Tuned, High Pass Damped, ETAP**

***ABSTRAK* —** Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis penyebaran harmonisa dan mengevaluasi efektivitas penempatan filter pasif dalam mengurangi distorsi harmonisa pada sistem *smart grid*. Sistem yang dikaji terdiri atas beberapa sumber harmonisa utama, yaitu beban *nonlinear*, inverter panel surya, dan *Variable Frequency Drive* (VFD). Simulasi dilakukan menggunakan perangkat lunak ETAP dalam dua skenario, yaitu sebelum dan sesudah pemasangan filter pasif. Dua jenis filter digunakan: dua *single tuned filter* yang dipasang pada bus industri untuk mereduksi harmonisa orde ke-5 dan ke-7, serta satu *high-pass damped filter* yang dipasang pada bus SS-05A untuk menyerap harmonisa orde tinggi. Hasil simulasi menunjukkan bahwa nilai *Total Harmonic Distortion* (THD) arus tertinggi sebelum pemasangan filter berada pada bus beban nonlinier dan SS-05A, masing-masing sebesar 12,93% dan 12,81%. Setelah pemasangan filter, nilai tersebut turun menjadi 6,86% dan 6,83%. Secara keseluruhan, sistem mengalami penurunan rata-rata THD arus sebesar 46,3%. Penurunan ini membuktikan bahwa kombinasi filter pasif yang ditempatkan secara strategis mampu mereduksi harmonisa secara signifikan dan meningkatkan kualitas daya. Hasil ini juga menunjukkan bahwa sistem telah memenuhi batas toleransi harmonisa berdasarkan standar IEEE 519, sehingga pendekatan ini dapat menjadi solusi efektif dalam pengelolaan kualitas daya pada sistem *smart grid* modern**.**

Kata kunci — Harmonisa, Smart Grid, Single Tuned, High Pass Duamped, ETAP..

I. PENDAHULUAN

Perkembangan sistem tenaga listrik menuju konsep *smart grid* membawa berbagai keuntungan, seperti efisiensi tinggi, keandalan, dan fleksibilitas dalam pengelolaan beban dan pembangkitan [1]. Namun, penerapan teknologi modern dalam *smart grid*, seperti inverter, konverter daya, dan peralatan elektronik berbasis semikonduktor, menyebabkan peningkatan penggunaan beban *nonlinear* yang menghasilkan harmonisa [2]. Kehadiran harmonisa ini dapat menurunkan kualitas daya (*power quality*), mempercepat keausan peralatan, dan menimbulkan gangguan pada sistem proteksi serta perangkat komunikasi [3].

Penyebaran harmonisa dalam jaringan listrik tergantung pada konfigurasi sistem, karakteristik beban, dan titik injeksi harmonisa. Dalam sistem *smart grid* yang kompleks dan terintegrasi secara digital, harmonisa dapat menyebar lebih luas dan menyebabkan gangguan sistemik jika tidak ditangani secara tepat [4]. Oleh karena itu, penting dilakukan analisis distribusi harmonisa guna mengidentifikasi lokasi-lokasi kritis yang menjadi sumber dan jalur penyebaran harmonik.

Salah satu metode yang efektif dalam mengurangi distorsi harmonisa adalah penggunaan filter pasif, khususnya *single-tuned filter* dan *high-pass filter*. Filter pasif bekerja dengan menyerap komponen harmonik pada frekuensi tertentu dan memungkinkan frekuensi dasar mengalir tanpa hambatan [5]. Penempatan filter pasif yang tepat dalam sistem tenaga sangat menentukan efektivitasnya dalam menurunkan *Total Harmonic Distortion* (THD) dan meningkatkan *power factor* [6].

Beberapa studi menunjukkan bahwa kombinasi antara analisis penyebaran harmonisa dan perancangan penempatan filter pasif mampu mengoptimalkan kinerja mitigasi harmonisa, khususnya pada jaringan menengah hingga besar seperti yang terdapat pada sistem smart grid industri dan perkotaan [7][8]. Oleh karena itu, pendekatan berbasis simulasi menggunakan perangkat lunak analisis sistem tenaga seperti ETAP menjadi penting dalam menilai dampak harmonisa dan solusi filter yang diimplementasikan.

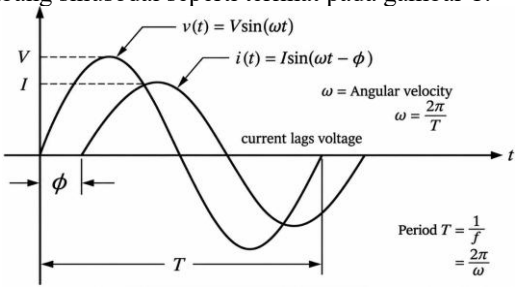
Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis penyebaran harmonisa dan mengevaluasi efektivitas penempatan filter pasif dalam menurunkan distorsi harmonisa pada sistem *smart grid*. Simulasi dilakukan pada model sistem kelistrikan berbasis jaringan distribusi menggunakan perangkat lunak ETAP. Hasil penelitian diharapkan dapat memberikan wawasan teknis terkait strategi mitigasi harmonisa yang efisien dan aplikatif pada sistem tenaga modern.

II. KAJIAN LITERATUR

A. Harmonisa

Harmonisa adalah gejala terdistorsinya gelombang arus atau tegangan pada suatu sistem tenaga listrik Saat terdapat kandungan harmonisa akan terbentuk gelombamg baru dengan frekuensi suatu kelipatan dari frekuensi dasar 50 Hz atau 60 Hz, sehingga bentuk gelombang tegangan dan arus yang semestinya adalah sinusoidal murni akan menjadi cacat. Gelombang inilah yang akan menumpang pada gelombang dasar sehingga terbentuk gelombang yang tidak sinusoidal atau cacat. Gelombang cacat tersebut, merupakan hasil dari penjumlahan dari gelombang dasar sesaat dengan gelombang harmonisanya [9]. Harmonisa disebabkan adanya beban-beban non liniear yang terhubung ke sistem distribusi. Beberapa contoh beban non liniear antara lain: *variable speed drive*, *inverter*, *rectifier*

Distorsi harmonisa adalah setiap perubahan dalam bentuk sinyal yang tidak disengaja dan secara umum keberadaannya tidak diinginkan pada sistem harmonisa merupakan salah satu hal yang menyebabkan distorsi pada bentuk gelombang fudamental tegangan dan arus. Gelombang non sinusoidal dapat terbentuk dengan menjumlahkan gelombang-gelombang sinusodal seperti terlihat pada gambar 1:



Gambar 1. Gelombang sinus arus dan tegangan[2]

Menurut standar IEEE 519-2022 [10], batas maksimal distorsi harmonik total (THD) pada sistem tenaga listrik. Untuk tegangan, batas maksimal THD umumnya adalah 5% pada sistem distribusi, namun bisa mencapai 8% pada kondisi tertentu. Untuk arus, batas maksimal THD (dinyatakan sebagai TDD - *Total Demand Distortion*) bervariasi tergantung pada rasio arus hubung singkat (ISC) dan arus beban maksimum (IL) di titik sambungan pelanggan (PCC), maka diperlukan tindakan korektif seperti penggunaan filter harmonisa.

Tabel 1. Standar Distorsi Harmonisa IEEE 519-2022

Bus Voltage	**Individual Harmonic Distortion (%)**	**Total Harmonic Distortion (%)**
≤ 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

Harmonisa dapat dikendalikan dengan menggunakan filter harmonik, baik berupa filter pasif maupun filter aktif. Perbedaan dari kedua jenis filter ini adalah filter pasif hanya dapat mengendalikan harmonisa pada satu orde harmonik, sedangkan filter aktif dapat mengkompensasi lebih dari satu orde harmonik [11]

B. Smart Grid

Smart grid adalah sebuah konsep yang menggabungkan teknologi informasi dan komunikasi dengan infrastruktur energi konvensional. Dengan menggunakan sensor, perangkat pemantauan, dan sistem pengendalian otomatis, *smart grid* dapat memungkinkan pengoptimalan yang lebih cerdas dan efisien dalam pengelolaan energi. Salah satu manfaat utama dari penggunaan *smart grid* adalah kemampuannya untuk meningkatkan integrasi sumber energi baru terbarukan [12].

Menurut [13], teknologi *smart grid* ini juga akan membantu memastikan pemulihan listrik dengan cepat dan strategis setelah keadaan darurat terjadi. Pemulihan gangguan bisa lebih cepat setelah terjadi gangguan karena terdeteksi oleh sensor yang terhubung dengan sistem kontrol secara computerized. Teknologi *smart grid* didesain mampu mendeteksi dan mengisolasi pemadaman, mengantisipasi sebelum menjadi pemadaman skala besar sehingga akan meminimalkan pemadaman listrik dan meminimalkan dampak yang terjadi.

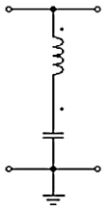
C. Single Tuned Filter

Filter pasif bertujuan untuk mengalihkan harmonisa arus yang tidak diinginkan dalam sistem tenaga. Komponen dari filter pasif adalah resistor, induktor, dan kapasitor. Parameter utama yang harus dipertimbangkan dalam pemilihan R, L, C pada saat perancangan filter pasif adalah *quality factor* (Q), nilai ini akan menentukan ketajaman penalaan. Pada orde harmonisa frekuensi rendah biasanya Q berharga antara 30 sampai dengan 60. Berdasarkan susunan komponennya filter pasif dapat dibedakan menjadi 3 bagian yaitu:

1. Filter dengan penalaan tunggal (*Single Tuned Shunt Filter*)
2. Filter dengan penalaan ganda (*Double Tuned Filter*)
3. Filter dengan penalaan redaman (*High Pass Dumped Filter*) [14].

Salah satu jenis filter pasif yang dituning pada salah satu order harmonisa (biasanya pada orde harmonisa rendah). Filter ini tersusun dari rangkaian seri resistor, reaktor,

kapasitor atau biasanya disingkat RLC. Pemasangan rangkaian *Single Tuned Passive Filter* biasanya ditempatkan berdekatan dengan sumber distorsi atau dengan beban yang menjadi penyebab munculnya harmonisa. Rangkaian filter ini dapat dilihat pada gambar 2.



Gambar 2. Rangkaian *Single Tuned Filter* [15].

Perancangan dan pemasangan filter harmonik diperlukan untuk mengurangi distorsi harmonik dan juga dapat untuk memperbaiki faktor daya. Salah satu jenis filter yang dapat digunakan adalah filter pasif jenis single tuned filter yang merupakan metode penyelesaian yang efektif dan ekonomis untuk mengalihkan arus harmonik yang tidak diinginkan dalam sistem distribusi tenaga listrik [16].

Teknik filter pasif adalah salah satu metode paling umum yang digunakan untuk mengontrol distorsi harmonisa dalam aplikasi industri. *Line reaktor* harus dihitung sebagai langkah pertama untuk desain filter. Dimana line reaktor memberikan impedansi untuk mengurangi harmonisa yang dihasilkan oleh beban non-linier.

Prinsip kerja filter pasif adalah arus harmonisa dialirkan pada orde tertentu dari sumber harmonisa seperti beban *non-linear* yaitu melalui jaringan filter. Untuk memaksa arus mengalir ke jaringan filter pada orde tertentu maka besaran kapasitor harus ditentukan agar terjadi resonansi pada jaringan, sehingga harga impedansi pada saluran akan berkurang karena yang tinggal hanya komponen resistansi saja. Selain dapat mengurangi harmonisa, filter pasif juga dapat memperbaiki *power factor* [17].

D. High Pass Damped Filter

High Pass Damped Filter (HPDF) merupakan salah satu jenis filter pasif yang dirancang untuk menyaring harmonisa orde tinggi di atas orde ke-11. Berbeda dengan *Single Tuned Filter* (STF) yang hanya menargetkan satu frekuensi tertentu, HPDF memiliki karakteristik impedansi rendah untuk frekuensi tinggi, sehingga mampu menyerap berbagai komponen harmonisa di atas frekuensi resonansi yang ditentukan [8].

HPDF terdiri dari kombinasi induktor (L), kapasitor (C), dan resistor (R) yang disusun dalam konfigurasi RLC, biasanya dalam bentuk jaringan filter paralel terhadap sistem. Peran resistor dalam HPDF adalah untuk meredam lonjakan resonansi dan memperluas rentang frekuensi penyaringan, sehingga filter ini mampu mereduksi spektrum harmonisa yang lebih lebar dibandingkan STF.

Menurut El-Habrouk et al., HPDF sangat efektif bila digunakan bersamaan dengan STF, di mana STF menangani harmonisa orde rendah (misal 5, 7), sedangkan HPDF bertugas menangani harmonisa orde tinggi seperti 11, 13, dan seterusnya. Filter ini sering dipasang pada bus yang memiliki dominasi spektrum harmonisa frekuensi tinggi atau di titik-titik yang jauh dari sumber harmonisa langsung.

Beberapa kelebihan dari HPDF antara lain cakupan frekuensi yang lebih luas, kemampuan meredam harmonisa tak terduga, serta sifat pasif yang andal. Namun, kekurangannya adalah kehilangan daya (*power loss*) akibat adanya resistansi, serta potensi pemanasan jika tidak dirancang dengan benar. Oleh karena itu, pemilihan nilai resistor dan kapasitor menjadi aspek penting dalam desain HPDF yang efektif.

E. ETAP sebagai Alat Simulasi Sistem Tenaga

Electric Transient and Analysis Program (ETAP) merupakan suatu perangkat lunak yang mendukung simulasi sistem tenaga listrik. Perangkat ini mampu bekerja dalam keadaan *offline* untuk simulasi tenaga listrik, online untuk pengelohan data *real-time*. Fitur yang terdapat pada *software* ETAP bermacam-macam antara lain fitur yang dapat digunakan untuk menganalisa pembangkit tenaga listrik, sistem transmisi, maupun distribusi tenaga listrik.

Perangkat lunak ETAP ini awalnya dibuat dikembangkan untuk meningkatkan kualitas keamanan fasilitas nuklir di amerika serikat selanjutnya dikembangkan menjadi sistem monitor manajemen energi secara real-time, simulasi kontrol, dan optimasi sistem tenaga listrik dalam bentuk single line diagram secara grafis untuk berbagai bentuk analisis*, load flow* (aliran daya), *short circuit* (hubung singkat), *starting motor, transient stability, optimal capasitor placement, protective device coordination* (koordinasi relay proteksi), sistem harmonisa, dan *cable derating*. Kelengkapan data dari stiap komponen atau peralatan listrik pada sistem dapat mendekati keadaan operasional sebenarnya [18].

Software Electrical Transient Analysis Program (ETAP) digunakan dalam industri atau wilayah untuk merancang dan merencanakan sistem kelistrikan. Penggunaan software ini sangat berguna dalam melakukan berbagai analisis yang mempermudah pekerjaan. Seorang insinyur tenaga listrik harus memiliki kemampuan dalam menggunakan *software* ETAP, mulai dari merancang *Single Line Diagram* hingga menganalisis sistem secara keseluruhan[19].

Beberapa penelitian telah membuktikan kehandalan ETAP dalam studi aliran daya untuk sistem distribusi dan transmisi. Misalnya, studi oleh Pramudito et al. (2020) menunjukkan bahwa ETAP mampu menganalisis dampak integrasi pembangkit energi terbarukan terhadap kestabilan tegangan sistem distribusi. Selain itu, ETAP juga banyak digunakan dalam industri ketenagalistrikan di Indonesia, seperti oleh PLN, IPP, maupun lembaga pendidikan tinggi teknik elektro. Dalam konteks ini, pemanfaatan ETAP pada analisis aliran daya Sirkit 3 Kedinding–Bangkalan menjadi sangat relevan karena memungkinkan pemodelan yang menyerupai kondisi aktual di lapangan[20].

F. Persamaan Penentuan Filter

1. Frekuensi Penentuan Filter
   Frekuensi resonansi dari dilter dapat dihitung dengan rumus :

$$Fr = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (1)$$

   - Fr = Frekuensi Resonansi (Hz)
   - L = induktansi (H)
   - C = kapasitansi (F)
2. Impedansi Filter

$$Z_{Filer} = \sqrt{(\omega L - \frac{1}{\omega C})^2 + R^2} \quad (2)$$

   - $\omega = 2\pi f$
   - R = resistansi (Ohm)
3. Perhitnagan Kapasitansi

$$Q = v^2.\omega C => \text{C} = \frac{Q}{\omega V^2} \quad (3)$$

   - V = tegangan Minimal (Volt)
   - Q = Daya Reaktif (VAR)
4. Perhitungan Impedansi

$$L = \frac{1}{(2\pi \text{fr})^2 C} \quad (4)$$

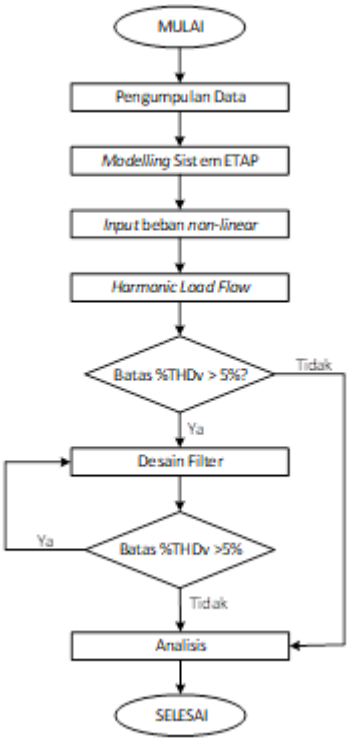
III. METODE PENELITIAN

Simulasi dilakukan menggunakan perangkat lunak ETAP dengan model sistem *smart grid* yang terdiri atas pembangkit, panel surya, beban *non-linear*, 2 VFD (500 kW, 685.9 kVA). Sumber harmonisa utama terletak pada beban *non-linear*, panel surya, dan dua unit VFD. Analisis dilakukan pada kondisi sistem tanpa filter dan setelah pemasangan filter pasif.

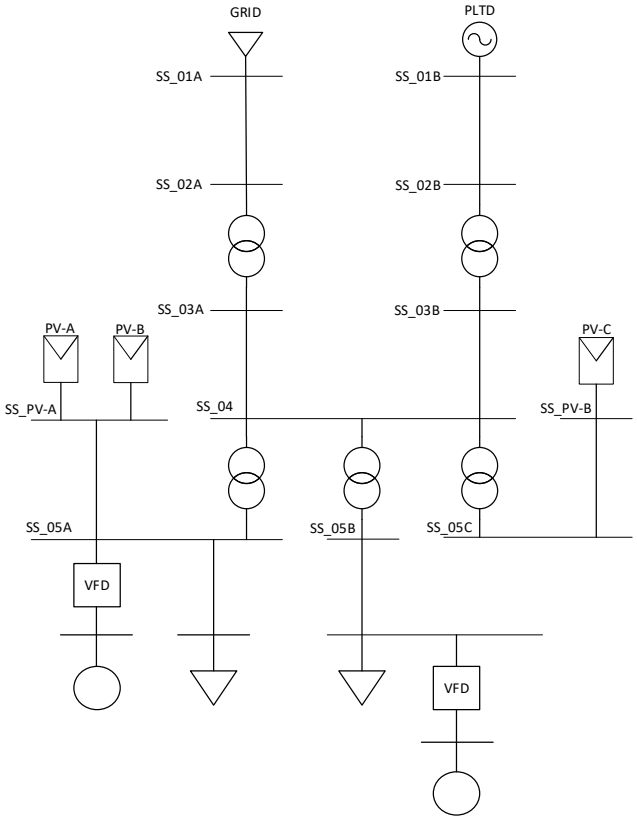
Pengumpulan data harmonik dilakukan untuk mengetahui karakteristik gangguan harmonisa yang dihasilkan oleh beban *non-linear* dalam sistem *smart grid*. Langkah pertama dalam proses ini adalah identifikasi perangkat sumber harmonisa, yaitu inverter panel surya, dua unit *Variable Frequency Drive* (VFD 1 dan VFD 2), serta beban *non-linear* umum lainnya. Perangkat-perangkat ini merupakan sumber harmonik karena menggunakan komponen elektronika daya yang menghasilkan gelombang arus tidak sinusoidal. Flowchart dapat dilihat pada gambar 3

Setelah identifikasi dilakukan, langkah selanjutnya adalah pengaturan parameter harmonik pada masing-masing beban menggunakan fitur *Harmonic Library Editor* pada perangkat lunak ETAP. Setiap perangkat diatur sebagai tipe *Power Electronic* dengan frekuensi dasar sistem 50 Hz. Besar arus fundamental disesuaikan dengan nilai nominal perangkat, atau diasumsikan 100 A jika digunakan pendekatan berbasis persentase harmonik. Selanjutnya, komposisi spektrum harmonik dimasukkan ke dalam ETAP berdasarkan referensi standar IEEE 519-2022 dan data harmonisa tipikal perangkat elektronik daya. Misalnya, VFD 1 memiliki kandungan harmonik dominan pada orde ke-5 sebesar 20%, orde ke-7 sebesar 5%, serta harmonik orde tinggi lainnya seperti orde ke-11 dan ke-13.

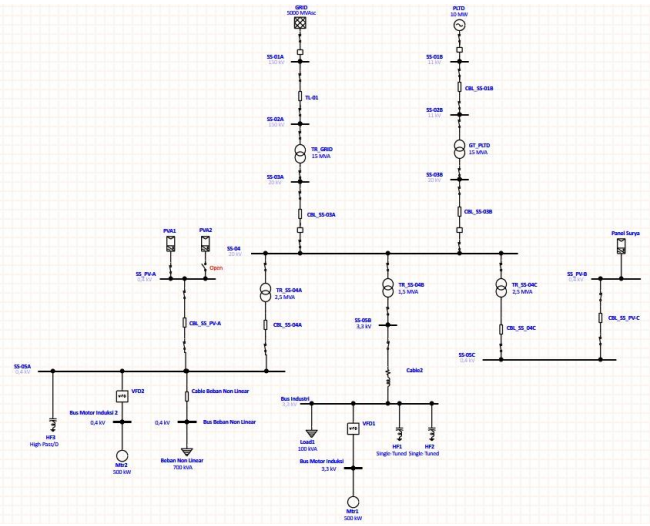
Proses ini diulang untuk semua sumber harmonisa. Hasil input berupa spektrum harmonik masing-masing perangkat kemudian digunakan sebagai data dasar dalam simulasi penyebaran harmonisa dan perancangan filter mitigasi. Validasi dilakukan melalui tampilan bentuk gelombang (*waveform*) dan spektrum harmonik pada antarmuka ETAP, guna memastikan bahwa input harmonik sesuai dengan karakteristik teoritis dan kondisi sistem aktual. Data ini juga digunakan dalam penentuan lokasi strategis pemasangan filter pasif serta dalam evaluasi efektivitas solusi mitigasi yang dirancang. Single laine diagram sistem dapat dilihat pada gambar 4 dan 5.



Gambar 3. Flowchart penentuan filter harmonisa.



Gambar 4. Single line diagram *smart grid*.



Gambar 5. *Single line diagram* pada software ETAP.

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

Simulasi dilakukan untuk menganalisis penyebaran harmonisa pada sistem *smart grid*, baik sebelum maupun sesudah pemasangan filter pasif. Dua jenis filter digunakan, yaitu dua *single tuned filter* yang ditempatkan pada bus industri, serta satu *high-pass damped* filter yang dipasang pada bus SS-05A. Parameter utama yang diamati adalah nilai *Total Harmonic Distortion* (THD) arus pada berbagai titik bus sistem. Berikut merupakan tabel profil untuk beban yang terdistorsi oleh harmonisa pada sistem *smart grid*, yaitu beban *non-linear*, panel surya, dan 2 unit VFD dapat dilihat pada Tabel 2 hingga Tabel 5.

Table 2. Profil beban nonlinear.

P	**Q**	**PF**
630 kW	305,1 kVAr	90%
PROFIL HARMONISA BEBAN		
Order	**Hz**	**Mag(%)**
1	50	100
11	550	9
13	650	1,2
23	1150	1,4
25	1250	1,5
36	1750	7

Tabel 3. Profil beban

P	**Q**	**PF**
500 kW	472,3 Kvar	75%
PROFIL HARMONISA BEBAN		
Order	**Hz**	**Mag(%)**
1	50	100
5	250	2
7	350	3
11	550	3
13	650	2
17	850	4
19	950	7
23	1150	10
25	1250	8
29	1450	1
31	1550	1

Tabel 4. Profil beban VFD1.

P	**Q**	**PF**
500 KW	300 Kvar	75%
PROFIL HARMONISA BEBAN		
Order	**Hz**	**Mag(%)**
1	50	100
5	250	20
7	350	5
11	550	20
13	650	7

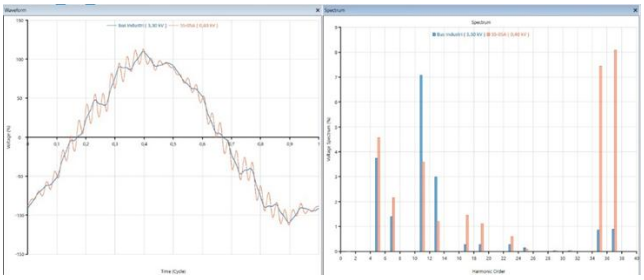
Tabel 5. Profil beban VFD2.

P	Q	PF
500 KW	300 Kvar	75%
PROFIL HARMONISA BEBAN		
Order	**Hz**	**Mag(%)**
1	50	100
5	250	42
7	350	14,3
11	550	7,9
13	650	3,2
17	850	3,7
19	950	2,3
23	1150	2,3
25	1250	1,4

Perbandingan nilai THD arus sebelum dan sesudah pemasangan filter pasif dapat dilihat pada Tabel 6, gambar 2 dan gambar 3.

Tabel 6. Hasil simulasi sebelum dan setelah penempatan filter.

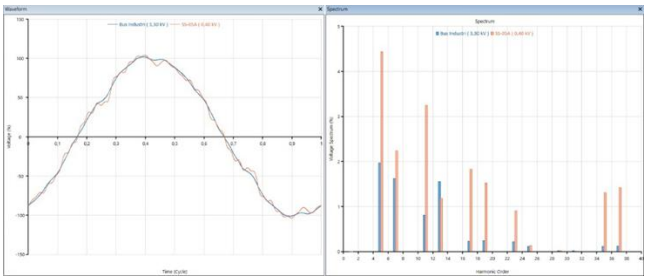
Bus	THD Sebelum (%)	THD Sesudah (%)
SS-01A	0,063	0,038
SS-01B	1,55	0,928
SS-02A	0,068	0,042
SS-02B	1,55	0,929
SS-03A	2,24	1,34
SS-03B	2,24	1,34
SS-04	2,24	1,34
SS-05A	12,81	6,83
SS-05B	8,69	3,10
SS-05C	3,25	2,74
SS_PV-A	12,80	6,83
SS_PV-B	3,28	2,74
Bus Industri	8,70	3,10
Bus Beban Non Linear	12,93	6,86



Gambar 2. Profil tegangan sebelum pemasangan filter.

Gambar 2 merepresentasikan kondisi kualitas daya listrik pada dua titik sistem, yaitu di Bus Industri (13,80 kV) dan SS-05A (0,40 kV)**.** Grafik pertama menunjukkan bentuk gelombang tegangan (*waveform*), sedangkan grafik kedua menampilkan spektrum harmonik dari tegangan tersebut.

Pada grafik *waveform* di sisi kiri, terlihat bahwa bentuk gelombang dari Bus Industri dan SS-05A secara umum mengikuti pola sinusoidal. Namun, terdapat perbedaan mencolok dalam hal kehalusan bentuk gelombang. Gelombang pada SS-S05A tampak lebih bergerigi atau terdapat gangguan kecil yang menandakan adanya komponen harmonik. Distorsi ini mengindikasikan bahwa tegangan pada SS-05A telah terpengaruh oleh beban *non-linear* atau gangguan sistem, sehingga bentuk gelombangnya menyimpang dari sinusoidal ideal.



Gambar 3. Profil tegangan setelah pemasangan filter.

Pada grafik pertama, ditampilkan bentuk gelombang tegangan terhadap waktu. Secara umum, baik Bus Industri maupun SS-05A menunjukkan bentuk gelombang yang menyerupai sinusoidal. Namun, gelombang pada SS-05A tampak lebih mengalami penyimpangan, terutama di sekitar puncak dan sisi menurun gelombang. Penyimpangan ini menunjukkan adanya komponen harmonik dalam tegangan yang menyebabkan bentuk gelombang tidak ideal atau terdistorsi.

Sementara itu, grafik kedua menunjukkan spektrum harmonik tegangan pada kedua titik sistem. Dari grafik ini terlihat bahwa tegangan pada SS-05A mengandung komponen harmonik yang lebih tinggi, terutama pada harmonik orde ke-5, ke-7, dan ke-11, serta beberapa harmonik tinggi lainnya seperti ke-23 dan ke-29. Tegangan harmonik pada SS-05A bahkan melebihi 4% pada harmonik ke-5, yang menandakan tingginya distorsi harmonik di sisi tegangan rendah. Sebaliknya, Bus Industri memiliki kandungan harmonik yang lebih rendah dan lebih terkendali.

Tingginya kandungan harmonik di SS-05A kemungkinan besar berasal dari penggunaan beban non-linear, seperti inverter, *rectifier*, atau peralatan elektronik industri lainnya yang umum digunakan pada sisi tegangan rendah. Hal ini berdampak pada penurunan kualitas daya listrik, dan dapat menyebabkan masalah teknis seperti *overheating* pada *transformator*, kesalahan pengukuran energi, penurunan efisiensi sistem, hingga gangguan operasional peralatan.

Dari data di atas, terlihat bahwa nilai THD arus pada seluruh titik bus mengalami penurunan setelah pemasangan filter pasif. Penurunan paling signifikan terjadi pada bus SS-

05A, bus beban *non-linear*, dan SS_PV-A, yang merupakan titik-titik utama penyumbang harmonisa. THD arus pada SS-05A turun dari 12,81% menjadi 6,83%, sementara di bus beban *non-linear* turun dari 12,93% menjadi 6,86%, dan di SS_PV-A dari 12,80% menjadi 6,83%.

Penurunan ini mengindikasikan bahwa penempatan high-pass damped filter pada SS-05A sangat efektif dalam mereduksi harmonisa frekuensi tinggi yang menyebar dari arah beban *non-linear* dan inverter panel surya. Sementara itu, dua single tuned filter yang dipasang pada bus industri berhasil mereduksi harmonisa dominan orde ke-5 dan ke-7 yang berasal dari peralatan VFD. THD arus pada bus industri turun dari 8,7% menjadi 3,1%, yang juga berdampak pada penurunan THD di bus-bus sekitarnya seperti SS-05B dan SS-05C.

Nilai THD pada bus lainnya juga mengalami penurunan moderat, meskipun tidak setinggi bus utama. Hal ini menunjukkan bahwa harmonisa dalam sistem smart grid menyebar ke seluruh jaringan, dan strategi penempatan filter berdasarkan analisis spektrum harmonisa sangat penting untuk mencapai efisiensi maksimal dalam peredaman.

V. KESIMPULAN

Penelitian ini menunjukkan bahwa penyebaran harmonisa dalam sistem *smart grid* sangat dipengaruhi oleh keberadaan beban *non-linear* seperti VFD, inverter panel surya, dan perangkat elektronik lainnya. Nilai *Total Harmonic Distortion* (THD) arus pada beberapa titik bus utama, khususnya SS-05A, bus industri, dan bus beban *non-linear*, melebihi ambang batas standar IEEE 519 sebelum dilakukan mitigasi. Untuk mengatasi hal tersebut, diterapkan dua jenis filter pasif, yaitu *single tuned filter* dan *high-pass damped filter*. Filter *single tuned* pertama berukuran 29,5 kVAR, filter *single tuned* kedua sebesar 50,49 kVAR, dan *high-pass damped* filter memiliki kapasitas 19,33 kVAR. Hasil simulasi menunjukkan bahwa nilai THD arus tertinggi sebelum pemasangan filter terjadi pada bus beban *non-linear* dan SS-05A, masing-masing sebesar 12,93% dan 12,81%. Setelah pemasangan filter, nilai tersebut berhasil ditekan menjadi 6,86% dan 6,83%. Penempatan dua single tuned filter pada bus industri secara efektif mereduksi harmonisa orde rendah (orde ke-5 dan ke-7), sementara satu high-pass damped filter yang dipasang di bus SS-05A berfungsi optimal dalam menyerap harmonisa orde tinggi. Secara keseluruhan, sistem mengalami penurunan rata-rata THD arus sebesar 46,3%, sehingga strategi penempatan dan kombinasi filter pasif yang tepat sangat penting dalam meningkatkan kualitas daya pada sistem *smart grid*. Penggunaan perangkat lunak ETAP sebagai alat bantu simulasi terbukti memudahkan dalam menganalisis penyebaran harmonisa dan menentukan lokasi optimal pemasangan filter.

DAFTAR ACUAN

[1] G. T. Heydt, "The next generation of power distribution systems," IEEE Trans. Smart Grid, vol. 1, no. 3, pp. 225–235, Dec. 2010.

[2] M. H. J. Bollen, Understanding Power Quality Problems: Voltage Sags and Interruptions. Piscataway, NJ, USA: IEEE Press, 2000.

[3] J. Arrillaga and N. R. Watson, Power System Harmonics, 2nd ed. Chichester, U.K.: Wiley, 2003.

[4] R. C. Dugan, M. F. McGranaghan, S. Santoso, and H. W. Beaty, Electrical Power Systems Quality, 3rd ed. New York, NY, USA: McGraw-Hill, 2012.

[5] P. Pillay and M. Manyage, "Definitions of voltage unbalance," IEEE Power Eng. Rev., vol. 21, no. 5, pp. 49–51, May 2001.

[6] A. El-Saadany and E. El-Saadany, "A new passive filter design for power quality improvement," in Proc. IEEE Power Energy Soc. Gen. Meeting, 2005, pp. 1454–1459.

[7] M. George and R. K. Singh, "Design and analysis of passive filters for harmonics mitigation in industrial power system," IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 62, no. 1, pp. 313–320, Jan. 2015.

[8] S. A. Soliman and A. M. Al-Kandari, Harmonic Modeling and Simulation of Power Systems in MATLAB/Simulink. New York, NY, USA: Springer, 2011.

[9] D. A. N. Farizi, I. G. N. S. Hernanda, and I. M. Y. Negara, "Analisis harmonisa dan rancang filter single tuned pada transformator 1250 kVA di PT. Industri Kereta Api (Persero)," Tugas Akhir, Dept. Tek. Elektro, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS), Surabaya, Indonesia, 2024.

[10] Comsys, "Power quality – IEEE 519-2022," Comsys, 2022.

[11] J. C. E. Rondowuwu, "Analisis perbandingan penerapan filter pasif dan filter aktif untuk mengurangi nilai harmonisa arus pada sisi tegangan rendah boiler plant PT. Multimas Nabati Asahan Serang," Tugas Akhir, Univ. Mercu Buana, Jakarta, Indonesia, 2023.

[12] F. M. Noor and A. F. Rahman, "Studi penerapan integrasi sumber energi baru terbarukan dengan smart grid dan sistem pengendalian SCADA," in Proc. 14th Industrial Research Workshop and National Seminar (IRWNS), Bandung, Indonesia, Jul. 2023.

[13] D. S. Abdullah, "Apa keuntungan teknologi smart grid dalam operasi sistem tenaga listrik," 2021.

[14] H. B. Utomo and M. Rafita, "Perancangan filter pasif untuk mengurangi kandungan arus harmonisa pada transformator daya berbasis Simulink," in Proc. 12th Industrial Research Workshop and National Seminar (IRWNS), Bandung, Indonesia, Aug. 2021.

[15] Safiudin, T. Suheta, and N. Patria, "Analisa dan rancang single tuned passive filter untuk mereduksi harmonisa dari dampak penggunaan variable frequency drive (VFD)," in Proc. Seminar Nasional Sains dan Teknologi Terapan X, 2022.

[16] N. J. Alfama, "Analisis harmonik dan perancangan single tuned filter pada sistem distribusi standar IEEE 18 bus dengan menggunakan software ETAP Power Station 4.0," Eng. Division, PT. Wijaya Karya Rekayasa Konstruksi, vol. 15, no. 2, 2022.

[17] M. Al, Atmam, and E. Zondra, "Analisis harmonisa menggunakan filter pasif pada VSD dengan beban motor electrical submersible pump di PT. CPI," Jurnal Teknik, Univ. Lancang Kuning, vol. 15, no. 1, Apr. 2021.

[18] A. Nizar, "Analisis rugi daya menggunakan ETAP pada jaringan distribusi 20kV Penyulang Bagong," Fak. Teknik, Univ. Negeri Surabaya, vol. 10, no. 1, 2021.

[19] R. Syadidan and U. Latifa, "Analisa aliran beban sistem tenaga listrik pada power plant Ambon menggunakan ETAP 19.1," Program Studi Tek. Elektro S1, Univ. Singaperbangsa Karawang, vol. 7, no. 2, Apr. 2023.

[20] A. Kiswantono, "Integrasi simulasi untuk analisis aliran daya sirkit transmisi Kedinding–Bangkalan," Jurnal Inter Tech, vol. 3, no. 1, May 2025.