Harmonic Assessment Mempertimbangkan Kapasitas dan Penempatan Fotovoltaik Melalui Metode *Symbiotic Organism Search (SOS)* di Sistem Distribusi Bawean

Mario Dwi Prasetyo[1], Dedet Candra Riawan[2], Ontoseno Penangsang[3]

[1,2,3] Departemen Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Elektro dan Informatika Cerdas, Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Jl. Teknik Kimia, Keputih, Kecamatan Sukolilo, Surabaya, Jawa Timur , 60111, Indonesia
marioprasetyo.19071@mhs.its.ac.id[1], dedet.riawan@ee.its.ac.id [2], ontosenop@ee.its.ac.id[3]

Intisari— **Dalam Rencana Usaha Penyediaan Tenaga Listrik (RUPTL) PT PLN 2021-2030 akan dibangun PLTS dengan kapasitas 5 MW di Pulau Bawean pada tahun 2024. Dalam instalasi sistem PV *grid tied* perlu diperhatikan pemilihan tempat dan kapasitas optimal untuk mengurangi losses sistem. Namun, implementasi PV *grid tied* berpotensi menghasilkan distorsi harmonik akibat penggunaan inverter. Penelitian ini berkontribusi dengan melakukan optimasi dengan *Symbiotic Organism Search (SOS)* untuk menentukan lokasi dan kapasitas optimum pemasangan PV di Pulau Bawean. Hasil yang diperoleh dilakukan *assessment* harmonisa secara simulasi menggunakan software ETAP Power Station untuk mengetahui dampaknya ke sistem. Simulasi akan dilakukan dengan manufaktur inverter yang dioperasikan pada faktor daya 1 dan 0,85. Penentuan kapasitas dan lokasi optimum PV diperoleh sebesar 300kW di Penyulang Kota serta 250kW dan 350kW di Penyulang Sangkapura. Hasil yang diperoleh mampu meningkatkan tegangan rata-rata sistem dari 94,9% menjadi 95,9% serta mengurangi rugi-rugi daya dari 187kW menjadi 169kW. Semakin tinggi iradiasi, THDi pada sistem semakin tinggi dan sebaliknya pada sisi saluran yang terhubung langsung ke inverter akan semakin rendah. Nilai THDi di sistem Bawean masih di bawah standar IEEE 519 2014 dengan nilai batas aman adalah 15% kecuali THDi pada saluran output inverter masih melebihi standar IEEE 519 2014 dengan batas 5%. THDv sistem memiliki nilai yang masih di bawah standar IEEE 519 2014 yaitu kurang dari 8% untuk tegangan rendah dan kurang dari 5% untuk tegangan menengah. Pengoperasian inverter dengan faktor daya 0,85 lebih baik dalam memperbaiki tegangan dan mengurangi rugi-rugi jaringan namun menghasilkan distorsi harmonik lebih besar daripada pengoperasian faktor daya 1.**

Keywords— **Faktor Daya, Inverter, *Symbiotic Organism Search (SOS)*, THDi, THDv.**

I. PENDAHULUAN

Rencana Usaha Penyediaan Tenaga Listrik (RUPTL) PT PLN (Persero) 2021-2030 direncanakan dibangun PLTS dengan kapasitas 5 MWp di Pulau Bawean pada tahun 2024 [1]. Dalam penerapan sistem fotovoltaik atau PV terdapat dua mode instalasi yaitu *islanding/ standalone* dan *grid tied* [2]. *Islanding mode* cocok diterapkan jika kondisi iklim selalu mendapatkan sinar matahari yang lebih banyak namun tidak bisa kontinyu untuk membangkitkan daya maksimum karena masih bergantung pada cuaca. Untuk mendapatkan daya maksimum secara kontinyu, maka sistem harus terhubung pada baterai yang memiliki harga mahal dengan kapasitas besar [3]. Sedangkan pada sistem *grid-tied*, dihasilkan daya DC yang dipasok ke jaringan AC tanpa peralatan penyimpanan energi sehingga menambahkan keuntungan lebih baik dibandingkan dengan sistem *standalone* [4].

Dalam instalasi sistem PV *grid tied* perlu memperhatikan pemilihan tempat dan kapasitas paling optimal untuk memaksimalkan manfaat teknis dan ekonomis seperti mengurangi *losses* serta meningkatkan keandalan sistem dengan perbaikan kualitas daya dan profil tegangan [5]. Metode-metode *metaheuristic* pernah dibandingkan untuk penempatan dan penentuan kapasitas DG menggunakan 26 *benchmark function.* Hasil menunjukkan bahwa *genetic algorithm* memiliki konvergensi yang paling buruk karena konvergen hanya 10 dari 26 *benchmark function. Particle Swarm Optimization, Differential Evolution,* dan *Bees Algorithm* masing-masing konvergen pada 17, 18, dan 19 *benchmark function.* Sementara, *Symbiotic Organism Search* mampu konvergen di 23 dari 26 *benchmark function* [6].

Dalam mode operasi PV menggunakan sistem *grid-tied* perlu inverter yang memiliki peranan penting sebagai fungsi kontrol seperti *maximum power point tracking*, *anti-islanding*, *grid fault detection*, dan sebagainya [7]. Namun, akibat intermittensi energi dan karakteristik dari manufaktur inverter yang digunakan dalam sistem PV dapat menyebabkan dampak negatif pada jaringan, seperti kegagalan koordinasi proteksi, rugi-rugi konduktor yang tinggi, fluktuasi tegangan, dan distorsi harmonik [8]. Distorsi harmonik yang dihasilkan oleh inverter menjadi masalah yang serius dalam pengaplikasian energi baru terbarukan karena mengakibatkan penetrasi pada sistem yang tidak optimal [9]. Harmonisa memberikan dampak pada jaringan distribusi seperti peningkatan rugi-rugi akibat pemanasan hingga berkurangnya umur isolasi [10]. Berdasarkan pengaturan tegangan oleh standar Jerman VDE-AR-N 4105, inverter harus menyediakan kemampuan daya reaktif pada beban [11]. Penelitian terdahulu telah membahas mengenai operasi inverter pada jaringan tegangan rendah dan *assessment* kualitas daya inverter pada PV. Penelitian sebelumnya membahas *assessment* harmonisa pada jaringan

tegangan rendah di Gedung Electronic Research Institute, Kairo. Penelitian tersebut dilakukan dengan melakukan pengambilan data langsung dalam jangka waktu yang telah ditentukan, kemudian dibandingkan melalui analisis matematis faktor daya dan THD [7].

Penelitian ini berkontribusi dengan melakukan optimasi menggunakan metode *Symbiotic Organism Search (SOS)* untuk menentukan lokasi dan kapasitas optimum pemasangan PV di Pulau Bawean. Selanjutnya dari hasil penentuan lokasi dan kapasitas terbaik dilakukan *assessment* harmonisa pada jaringan secara simulasi menggunakan *software* ETAP Power Station untuk mengetahui dampak distorsi harmonik. Harmonisa yang ada pada sistem akan dimodelkan sehingga dapat diketahui bagaimana kondisi distorsi disetiap intermittensi dari PV. Hasil penelitian ini dapat digunakan untuk memberikan rekomendasi tempat dan kapasitas optimal dan menganalisis dampak rugi harmonisa pada sistem terintegrasi PV dengan mode operasi inverter di setiap perubahan irradiasi.

II. TINJAUAN PUSTAKA

A. Symbiotic Organism Search (SOS)

Symbiotic Organism Search (SOS) merupakan algoritma yang termotivasi dari hubungan simbiosis makhluk hidup dalam sebuah ekosistem. Simbiosis yang paling umum terjadi dalam sebuah ekosistem adalah simbiosis mutualisme, komensalisme dan parasitisme [12]. Berikut adalah penjelasan dari masing-masing simbiosis yang ada.

a. Fase Mutualisme

Merupakan tipe dari hubungan simbiosis antara makhluk hidup yang saling menguntungkan satu sama lain [13]. Apabila hubungan antara dua organisme direpresentasikan sebagai X_i dan X_j. Hubungan antara organisme pada fase mutualisme ini diformulasikan sebagaimana Persamaan 1 dan 2 [6].

$$X_{i_new} = X_i + rand(0,1) \times X_{best} - \mu \times bf_1 \quad (1)$$

$$X_{j_new} = X_j + rand(0,1) \times X_{best} - \mu \times bf_2 \quad (2)$$

i dan *j* merupakan bilangan bulat 1, 2, 3, …, dimana $i \neq j$. X_{best} merupakan organisme dengan fitness terbaik di ekosistem. μ adalah mutual vektor dengan pendefinisannya sebagaimana Persamaan 3.

$$\mu = \frac{X_i + X_j}{2} \quad (3)$$

Sementara itu, nilai bf_1 dan bf_2 merupakan faktor ketepatan yang menggambarkan manfaat yang dapat diambil dari organisme atas hasil dari sebuah interaksi dengan nilai bilangan bulat acak (0,1).

$$bf_1 = 1 + round[rand(0,1)] \quad (4)$$

$$bf_2 = 1 + round[rand(0,1)] \quad (5)$$

b. Fase Komensalisme

Fase komensalisme adalah hubungan antara dua makhluk hidup dimana satu organisme diuntungkan sedangkan satu lainnya tidak dirugikan. Dalam fase komensalisme, organisme X_j juga dipilih secara acak dari ekosistem dengan $X_j \neq X_i$ untuk berhubungan dengan organisme X_i. Dari interaksi tersebut, organisme X_i berusaha mendapatkan keuntungan, namun organisme X_j tidak diuntungkan atau dirugikan dari hubungan tersebut [14]. Interaksi antara X_i dan X_j ditunjukkan sebagaimana Persamaan 6.

$$X_{i_new} = X_i + rand(-1,1) \times X_{best} - X_j \quad (6)$$

X_{i_new} merupakan organisme baru jika nilai fitnesnya lebih baik dari organisme sebelumnya.

c. Fase Parasitisme

Fase parasitisme adalah hubungan antara dua makhluk hidup dimana satu organisme diuntungkan sedangkan organisme lainnya dirugikan [13]. Vektor parasitisme (P_V) yang dibentuk dari kloning organisme X_i sebagai fungsi parasit menggunakan bilangan acak. Sementara, X_j merupakan organisme yang dipilih secara acak dari ekosistem. Jika nilai fitness vektor parasite lebih tinggi dari X_j maka X_j akan digantikan oleh vektor parasite [6].

B. Harmonisa

Harmonisa merupakan tegangan atau arus sinusoidal dengan frekuensi yang memiliki distorsi akibat gelombang frekuensi kelipatan integer dari frekuensi fundamentalnya. *Output* tegangan dari peralatan elektronika daya terutama inverter seharusnya berbentuk sinusoidal, namun pada praktiknya luaran tegangan berbentuk tidak sinusoidal murni karena mengandung harmonisa [15]. Besarnya nilai distorsi gelombang akibat harmonisa ditentukan sebagaimana Persamaan 7 dan Persamaan 8 [16].

$$THD_v = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{n\,max} V_n^2}}{V_1} \quad (7)$$

$$THD_I = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{n\,max} I_n^2}}{I_1} \quad (8)$$

Dimana V_1, I_1 adalah nilai dari fundamental harmonik dari arus dan tegangan. Sedangkan V_n dan I_n adalah nilai dari non-fundamental dari harmonik arus dan tegangan. Menurut standar IEEE 519-2014 batas aman untuk harmonisa tegangan ditunjukkan sebagaimana Tabel 1.

TABEL 1.
STANDAR HARMONISA TEGANGAN IEEE 519-2014

Tegangan pada PCC	***Individual Harmonic (%)***	**THD_V (%)**
V ≤ 1.0 kV	5,0	8,0
1kV < V ≤ 68 kV	3,0	5,0
69kV<V ≤161kV	1,5	2,5
161kV < V	1,0	1,5

Dalam kasus gelombang arus terdistorsi, standar IEEE 519-1992 yang saat ini diperbarui menjadi IEEE 519-2014 merekomendasikan parameter batas harmonisa arus merujuk pada THDi pada arus beban penuh (I_L) daripada sampel arus fundamental. Parameter ini disebut dengan *Total Demand*

Distortion (TDD) yang direpresentasikan sebagaimana Persamaan 9.

$$TDD = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{n_{max}} I_n^2}}{I_L} = \frac{\sqrt{I_{2,rms}^2 + I_{3,rms}^2 + \ldots + I_{n_{max}\,rms}^2}}{I_L} \quad (9)$$

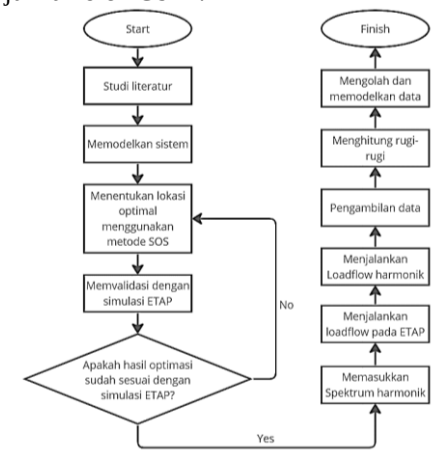
Standar yang digunakan sebagai batas aman harmonisa arus sesuai dengan standar IEEE 519-2014 ditunjukkan sebagaimana Tabel 2. I_{sc} merupakan arus hubung singkat maksimum dan I_L merupakan arus yang mengalir ke beban. Dimana pada setiap saluran yang terhubung langsung pada pembangkit tidak memerlukan analisis I_{sc} dan I_L dengan batas TDD sebesar 5%.

TABEL 2.
STANDAR HARMONISA ARUS IEEE 519-2014 UNTUK TEGANGAN 120V-69KV

***Individual Harmonic Order* (Harmonisa Ganjil)**						
I_{sc}/I_L	**3≤ n<11**	**11≤ n<17**	**17≤ n<23**	**23≤ n<35**	**35≤ n<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

III. METODOLOGI PENELITIAN

Pelaksanaan penelitian ini mengikuti alur sebagaimana yang ditunjukkan oleh Gbr 1.



Gbr 1. Alur Pelaksanaan Penelitian

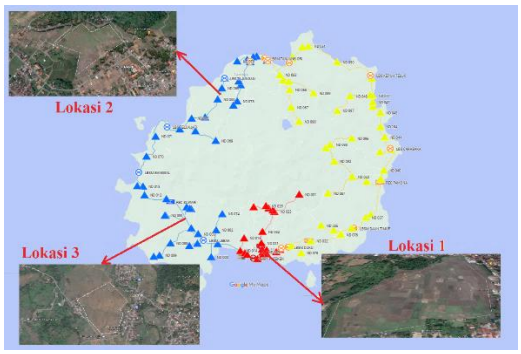
A. *Pemodelan Sistem*

Sistem ini terdiri dari 5 unit pembangkit konvensional yang menyuplai ke sistem yaitu PLTMG 3x1MW dan beberapa jenis PLTD dengan kapasitas 7,2 MW [17]. Pembangkit yang diprioritaskan untuk beroperasi adalah pembangkit beban dasar (*base load)* yaitu PLTMG 3x1 MW dan PLTD 2,1 MW. Beban yang akan dimodelkan pada Sistem Bawean ini adalah beban puncak pada siang hari di Tahun 2022. Beban puncak siang hari pada tahun 2022 sebesar 4650 kW [18].

B. *Penentuan Lokasi*

Terdapat tiga tempat atau area yang memiliki kapasitas luas lahan bisa untuk dilakukan pembangunan PLTS. Berikut ini adalah lokasi-lokasi yang berpotensi untuk pembangunan.

a. Lokasi 1. Diletakkan di daerah kota dengan luas wilayah 13,85 hektar. Lokasi pada *SLD* di Busbar0025.
b. Lokasi 2. Diletakkan di Kecamatan Tambak dengan luas wilayah 6,93 hektar. Lokasi pada *SLD* di Busbar0356.
c. Lokasi 3. Diletakkan di Kecamatan Sangkapura dengan luas wilayah 10,46 hektar. Lokasi pada *SLD* di Busbar0316.



Gbr 2. Denah Lokasi Penempatan PV

Algoritma SOS digunakan untuk menentukan lokasi dan kapasitas optimal pemasangan PV. Fungsi objektif dari optimasi ini adalah untuk meminimalkan rugi-rugi daya sebagaimana Persamaan 10. Hal ini dikarenakan pada sistem distribusi, rugi-rugi daya sangat bergantung pada resistansi dan arus pada jaringan [6].

$$F = min\,(\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=2}^{n} I_{ij}^2\, R_{ij}) \quad (10)$$

Fungsi objektif pada Persamaan 10 di atas harus memenuhi batasan sebagai berikut.

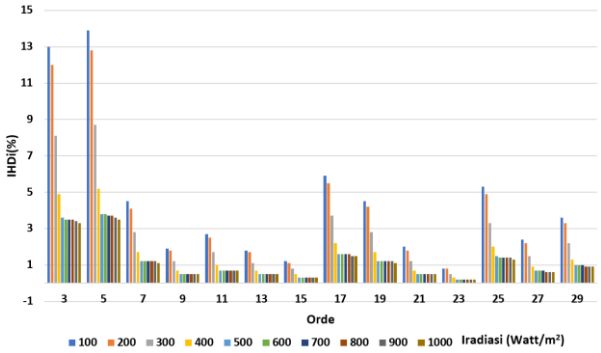
a. Jumlah dari PV (N_{PV}) harus kurang atau sama dengan dari jumlah PV ($N_{PV\ max}$). Dimana dalam hal ini jumlah PV yang diatur adalah tiga pilihan lokasi.
$$N_{PV} \leq N_{PV\ max} \quad (11)$$
b. Daya aktif atau kapasitas dari PV (P_{PV}) dibatasi oleh kapasitas PV minimum ($P_{PV\ min}$) dan kapasitas maksimum ($P_{PV\ max}$). Beban puncak siang hari pada sistem adalah 4650kW. PLTS *on grid* beroperasi dengan beban maksimal 20% dari beban sistem di siang hari [19]. Oleh karena itu, kapasitas maksimal PV yang boleh terinstalasi adalah 933kW.
$$P_{PV\ min} \leq P_{PV} \leq P_{PV\ max} \quad (12)$$
c. Total daya yang dibangkitkan oleh pembangkit eksisting (P_G) dan daya yang dibangkitkan oleh PV (P_{PV}) harus menyuplai dari permintaan beban (P_L) dan rugi-rugi daya (P_{loss}).
$$P_G + P_{PV} = P_L + P_{loss} \quad (13)$$
d. Tegangan pada setiap bus *i* (V_i) dibatasi oleh tegangan minimum ($V_{i\ min}$) dan tegangan maksimum ($V_{i\ max}$). Batasan yang dianjurkan ini dibatasi oleh syarat minimum susut tegangan dan kenaikan tegangan disesuaikan dengan standar PLN yaitu -10% dan +10%.
$$V_{i\,min} \leq V_i \leq V_{i\,max} \quad (14)$$

C. *Harmonic Load Flow*

Studi aliran daya ini dilakukan pada software ETAP Power Station. Dalam melakukan studi aliran daya dilakukan dengan mengatur di setiap variabel sebagai berikut:

a. Iradiasi matahari pada PV diatur dari 300 Watt/m^2 sampai dengan 1000 Watt/m^2 berubah setiap 100 Watt/m^2.
b. Inverter diatur dengan faktor daya 1 dan 0,85 disesuaikan dengan beban sistem yang menggunakan faktor daya 0,85.

Untuk menjalankan simulasi *harmonic load flow* perlu untuk memasukkan *datasheet* spektrum harmonik. Oleh karena sumber dari harmonisa pada penelitian ini adalah inverter maka perlu memasukkan model spektrum harmonik yang diakibatkan oleh inverter. Tipikal spektrum harmonik yang dihasilkan pada inverter 100kW sebesar 6,27% [20]. Gbr 3 merupakan spektrum harmonik yang digunakan dalam penelitian ini.



Gbr 3. Spektrum Harmonik

Spektrum harmonik pada MATLAB menggunakan model matematika. Parameter yang disimulasikan adalah hubungan antara THDi dengan daya relatif [7]. Daya relatif adalah rasio antara daya aktual dari luaran inverter pada iradiasi tertentu dengan kapasitas daya maksimum pada rating inverter. Persamaan yang digunakan pada pemodelan matematis ini ditunjukkan sebagaimana Persamaan 15.

$$THDi = T_0.exp\left(-T_1\left(\frac{P_{ac}}{P_{nom}}\right)\right) + T_2.exp\left(-T_3\left(\frac{P_{ac}}{P_{nom}}\right)\right) \quad (15)$$

IV. Hasil dan Pembahasan

A. *Penempatan dan Kapasitas PV*

Pada simulasi menggunakan *Symbiotic Organism Search* untuk menentukan lokasi dengan kapasitas PV optimal di Pulau Bawean, diperoleh hasil sebagaimana yang terlihat pada Tabel 3. Data tersebut dibandingkan dengan simulasi di ETAP sebelum dan sesudah dipasang PV untuk memvalidasi rugi-rugi dan tegangannya pada *unity power factor* sebagaimana Tabel 4.

TABEL 3.
LOKASI DAN KAPASITAS PV

Lokasi	Kapasitas (kW)	Kapasitas Pembulatan (kW)
1	292,5	300
2	351,1	350
3	255,6	250
Total	899,1	900

TABEL 4.
PERBANDINGAN PARAMETER RUGI-RUGI DAN TEGANGAN

Skenario Simulasi	*Power Losses* (kW)	Tegangan Rata-Rata (pu)	Tegangan Maksimum (pu)	Tegangan Minimum (pu)
ETAP sebelum pemasangan PV	187	0,949	1	0,901
MATLAB setelah pemasangan PV	171	0,959	1	0,9016
ETAP setelah pemasangan PV	169	0,952	1	0,9024

Kapasitas inverter dipilih sesuai dengan kapasitas PV-nya. Dimana kapasitas inverter harus pada rentang 0,9-1,25 dari daya yang dihasilkan modul panel surya sehingga aman digunakan dan tidak terjadi inefisiensi [21]. Manufaktur inverter yang digunakan pada pemodelan ini dipilih berdasarkan data *top tier inverter* pada tahun 2021 dan ketersediaan *library* pada *software PVsyst*. Oleh karena inverter dioperasikan pada PF=0,85 dibatasi operasinya antara 80-90% dan PF=1 bisa dioperasikan hingga 100%.

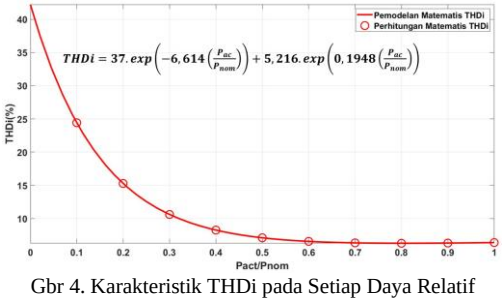
B. *Karakteristik Output Inverter dan Dampak ke Sistem*

Berdasarkan Tabel 5 diperoleh koefisien-koefisien persamaan matematis sebagaimana yang ditunjukkan pada Persamaan 15. Gbr 4 merupakan hasil yang diperoleh dari *curve fitting* karakteristik spektrum harmonik inverter.

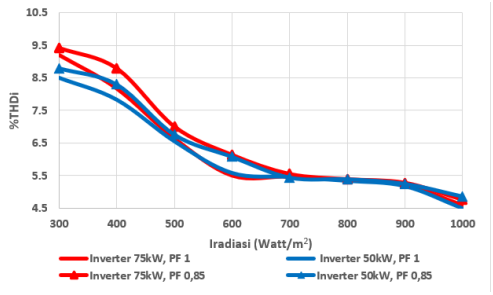
TABEL 5.
KOEFISIEN THDi PADA SPEKTRUM KARAKTERISTIK HARMONIK

Koefisien	THD_i
T_0	37
T_1	6,614
T_2	5,216
T_3	-0,1948
R-square	0,9992

Data-data koefisien yang diperoleh, memiliki nilai *R-square* mendekati satu yang mengindikasikan bahwa nilai yang diperoleh akurat atau mendekati data sebenarnya. Untuk membuktikannya, maka dilakukan perhitungan sebagaimana yang telah dilakukan pada faktor daya yaitu menghitung nilai daya relatif mulai dari 0,1 sampai dengan 1 ke persamaan yang telah diperoleh.

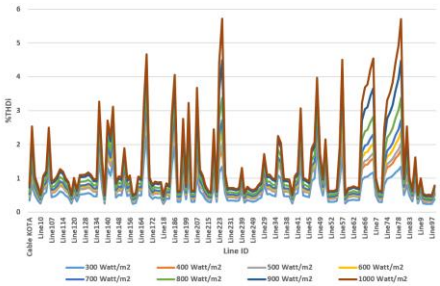


Gbr 4. Karakteristik THDi pada Setiap Daya Relatif



Gbr 5. THDi Output Inverter

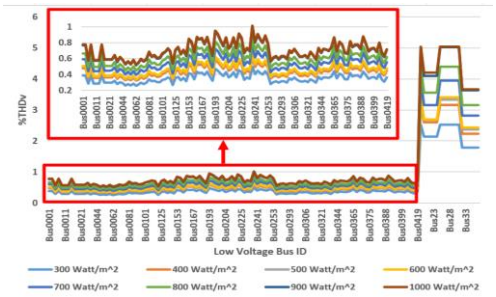
Dari Gbr 5 dapat dilihat bahwa nilai THDi pada *output* inverter memiliki kecenderungan turun seiring dengan kenaikan iradiasi. Pasokan inverter dengan daya berkualitas rendah diakibatkan oleh THDi besar pada tingkat radiasi matahari rendah [22]. Tingginya arus harmonik saat iradiasi matahari rendah ini diakibatkan oleh minimnya arus atau tidak terpenuhinya rating arus operasi inverter sehingga menimbulkan distorsi yang besar [23]. Besarnya THDi bergantung pada pembebanan inverter dan akan lebih terlihat ketika iradiasi matahari rendah. Selama PV dioperasikan dibawah ratingnya, misal saat pembebanan kurang dari 20% *rated power*, *maximum power point (MPP)* dan kontrol dari faktor daya tidak bekerja optimal karena akan sulit menemukan titik optimal dalam kurva karakteristiknya. Kondisi ini mengakibatkan membesarnya harmonik arus hingga sampai sepuluh kali lipat dari kondisi normalnya [24].



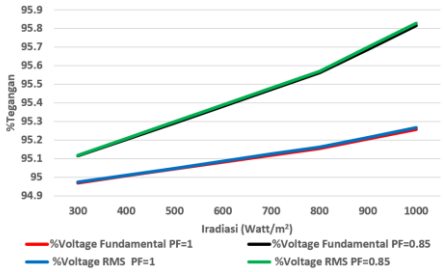
Gbr 6. Kondisi THDi Line pada Setiap Operasi Inverter

Berdasarkan Gbr 6 bahwa inverter memiliki nilai THDi yang masih rendah. Apabila mengacu pada standar IEEE 519 2014, nilai THDi paling rendah adalah 5%. Sementara itu, data yang muncul pada setiap *line* dan transformator masih berada di bawah 5%. Ada dua *line* saat beroperasi di 1000Watt/m^2 yang memiliki nilai THDi lebih dari 5% yaitu Line 79 dan Line 225 dengan besar 5,7% saat iradiasi 1000 Watt/m^2. Apabila diuji menggunakan perhitungan untuk menguji batas maksimumnya harus dilakukan analisis hubung singkat maksimum dan menentukan terlebih dahulu arus yang mengalir ke beban. Dari hasil perhitungan diperoleh batas THDi untuk studi kasus ini adalah 15%.

Berdasarkan standar IEEE 519 2014, pada tegangan kurang dari sama dengan 1kV batas THDv adalah 8% sedangkan pada tegangan antara 1kV sampai dengan 69kV batas THDv adalah 5%. Dari hasil simulasi inverter baik di busbar tegangan rendah maupun busbar tegangan menengah, nilai THDv tidak ada yang melewati batas standar IEEE 519 2014. Namun, dari data yang diperoleh terdapat nilai THDv yang besar yaitu pada busbar tegangan rendah. Besar nilai THDv hingga lebih dari 6% saat iradiasi 1000 Watt/m^2. Busbar-busbar pada tegangan rendah yang memiliki nilai THDv tinggi ini merupakan bus yang terhubung langsung pada inverter sehingga distorsi yang dihasilkan tinggi. Namun, nilainya masih di bawah standar IEEE 519 2014.

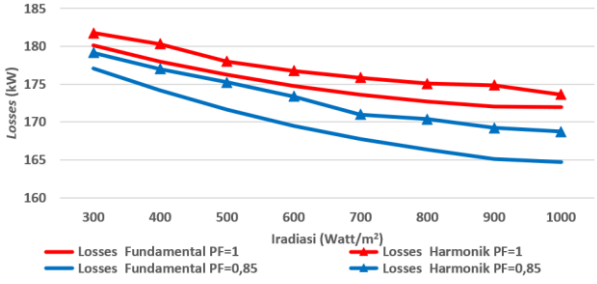


Gbr 7. THDv di Busbar Tegangan Rendah



Gbr 8. Profil Tegangan Rata-Rata Distribusi Bawean

Akibat penetrasi PV 900kW, tegangan pada Sistem Distribusi Pulau Bawean mengalami kenaikan. Dampak terhadap tegangan sistem ini juga disebabkan oleh adanya efek harmonisa pada inverter. Dari Gbr 8, rata-rata profil tegangan di seluruh Sistem Distribusi Pulau Bawean mengalami kenaikan seiring bertambahnya iradiasi matahari. Kondisi ini disebabkan oleh berkurangnya impedansi saluran karena PV dipasang lebih dekat dengan beban yang mengindikasikan transfer daya dari pembangkit menuju beban melalui saluran yang lebih pendek. Dengan begitu jatuh tegangan pada setiap busbar menjadi berkurang atau profil tegangan menjadi naik. Berdasarkan Gbr 8 dapat dilihat bahwa inverter dengan operasi faktor daya 1 memiliki rata-rata profil tegangan yang lebih rendah daripada inverter dengan operasi faktor daya 0,85. Kompensasi daya reaktif oleh inverter dapat mengurangi rugi-rugi jaringan dan menaikkan profil tegangan seperti kerja *capacitor bank*.



Gbr 9. Total Rugi-Rugi Sistem

Rugi-rugi pada sistem Distribusi Bawean secara umum mengalami penurunan sebagaimana ditunjukkan oleh Gbr 9. Kondisi ini diakibatkan oleh penempatan PV yang berada di

dekat beban sehingga suplai daya menuju ke beban menjadi lebih dekat daripada transfer daya dari pembangkit konvensional. Jarak transfer daya yang lebih jauh akan menyebabkan impedansi perhitungan meningkat. Rugi-rugi akibat harmonik lebih besar daripada rugi-rugi fundamentalnya. Hal ini dikarenakan arus pada kondisi harmonik memiliki nilai fundamental dengan orde-orde di bawahnya dimana arus yang digunakan adalah I_{rms}.

V. PENUTUP

Kapasitas optimum PV yang bisa diinstalasi di Sistem Distribusi Pulau Bawean adalah 900kW di Penyulang Kota dan Sangkapura. Berdasarkan penentuan kapasitas dan lokasi ini mampu meningkatkan tegangan rata-rata sistem dari 94,9% menjadi 95,9% serta mengurangi rugi-rugi daya dari 187kW menjadi 169kW. Semakin besar iradiasi matahari menyebabkan distorsi arus semakin besar dan meluas ke sistem. Saluran yang memiliki nilai THDi melebih batas standar IEEE 519 2014 yaitu 5% adalah saluran yang terhubung langsung pada *output* inverter. THDv pada Sistem Distribusi Pulau Bawean masih di bawah standar IEEE 519 2014 yaitu kurang dari 8% untuk tegangan rendah dan kurang dari 5% untuk tegangan menengah.

Pada penelitian selanjutnya direkomendasikan untuk melakukan *sizing* filter aktif yang mampu meminimalisir harmonisa secara dinamis mengikuti penetrasi iradiasi matahari. Hasil penelitian ini dapat digunakan sebagai rekomendasi penempatan dan penentuan kapasitas PV yang ingin dibangun secara bertahap di Sistem Distribusi Pulau Bawean serta mengantisipasi dampak harmonik yang diakibatkan bisa di awal perencanaan.

UCAPAN TERIMA KASIH

Terima kasih kami ucapkan kepada Departemen Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Elektro dan Informatika Cerdas, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya, yang telah mendukung penelitian ini sehingga bisa diikutsertakan dalam Seminar Nasional Teknik Elektro Tahun 2023.

REFERENSI

[1] P. T. Listrik, "Rencana usaha penyediaan tenaga listrik (ruptl) pt pln (persero)."

[2] A. C. Kathiresan, J. PandiaRajan, A. Sivaprakash, T. S. Babu, and M. R. Islam, "An adaptive feed-forward phase locked loop for grid synchronization of renewable energy systems under wide frequency deviations," *Sustain.*, vol. 12, no. 17, pp. 1–15, 2020, doi: 10.3390/su12177048.

[3] M. H. M. Hariri, M. K. Mat Desa, S. Masri, and M. A. A. M. Zainuri, "Grid-connected PV generation system-components and challenges: A review," *Energies*, vol. 13, no. 17, 2020, doi: 10.3390/en13174279.

[4] K. Arulkumar, K. Palanisamy, and D. Vijayakumar, "Recent advances and control techniques in grid connected Pv system - A review," *Int. J. Renew. Energy Res.*, vol. 6, no. 3, pp. 1037–1049, 2016.

[5] T. Sami, S. M. Mahaei, M. T. H. Namarvar, and H. Iravani, "Optimal placement of DGs for reliability and loss evaluation using DIgSILENT software," *2011 10th Int. Conf. Environ. Electr. Eng. EEEIC.EU 2011 - Conf. Proc.*, no. August 2017, 2011, doi: 10.1109/EEEIC.2011.5874591.

[6] U. Umar *et al.*, "New enhanced symbiotic organisms search for optimal location and sizing of distributed generation in radial distribution system," *Int. J. Intell. Eng. Syst.*, vol. 13, no. 5, pp. 170–180, 2020, doi: 10.22266/ijies2020.1031.16.

[7] A. Elkholy, "Harmonics assessment and mathematical modeling of power quality parameters for low voltage grid connected photovoltaic systems," *Sol. Energy*, vol. 183, no. March, pp. 315–326, 2019, doi: 10.1016/j.solener.2019.03.009.

[8] G. Osma-Pinto, M. García-Rodríguez, J. Moreno-Vargas, and C. Duarte-Gualdrón, "Impact evaluation of grid-connected PV systems on PQ parameters by comparative analysis based on inferential statistics," *Energies*, vol. 13, no. 7, 2020, doi: 10.3390/en13071668.

[9] M. Bajaj and A. K. Singh, "Optimal design of passive power filter for enhancing the harmonic-constrained hosting capacity of renewable DG systems," *Comput. Electr. Eng.*, vol. 97, no. December 2020, p. 107646, 2022, doi: 10.1016/j.compeleceng.2021.107646.

[10] S. S. Parihar and N. Malik, "Analysing the impact of optimally allocated solar PV-based DG in harmonics polluted distribution network," *Sustain. Energy Technol. Assessments*, vol. 49, no. September 2021, p. 101784, 2022, doi: 10.1016/j.seta.2021.101784.

[11] B. Bayer, P. Matschoss, H. Thomas, and A. Marian, "The German experience with integrating photovoltaic systems into the low-voltage grids," *Renew. Energy*, vol. 119, pp. 129–141, 2018, doi: 10.1016/j.renene.2017.11.045.

[12] G. Setyawan, Umar, A. Soeprijanto, and O. Penangsang, "Symbiotic Organism Search for Sizing and Optimal Location of Distributed Generation Using Novel Sensitivity Factor," *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 588, no. 1, 2019, doi: 10.1088/1757-899X/588/1/012021.

[13] T. T. The, S. N. Quoc, and D. V. Ngoc, "Symbiotic Organism Search Algorithm for Power Loss Minimization in Radial Distribution Systems by Network Reconfiguration and Distributed Generation Placement," *Math. Probl. Eng.*, vol. 2020, 2020, doi: 10.1155/2020/1615792.

[14] A. E. Ezugwu, "Enhanced symbiotic organisms search algorithm for unrelated parallel machines manufacturing scheduling with setup times," *Knowledge-Based Syst.*, vol. 172, pp. 15–32, 2019, doi: 10.1016/j.knosys.2019.02.005.

[15] K. B. Nagasai and T. R. Jyothsna, "Harmonic Analysis and Application of PWM Techniques for Three Phase Inverter," *Int. Res. J. Eng. Technol.*, pp. 2395–56, 2016.

[16] K. Kritsanasuwan, U. Leeton, and T. Kulworawanichpong, "Harmonic mitigation of AC electric railway power feeding system by using single-tuned passive filters," *Energy Reports*, vol. 8, pp. 1116–1124, 2022, doi: 10.1016/j.egyr.2022.05.276.

[17] PLN. Sistem 20kV PT PLN (Persero) UP3 Gresik ULP Bawean. 2022.

[18] PJB. Kondisi Sistem Pembangkitan Pulau Bawean. 2023.

[19] PLN. Proposal Pembangkit Listrik Tenaga Surya Photovoltaic 500kWp Pulau Bawean. PLN Regional Jawa Timur Bali dan Nusa Tenggara, PLN Unit Induk Distribusi Jawa Timur. 2019.

[20] L. H. and M. S. Ketut Dartawan, Ricardo Austria, "Harmonic Issues That Limit Solar Photovoltaic," *World Renew. Energy Forum 2012*, pp. 1–7, 2013, [Online]. Available: https://ases.conference-services.net/resources/252/2859/pdf/SOLAR2012_0482_full paper.pdf.

[21] E. P. Aji, P. Wibowo, and J. Windarta, "Kinerja Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) dengan Sistem On Grid di BPR BKK Mandiraja Cabang Wanayasa Kabupaten Banjarnegara," *J. Energi Baru dan Terbarukan*, vol. 3, no. 1, pp. 15–27, 2022, doi: 10.14710/jebt.2022.13158.

[22] D. Chenvidhya, J. Thongpron, U. Sangpanich, N. Wongyao, K. Kirtikara, and C. Jivacate, "A Thai National Demonstration Project on PV grid-interactive systems: Power quality observation," *Proc. 3rd World Conf. Photovolt. Energy Convers.*, vol. C, pp. 2152–2154, 2003.

[23] A. Chidurala, T. K. Saha, N. Mithulananthan, and R. C. Bansal, "Harmonic emissions in grid connected PV systems: A case study on a large scale rooftop PV site," *IEEE Power Energy Soc. Gen. Meet.*, vol. 2014-Octob, no. October, 2014, doi: 10.1109/PESGM.2014.6939147.

[24] L. G. M. Oliveira *et al.*, "Assessment of Harmonic Distortion in small grid-connected photovoltaic systems," *Proc. Int. Conf. Harmon. Qual. Power, ICHQP*, vol. 2016-Decem, pp. 810–816, 2016, doi: 10.1109/ICHQP.2016.7783481.