

Optimasi Penempatan dan Kapasitas DG untuk Memaksimalkan *Loadability* pada Penyulang Watu Ulo Jember

FITRIANA, DARMA ARIF WICAKSONO, SOFIA ARIYANI, HERRY SETYAWAN

Universitas Muhammadiyah Jember, Indonesia
Email : darmaarifwicaksono@gmail.com

Received 27 Maret 2022 | *Revised* 18 April 2022 | *Accepted* 27 April 2022

ABSTRAK

Peningkatan kebutuhan listrik tanpa ada penambahan sumber listrik yang terus menerus akan mengakibatkan masalah pada voltage stability. Untuk menyelesaikan masalah tersebut dengan penerapan energi terbarukan yang memungkinkan adalah model pembangkit tersebar / Distributed Generation (DG). Penyulang Watu Ulo Jember merupakan penyulang kelistrikan 10,03 KV 75 bus yang bertempat pada Jember bagian selatan dimana potensi energi terbarukan dapat dilakukan. Pada penelitian ini optimasi penempatan DG dengan level penetrasi dilakukan untuk mengetahui kenaikan pembebanan kelistrikan yang maksimal (loadability) pada penyulang Watu Ulo Jember dengan mempertimbangan faktor perbaikan level tegangan menggunakan algoritma PSO. Penelitian ini diharapkan salah satunya dapat menjadi kajian ilmiah pemerintah kabupaten Jember terhadap potensi pemasangan DG untuk meningkatkan loadability dalam pemenuhan kebutuhan beban pelanggan listrik.

Kata kunci: Energi Terbarukan, Pembangkit Tersebar (DG), Loadability, Algoritma PSO, Voltage Stability.

ABSTRACT

The increase in electricity demand without the addition of a continuous power source will cause problems in voltage stability. To solve this problem with the application of renewable energy that is possible is the Distributed Generation (DG) model. The Watu Ulo Jember feeder is a 10.03 KV 75 bus electricity feeder located in the southern part of Jember where the potential for renewable energy can be carried out. In this study, an optimization of DG placement with penetration level was carried out to determine the maximum increase in electrical loading (loadability) on the Watu Ulo Jember feeder by considering the voltage level improvement factor using the PSO algorithm. It is hoped that this research can become a scientific study of the Jember district government on the potential of installing DG to increase loadability in meeting the needs of electricity customers.

Keywords: Renewable Energy, Distributed Generation (DG), Loadability, PSO Algorithm, Voltage Stability.

1. PENDAHULUAN

Energi terbarukan merupakan salah satu solusi untuk memenuhi kebutuhan listrik yang semakin meningkat. Pemanfaatan energi terbarukan sebagai sumber energi listrik dapat dilakukan dengan teknologi *Distributed Generation* (DG). *Distributed Generation* (DG) adalah sekumpulan pembangkit tenaga listrik yang dipasang tersebar pada jaringan distribusi tenaga listrik sehingga bekerja secara paralel dengan listrik PLN untuk mengatasi masalah kualitas daya listrik yang dapat berupa peningkatan kebutuhan beban listrik, penurunan profil tegangan, atau rugi-rugi saluran yang besar pada jaringan. Saat ini kinerja DG dalam distribusi merupakan solusi untuk memenuhi kebutuhan listrik, baik untuk beban rumah tangga maupun industri. Penerapan instalasi DG umumnya dilakukan pada jaringan distribusi, namun penelitian **(Cicilio, dkk, 2020)** melakukan studi pada jaringan transmisi dan permasalahan yang lebih kompleks terutama pada stabilitas transien. Salah satu pemanfaatan energi terbarukan adalah Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS). Meskipun daya listrik yang dihasilkan bergantung pada intensitas cahaya matahari **(Arefifar, dkk, 2015)**, peralatan PLTS saat ini sudah banyak tersedia sehingga mudah untuk diaplikasikan. Dengan adanya keterbatasan pada keluaran energi listrik pada PLTS, penelitian **(Arefifar, dkk, 2014)** membahas tentang penyimpanan energi dan alat pengatur beban untuk memaksimalkan kinerja dari PLTS.

Seiring dengan pesatnya peningkatan kebutuhan beban listrik, kemampuan jaringan distribusi untuk memenuhi kebutuhan beban akan mencapai titik maksimum **(Hu, dkk, 2017)**. Dengan penambahan beban yang berlangsung secara kontinyu dapat mengakibatkan masalah pada profil tegangan dan dapat berefek pada *blackout* atau dikenal sebagai masalah kestabilan tegangan (*voltage stability*). Penurunan profil tegangan yang berkelanjutan pada jaringan listrik mengakibatkan masalah pada kestabilan generator dalam mencukupi kebutuhan beban, dan mengakibatkan generator terlepas dari sistem (*out of sincron*). Besaran nilai yang diizinkan oleh standar listrik PLN adalah kurang dari 10% atau lebih dari 5% bergantung pada tegangan dasar jaringan listrik tersebut. Dalam prinsip kerja jaringan listrik yang baik, kemampuan jaringan listrik dalam mencukupi kebutuhan beban tanpa adanya gangguan merupakan tujuan produsen listrik. Nilai pembebanan jaringan disebut juga *loadability* (λ), yaitu faktor pengali pembebanan yang dapat dicukupi oleh jaringan listrik tanpa mengalami gangguan kelistrikan. Jika sebuah jaringan listrik tidak dilakukan modifikasi, peningkatan beban yang sedikit dapat mengakibatkan jaringan dengan mudah mengalami titik ketidakstabilan. Modifikasi yang dapat dilakukan salah satunya adalah penempatan DG pada jaringan listrik.

Pemasangan DG untuk mengatasi masalah *voltage stability* sudah dilakukan pada penelitian **(Ettehadi, dkk, 2012)** untuk memperbaiki performa jaringan distribusi dalam mengatasi penambahan beban. Analisa yang digunakan dalam penelitian tersebut adalah *continuous power flow* (CPF), yaitu sistem akan melakukan pengecekan aliran daya setiap ada penambahan beban. Penempatan DG tidak secara acak dilakukan pada setiap bus yang tersedua pada jaringan listrik. Penelitian **(Hedayati, dkk, 2008)** menjelaskan bahwa penempatan DG pada bus yang paling sensitif akan menghasilkan peningkatan tegangan yang baik, karena dengan pemasangan pada bus sensitif akan berefek langsung pada jaringan disamping pertimbangan masalah batas kualitas daya listrik seperti rating saluran. Bus sensitif merupakan bus yang memiliki profil tegangan paling buruk dibandingkan dengan bus lain ketika kondisi normal belum ada penambahan beban. Profil beban paling buruk mengindikasikan bahwa dengan penambahan beban, bus tersebut akan mudah untuk mencapai titik ketidakstabilan. Menurut **(Ruzi, 2016)** dalam mendeteksi proses ketidakstabilan tegangan dengan menggunakan CPF pada bus sensitif dapat melihat bus yang

pertama kali menunjukkan titik ketidakstabilan pertama kali seiring dengan penambahan beban.

Penelitian tentang penempatan DG telah dilakukan sebelumnya, seperti **(Al Abri, dkk, 2012)** optimalisasi penempatan dan kapasitas DG dengan mempertimbangkan level penetrasi. Level penetrasi DG adalah kapasitas DG yang dapat dipasang pada suatu jaringan listrik. Berdasarkan **(Li, dkk, 2017)** level penetrasi DG yang tinggi berpengaruh pada kualitas daya, sistem proteksi dan kontrol. Pada tingkat penetrasi yang rendah (1-5%) akan berdampak kecil pada peningkatan nilai *loadability*, namun pada tingkat penetrasi 20-30% akan berdampak signifikan. Sementara itu **(Duppala, dkk, 2019)** mengatakan bahwa tingkat penetrasi DG juga berpengaruh terhadap rugi-rugi saluran. Pengaruh level penetrasi pada rugi-rugi saluran adalah pada tingkat penetrasi rendah rugi-rugi berkurang, sedangkan pada tingkat penetrasi tinggi rugi-rugi meningkat.

Kabupaten Jember merupakan salah satu daerah di timur Pulau Jawa yang sebagian besar penduduknya bermata pencaharian sebagai petani dan peternak. Pengembangan potensi energi terbarukan yang dapat diterapkan dapat menjadi solusi permasalahan energi bagi masyarakat Jember. Peningkatan kebutuhan beban pada penyulang Waktu Ulo Jember dapat menjadi alasan pemasangan DG dalam meningkatkan nilai *loadability* (λ). Salah satu kajian tentang potensi energi terbarukan di Jember bagian selatan adalah **(Widiyanto, dkk, 2015)** bahwa potensi pembangkit listrik tenaga angin menggunakan analisis Weibul memiliki kecepatan angin rendah dengan kecepatan angin kencang mencapai 3,5 m/s – 10 m /s. Penyulang Watu Ulo Jember merupakan salah satu penyulang listrik di Kabupaten Jember dengan jumlah 75 bus yang meliputi kelistrikan di Jember bagian selatan. Data kelistrikan penyulang Watu Ulo dipilih karena Jember bagian selatan memiliki potensi energi terbarukan yang lebih bervariasi, seperti peternakan untuk biogas, pembangkit listrik tenaga angin, dan pembangkit listrik tenaga surya.

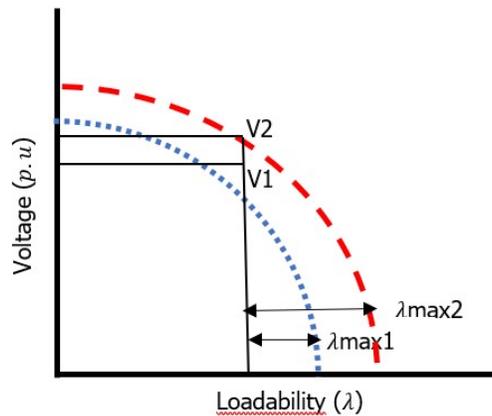
Penelitian **(Muntowifah, 2014)** pada optimasi penempatan DG menggunakan algoritma Genetika pada penyulang Watu Ulo Jember berdasarkan perbaikan *drop* tegangan, namun pada penelitian ini hasil yang diperoleh belum mampu mereduksi rugi-rugi saluran yang optimal. Penelitian lanjutan **(Tabarok, dkk, 2017)** tentang optimasi penempatan DG dan kapasitor untuk meningkatkan profil tegangan dan juga mengurangi rugi-rugi saluran menggunakan algoritma Genetika pada penyulang Watu Ulo Jember untuk memperbaiki profil tegangan dan mengurangi rugi-rugi saluran dengan nilai DG 22 KW dan 11 KVAR. Namun dalam penelitian ini tidak mempertimbangkan level penetrasi DG dan kapasitor, selain itu fungsi objektif hanya untuk menaikkan profil tegangan dan menurunkan rugi-rugi saluran.

Optimalisasi penempatan DG dan kapasitas DG dengan mempertimbangkan tingkat penetrasi dalam upaya peningkatan *loadability* (λ). menggunakan algoritma *Hybrid Particle Swarm Optimization* (HPSO) untuk *voltage stability* dilakukan oleh **(Wicaksono, dkk, 2019)**. Dalam penelitian ini, data yang digunakan adalah data bus IEEE 33. Aliran daya kontinu (CPF) digunakan untuk menentukan bus sensitif yang dapat dipasang dengan DG sehingga menghasilkan nilai *loadability* (λ). yang optimal seiring dengan perbaikan profil tegangan. Berdasarkan referensi penelitian sebelumnya, pada penelitian ini dilakukan optimasi penempatan dan kapasitas DG untuk meningkatkan *loadability* (λ) pada penyulang Watu Ulo Jember, sehingga diperoleh bus yang optimal yang dapat meningkatkan beban yang dapat penuh oleh jaringan. Level penetrasi yang digunakan dalam penelitian ini adalah 50% dari total beban penyulang dengan pertimbangan kualitas daya pada jaringan, tujuan utama dari penelitian ini adalah untuk mendapatkan lokasi dan kapasitas DG yang optimal dalam memaksimalkan *loadability* (λ) dengan mempertimbangkan peningkatan profil tegangan.

2. TEKNOLOGI DG PADA VOLTAGE STABILITY

2.1 Loadability pada masalah Voltage Stability

Voltage stability dapat dianalisis dengan dua metode, yaitu metode statis dan metode dinamis. Dengan menganalisis hubungan antara nilai daya (P) dan tegangan (V) pada kurva stabilitas generator yang ditunjukkan pada Gambar 1, besarnya nilai antara P dan V dapat dilihat pada batasan hingga mencapai titik ketidakstabilan. Seiring penambahan beban yang berlangsung terus menerus, analisis CPF akan melihat titik kritis antara P-V. Titik kritis ini disebut sebagai titik *loadability* (λ) dengan simbol (λ) sebagai gambaran keadaan sistem yang tidak mampu lagi memenuhi kebutuhan beban karena akan menimbulkan masalah ketidakstabilan pada jaringan listrik. Dengan penambahan DG yang diterapkan pada sistem kelistrikan, dapat menambah atau mengurangi batas *voltage stability* tergantung pada mode operasi, faktor daya (leading atau lagging). Dalam penelitian ini, faktor daya untuk semua kondisi diasumsikan memiliki kondisi yang sama yaitu 0,95 *lagging* hingga 0,95 *leading*.



**Gambar 1. Kurva Kestabilan Tegangan
 (Al Abri, dkk, 2012)**

Gambar 1 merupakan kondisi P-V pada kurva stabilitas dengan mengacu pada nilai *loadability* maksimum. Sumbu x adalah nilai *loadability* (λ) dan sumbu y adalah nilai tegangan (V) dalam satuan per unit (p.u). Nilai maksimum adalah nilai *loadability* (λ) maksimum yang digunakan sebagai hasil penelitian. Nilai (λ) bervariasi dari nol hingga nilai maksimum pada pembebanan (λ_{max}) Dengan penambahan DG yang menginjeksi daya aktif (P) dan reaktif (Q), terdapat perbedaan profil tegangan sebelum dan sesudah penambahan DG pada sistem V_1 menjadi V_2 , serta perubahan nilai *loadability* (λ) dari 1 menjadi 2. Secara matematis dapat ditulis sebagai berikut:

$$P_i = \lambda_{P0,i} \quad (1)$$

$$Q_i = \lambda_{Q0,i} \quad (2)$$

System loadability Improvement (SLI) dijelaskan pada penelitian (Aman et al., 2013) sebagai peningkatan nilai *loadability* (λ) sebelum dan sesudah penempatan DG. Dalam mendapatkan nilai perbaikan *loadability* (λ), dituliskan secara matematis sebagai berikut:

$$SLI \% = \frac{\lambda_{max_{w/DG}} - \lambda_{max_{wo/DG}}}{\lambda_{max_{wo/DG}}} \times 100\% \quad (3)$$

Dimana $SLI\%$ merupakan prosentase peningkatan *loadability* setelah penempatan DG, $\lambda_{max_{w0/DG}}$ *loadability* sebelum DG and $\lambda_{max_{w/DG}}$ is *loadability* setelah penempatan DG.

2.2 Model dan Pendekatan Penempatan DG

Penelitian ini menggunakan DG secara umum, baik dari sumber energi fosil maupun energi terbarukan tanpa membahas lebih lanjut jenis DG yang digunakan. Jenis DG yang digunakan dalam penelitian ini adalah generator baru yang terhubung ke jaringan pembangkit listrik penyalang Watu Ulo Jember dengan menginjeksikan daya aktif dan reaktif. Berdasarkan **(Kekatos, dkk, 2014)** injeksi daya aktif dan daya reaktif akan dapat mengatasi kualitas daya secara umum. Pada penelitian ini penempatan DG menggunakan pendekatan bus sensitif terhadap tujuan peningkatan *loadability* (λ).

Skenario yang diterapkan pada penelitian ini adalah analisa aliran daya pada kondisi tanpa DG dengan beban dasar penyalang Watu Ulo Jember dalam mencapai nilai *loadability* maksimum. Data yang digunakan tidak mempertimbangkan profil pembeban trafo karena diasumsikan bahwa data yang dipakai adalah beban maksimum dari penyalang. Selanjutnya bus yang memiliki profil tegangan rendah digunakan sebagai dasar penempatan dan kapasitas DG. 5 bus terendah akan dijadikan acuan sebagai studi penempatan dan kapasitas DG menggunakan algoritma PSO. Dalam sistem tenaga, pemodelan daya aktif dan daya reaktif aliran daya sebagai berikut:

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} J_{P\theta} & J_{PV} \\ J_{Q\theta} & J_{QV} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V \end{bmatrix} \quad (4)$$

Dengan asumsi bahwa daya reaktif konstan, maka perubahan daya reaktif (ΔQ) adalah nol. Berdasarkan Persamaan (1) dan (2) maka:

$$\Delta P - (J_{PV} - J_{P\theta} J_{Q\theta}^{-1} J_{QV}) \Delta V \text{ or} \quad (5)$$

$$\Delta V - (J_{RPV})^{-1} \Delta P \quad (6)$$

dimana J_{RPV} adalah reduksi matriks jacobian yang memberikan nilai magnitude tegangan yang bervariasi disebabkan oleh injeksi DG dalam sistem. Ketika semua bus dimodelkan sebagai bus PQ, $J_{Q\theta}^{-1}$ dapat disebut sebagai matriks *square*. Pada umumnya penempatan DG terjadi pada sistem distribusi tenaga listrik, dimana *slack bus* mempertahankan besaran tegangan yang stabil. Penempatan DG pada jaringan listrik dibagi menjadi 3 kondisi, DG sebagai kontrol PV, kontrol arus dan kontrol PQ. Dengan memodelkan DG sebagai kontrol PV, dapat mengatur tegangan sistem dimana hal ini akan mengganggu kualitas daya, sehingga standar IEEE P1547 merekomendasikan menempatkan DG pada jaringan yang ada sebagai bus PQ. Dengan memodelkan DG sebagai bus PQ, perhitungan aliran daya DG diasumsikan sebagai beban negatif dimana DG akan menginjeksi daya aktif dan reaktif dengan peran yang berbeda dari bus PQ pada umumnya, yaitu menyerap daya aktif dan reaktif.

Kapasitas DG diperhitungkan untuk memungkinkan penerapan penelitian ini pada pemerintah kabupaten Jember. Kapasitas DG menggunakan level penetrasi 50% dengan mempertimbangkan pengaruhnya terhadap kualitas daya dengan *range* <10% atau >50%. Secara matematis level penetrasi DG ditulis sebagai berikut:

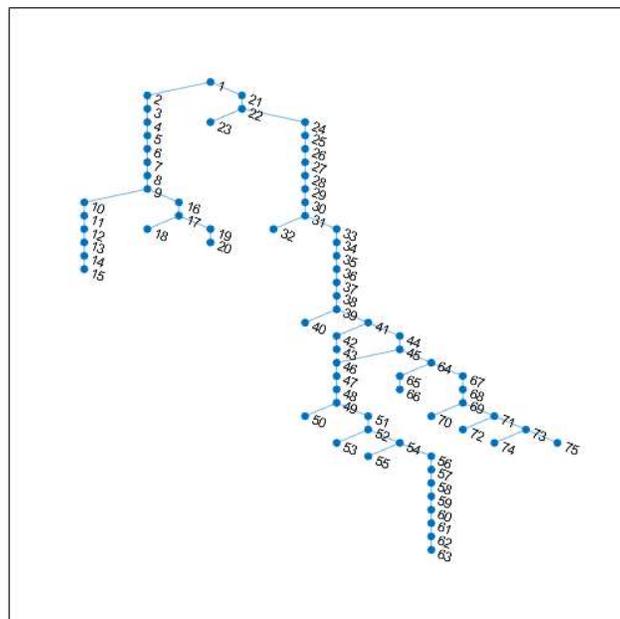
$$\text{DG Penetration Level (\%)} = \frac{SDG}{SLoad} \times 100\% \quad (7)$$

dimana SDG adalah daya aktif DG and S load adalah total daya beban dari penyulang Watu Ulo Jember.

3. METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Penyulang Watu Ulo Jember

Data penelitian yang digunakan adalah penyulang Watu Ulo Jember sistem radial dengan jumlah 75 bus pada tegangan 10,03 KV dan total beban sebesar 6,3 MW dan 1,28 MVAR. Penyulang Watu Ulo Jember mencakup kebutuhan Jember bagian selatan yang berpotensi untuk dimanfaatkan seperti energi terbarukan dari sinar matahari, angin dan gelombang laut. Gambar 2 berikut adalah gambar data penyulang Watu Ulo Jember.



Gambar 2. Penyulang Watu Ulo Jember

3.2 Kualitas daya dan *loadability*

Dalam proses pencarian nilai *loadability*, beberapa pertimbangan batasan dari algoritma yang diterapkan yaitu jumlah, lokasi dan kapasitas DG yang memenuhi, serta batasan kualitas daya sesuai standar sistem distribusi. Dalam pemodelan kapasitas DG diperoleh dari Persamaan (8), kemudian dilanjutkan dengan Persamaan (7) mengenai level penetrasi untuk batasan kapasitas DG.

$$0 \leq \sum_{k=1}^n P_{DG} \leq \sum P_{load} \quad (8)$$

Adapun letak DG ditempatkan pada bus 2 hingga bus ke n karena bus 1 adalah *slack* bus

$$2 \leq DG_{position} \leq n_{buses} \quad (9)$$

$$P_{DG} \neq P_{DG2} \neq P_{DGn} \quad (10)$$

$$S_{load} = \sqrt{\sum_{i=2}^{nbus} P_i^2 + \sum_{i=2}^{nbus} Q_i^2} \quad (11)$$

Kapasitas DG dijelaskan sebagai berikut:

$$P_{DG} = S_{DG} \times \text{power factor} \quad (12)$$

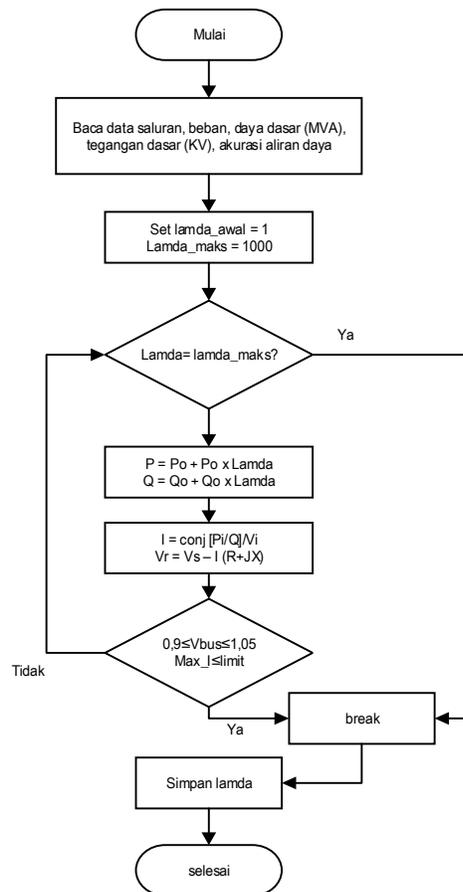
$$Q_{DG} = P_{DG} \times \tan(\cos^{-1}(\text{power factor})) \quad (13)$$

Seiring adanya DG yang bekerja parallel dengan jaringan PLN maka arus yang mengalir pada saluran semakin meningkat, sehingga perlu memiliki batasan arus saluran dan batasan tegangan untuk mendekati kondisi sebenarnya, secara matematis sebagai berikut:

$$I_{DG}^i < I_{limit}^i, \text{ where } i = 1 \text{ to } nbr \quad (14)$$

$$0,9 \leq V_{bus}^k \leq 1,05 \quad (15)$$

Dimana I_{limit} arus saluran maksimum, nbr jumlah percabangan, V_{bus} standar nilai tegangan pada jaringan listrik. Untuk mendapatkan nilai maksimum *loadability* (λ) setelah adanya pemasangan DG menggunakan algoritma sebagai Gambar 3 berikut:



Gambar 3. Diagram Alir Pencarian *Loadability*

CPF bekerja pada 2 tahap, yaitu prediktor dan korektor menurut **(Aly & Abdel-Akher, 2012)**. Tahap prediktor adalah untuk memastikan bahwa tidak ada tegangan nol dalam sistem ketika kondisi tanpa beban. Selanjutnya tahapan korektor ini mirip dengan analisis aliran daya pada sistem radial pada umumnya, yaitu untuk mengidentifikasi apakah dengan penambahan beban dari faktor *loadability* keseluruhan sistem masih mencapai titik *voltage stability*. Setelah mendapatkan referensi 5 bus yang memiliki profil tegangan terendah pada aliran daya data dasar yang digunakan sebagai acuan penempatan DG, seperti yang ditunjukkan Gambar 3 proses iterasi aliran daya secara terus menerus setelah penambahan nilai *loadability* 0,01 dengan mengecek semua data pada jaringan sesuai dengan batasan yang diterapkan, jika data masih memenuhi batasan maka aliran daya dilanjutkan dengan penambahan dari nilai *loadability*. Proses ini akan terus berlanjut hingga salah satu bus mencapai nilai kritis ketidakstabilan tegangan dimana nilai ini digunakan sebagai acuan untuk menghentikan proses aliran daya.

3.3 Algoritma *Particle Swarm Optimization* (PSO)

Algoritma PSO adalah algoritma yang digunakan untuk memecahkan masalah non-linier dengan mengadopsi sekumpulan gerombolan *swarm* untuk mencari makanan. Partikel t adalah vektor yang diperbarui dari waktu ke waktu oleh sekumpulan *swarm* dalam proses optimasi ($x_t = x_{t1}, x_{t2}, x_{t3} \dots x_{tn}$). Ketika *swarm* telah menemukan posisi terbaik sebagai sumber makanan digambarkan sebagai *personal best* (pbest), dibandingkan dengan sekumpulan *swarm* lainnya dan posisi terbaik menjadi *global best* (gbest) serta dijadikan acuan sebagai hasil algoritma yang optimal. Kecepatan kawanan *swarm* akan diperbarui terus menerus sebagai ($v_t = v_{t1}, v_{t2}, v_{t3} \dots v_{tn}$). Persamaan matematis PSO sebagai berikut:

$$V_{id}^{t+1} = w \cdot v_{id}^{(t)} + c_1 r_1 (pbest_{id} - x_{id}) + c_2 r_2 (gbest_{id} - x_{id}) \quad (16)$$

$$x_{id}^{t+1} = x_{id}^{(t)} + v_{id}^{(t+1)} \quad (17)$$

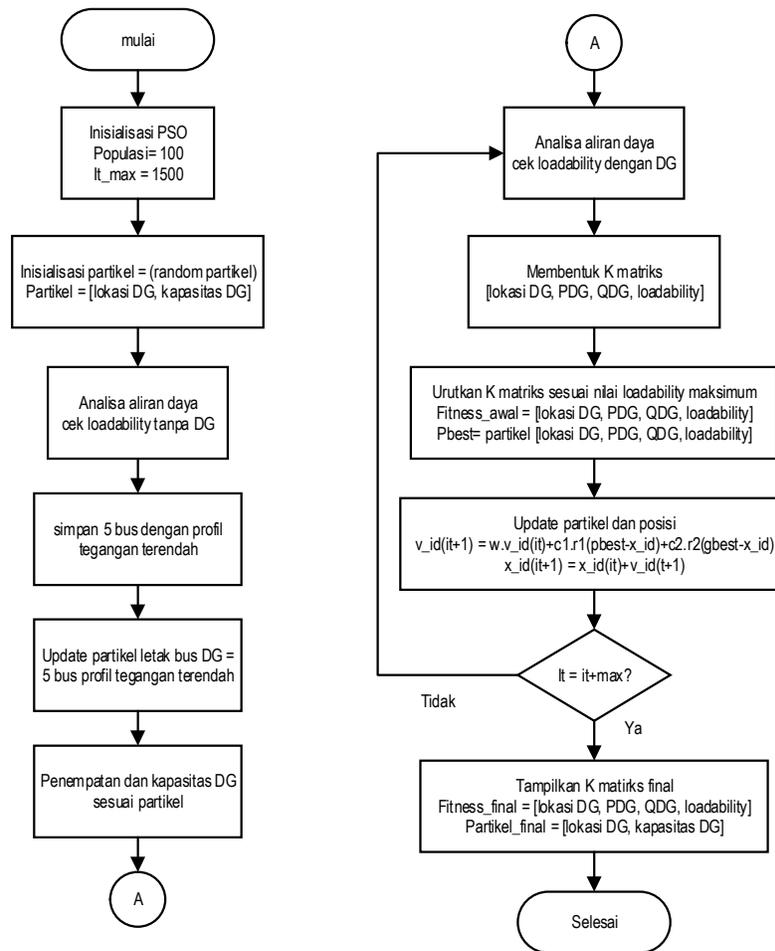
Dimana t jumlah iterasi, d adalah jumlah partikel, c_1 dan c_2 konstanta percepatan posisi, r_1 dan r_2 adalah nilai random, w adalah bobot untuk masing-masing *swarm*.

$$w = w_{max} + \frac{w_{max} - w_{min}}{it_{max}} \cdot x \cdot t \quad (18)$$

Dengan w_{max} dan w_{min} adalah 0.2 dan 0.1 sedangkan konstanta yang lain sesuai standar PSO. Untuk mengetahui lebih jelas tentang algoritma PSO dalam mencari nilai *loadability* (λ) maksimal setelah adanya penempatan DG dapat dilihat pada Gambar 4.

Pada Gambar 4 dijelaskan peta alur dari algoritma PSO dalam melakukan optimasi penempatan dan kapasitas DG dalam memaksimalkan nilai *loadability* (λ). Pada tahap inisialisasi merupakan profil dari masing-masing *swarm* yang membawa bobot lokasi dan kapasitas DG. Kapasitas DG diterapkan berdasarkan level penetrasi 50%. Masing-masing *swarm* disebar dalam mencapai nilai maksimum *loadability* (λ). Pada tahap awal dilakukan analisa aliran daya pada data dasar tanpa adanya DG dalam mengecek *loadability* (λ), Langkah ini merupakan tahap untuk mendapatkan bus referensi lokasi penempatan DG. Bus dengan 5 profil terendah digunakan sebagai referensi lokasi penempatan DG. Selanjutnya dilakukan penempatan DG secara acak pada referensi bus dan dilakukan pengecekan nilai *loadability* (λ) dan hasil pada masing-masing lokasi dan kapasitas yang diterjemahkan sebagai pbest dan disimpan pada K matriks. Perulangan langkah ini dilakukan hingga semua kombinasi lokasi dan kapasitas DG selesai sesuai dengan jumlah iterasi yang diterapkan. Setelah proses selesai dilakukan sampai nilai iterasi tercapai, K matriks diurutkan sesuai dengan nilai maksimum *loadability* (λ). Nilai

maksimal *loadability* (λ) beserta kombinasi lokasi dan kapasitas DG dijadikan sebagai nilai *gbest* sekaligus nilai final dari optimasi PSO.



Gambar 4. Diagram Alir Algoritma PSO

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada penelitian ini dilakukan optimasi penempatan dan kapasitas DG pada penyulang Watu Ulo Jember 75 bus menggunakan algoritma PSO karena permasalahan non-linier. Tahapan simulasi dibagi menjadi 2 yaitu dengan data pembebanan dasar tanpa DG sehingga mendapatkan 5 bus sensitif yang dijadikan acuan untuk penempatan DG. Dalam studi ini, potensi energi terbarukan diabaikan, karena peneliti berfokus pada pendekatan penempatan dan kapasitas DG untuk mendapatkan *loadability* (λ) maksimum dengan mempertimbangkan peningkatan profil tegangan. Selanjutnya bus sensitif akan digunakan sebagai acuan untuk penempatan DG dan analisa aliran daya kontinu (CPF) dilakukan hingga bus mencapai titik kritis pada batas kurva *voltage stability*.

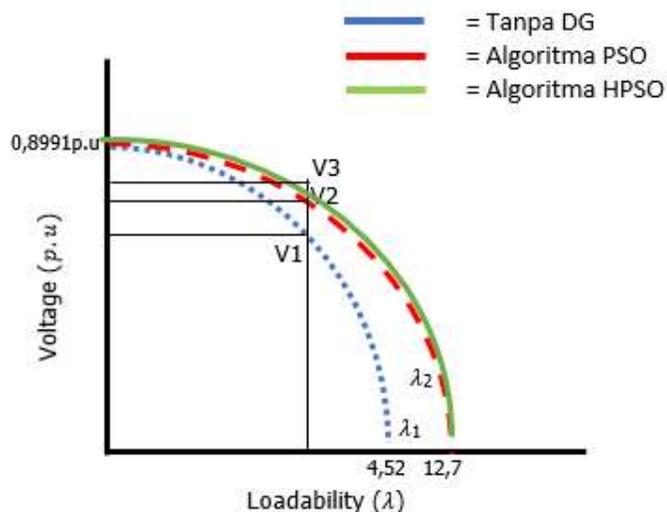
Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan, bus 58, 59, 60, 61, 62, 63 merupakan bus yang paling sensitif, berurutan tegangannya adalah 0.9005 p.u, 0.9003 p.u, 0.90017 p.u, 0.90011 p.u, 0.8999 p.u, 0.8991 p.u, dan bus 63 mencapai batas tegangan untuk pertama kalinya. Hal ini dapat disebabkan oleh letak bus yang jauh dari *slack* sehingga *drop* tegangan semakin

besar. Dengan acuan tersebut, dipasang 1 jenis DG dengan kapasitas level penetrasi maksimal 50% pada bus 58, 59, 60, 61, 62, 63 secara acak untuk mendapatkan nilai *loadability* maksimum seiring dengan kenaikan profil tegangan. Gambar 5 menunjukkan kinerja DG dalam meningkatkan profil tegangan daripada data dasar.

Tabel 1. Hasil Optimasi Penempatan dan Kapasitas DG Terhadap *Loadability*

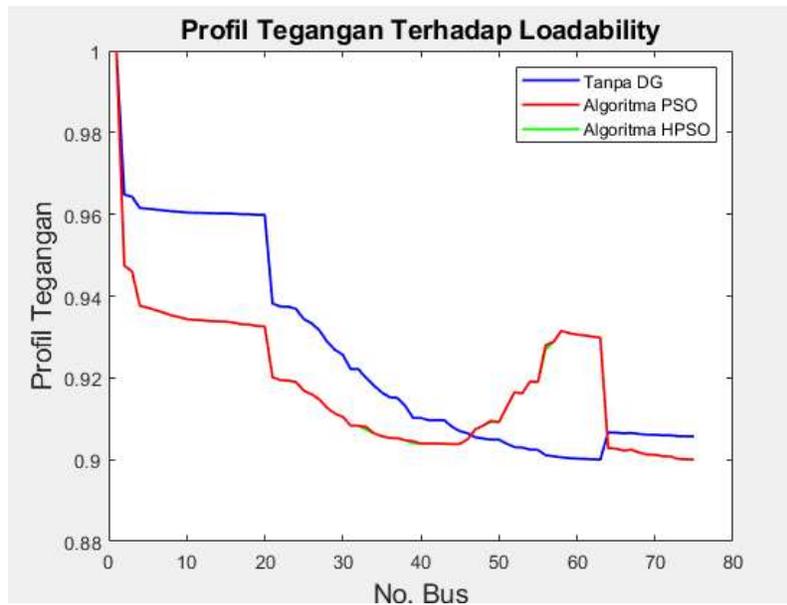
Case	Bus Lokasi DG	Kapasitas DG	Loadability (λ)	Profil Tegangan Minimum (p.u)	Letak Bus Titik Kritis
Data Dasar	-	-	4,52	0,8992	63
Algoritma PSO	58	3,15 MW + 0,64 MVAR	12,7	0,8991	75
Algoritma HPSO	58	3,15 MW + 0,64 MVAR	12,7	0,8991	75

Berdasarkan data pada Tabel 1, tanpa DG bus kritis yang pertama kali mencapai titik ketidaksetabilan adalah bus 63 dengan nilai *loadability* 4,52. Nilai *loadability* menggambarkan bahwa seiring pertambahan beban 4,52 dari beban saat ini sistem penyulang Watu Ulo Jember sudah mencapai titik maksimum. Selanjutnya dengan adanya penempatan DG menggunakan algoritma PSO pada bus 58 sebesar 3,15 MW + 0,64 MVAR maka nilai *loadability* naik menjadi 12,7 dengan bus kritis pada 75 atau dengan kata lain nilai SLI adalah 182%. Hal ini dikarenakan letak bus 75 merupakan bus terjauh dari titik sumber daya listrik dari PLN maupun DG. Pada penelitian ini divalidasi dengan algoritma lain *Hybrid* PSO yaitu dua PSO yang bekerja secara berurutan, menghasilkan nilai *loadability* 12,7 pada bus 58. Pada penelitian menggunakan algoritma PSO dan HPSO memiliki kesamaan hasil yaitu bus DG adalah 58 dengan nilai *loadability* 12,7 mengindikasikan bahwa algoritma yang diterapkan pada penelitian ini berjalan dengan tepat. Dengan adanya DG yang terpasang pada penyulang Watu Ulo Jember maka sumber daya listrik PLN bekerja parallel dengan DG sehingga penyulang Watu Ulo Jember dapat menaikkan pembebanan puncak dari pelanggan. Kenaikan nilai *loadability* sebelum dan setelah adanya DG ditunjukkan pada Gambar 5 berikut:



Gambar 5. Nilai Loadability Sebelum dan Sesudah adanya DG

Gambar 5 adalah grafik *loadability* dimana garis biru adalah data dasar tanpa DG, garis merah adalah *loadability* setelah penempatan DG menggunakan algoritma PSO dan garis hijau menggunakan algoritma HPSO. Penempatan DG pada bus 58 menyebabkan arus yang mengalir ke penyulang Watu Ulo Jember juga meningkatkan arus saluran karena terdapat 2 sumber daya listrik untuk mencukupi kebutuhan beban. Sebelum adanya DG arus yang mengalir pada bus 58 sebesar 18,42 Ampere, sedangkan setelah DG arus yang mengalir sebesar 201,24 Ampere. Nilai kenaikan arus ini menunjukkan adanya penyuntikan sumber daya pada jaringan listrik karena penyulang Watu Ulo Jember merupakan jaringan radial, sehingga awalnya sumber daya listrik hanya berasal dari bus 1 kemudian sumber daya listrik dibantu oleh DG pada bus 58.



Gambar 6. Profil Tegangan Sebelum dan Sesudah Penempatan DG

Pada Gambar 6 ditunjukkan grafik profil tegangan sebelum dan sesudah adanya DG. Dengan adanya DG pada bus 58 terjadi peningkatan profil tegangan sehingga mengakibatkan kenaikan nilai *loadability* pada penyulang Waktu Ulo Jember. Penempatan DG menggunakan PSO dan divalidasi dengan HPSO menunjukkan data yang sama pada profil tegangan, hal ini karena berdasarkan optimasi PSO dan HPSO menghasilkan hasil yang sama yaitu pada bus 58 dengan kapasitas 3,15 MW + 0,64 MVAR.

4. KESIMPULAN

Energi terbarukan merupakan salah satu solusi untuk menghadapi peningkatan kebutuhan listrik. Dengan peningkatan beban yang terus menerus tanpa penambahan sumber energi listrik lain dapat menimbulkan masalah *voltage stability*. Nilai *loadability* (λ) adalah nilai pengali beban listrik pelanggan yang dapat ditanggung oleh jaringan listrik. Teknologi DG digunakan dengan pertimbangan biaya investasi dibandingkan pembangkit konvensional. Keuntungan menggunakan DG pada kualitas daya listrik adalah untuk meningkatkan profil tegangan ataupun juga meningkatkan *loadability*. Penyulang Watu Ulo Jember merupakan jaringan listrik 10,03 KV yang meliputi Jember bagian selatan dengan jumlah 75 bus. Optimasi penempatan dan kapasitas DG menggunakan algoritma PSO dilakukan pada bus sensitif saat mencapai titik kestabilan. Bus 58, 59, 60, 61, 62, 63 merupakan bus yang paling sensitif dalam mencapai titik kritis kestabilan sehingga penempatan DG dilakukan pada 5 bus tersebut. Dari hasil

optimasi didapatkan penempatan yang dilakukan pada bus 58 dengan kapasitas 3,15 MW + 0,64 MVAR meningkatkan nilai *loadability* (λ) atau SLI sebesar 182%. Dengan adanya DG pada penyulang Watu Ulo Jember dapat diindikasikan bahwa jaringan eksisting dapat memenuhi peningkatan kebutuhan beban lebih besar dengan nilai *loadability* (λ) yang dihasilkan.

UCAPAN TERIMA KASIH

Peneliti mengucapkan terima kasih kepada Lembaga Penelitian dan Pengabdian Masyarakat (LPPM) Universitas Muhammadiyah Jember yang telah membantu menyediakan dana untuk penelitian yang telah dilakukan. Dengan adanya dana untuk penelitian ini diharapkan dapat bermanfaat bagi pihak-pihak terkait khususnya Pemerintah Kabupaten Jember sebagai kajian ilmiah tentang potensi pemasangan DG dengan memanfaatkan energi terbarukan untuk meningkatkan pembebanan listrik *loadability* dalam memenuhi kebutuhan beban listrik pelanggan yang juga semakin meningkat.

DAFTAR RUJUKAN

- Al Abri, R., El-Saadany, E. F., & Atwa, Y. M. (2012). Optimal placement and sizing method to improve the voltage stability margin in a distribution system using distributed generation. *IEEE Transactions on Power Systems*, *28*(1), 326-334.
- Aly, M. M., & Abdel-Akher, M. (2012). A continuation power-flow for distribution systems voltage stability analysis. *2012 IEEE International Conference on Power and Energy (PECon)*, (pp. 470-475).
- Aman, M., Jasmon, G., Bakar, A., & Mokhlis, H. (2013). A new approach for optimum DG placement and sizing based on voltage stability maximization and minimization of power losses. *Energy Conversion and Management*, *70*, 202-210.
- Arefifar, S. A., Mohamed, Y. A.-R. I., & El-Fouly, T. (2014). Optimized multiple microgrid-based clustering of active distribution systems considering communication and control requirements. *IEEE transactions on industrial electronics*, *62*(2), 711-723.
- Arefifar, S. A., Ordenez, M., & Mohamed, Y. A.-R. I. (2015). VI controllability-based optimal allocation of resources in smart distribution systems. *IEEE Transactions on Smart Grid*, *7*(3), 1378-1388.
- Cicilio, P., Cotilla-Sanchez, E., Vaagensmith, B., & Gentle, J. (2020). Transmission hosting capacity of distributed energy resources. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, *12*(2), 794-801.
- Duppala, D., Nagaballi, S., & Kale, V. S. (2019). The Technical Impact of Increase in Penetration Level of DG Technologies on Power System. *2019 IEEE Region 10 Symposium (TENSymp)*, (pp. 491-496).

- Ettehadi, M., Ghasemi, H., & Vaez-Zadeh, S. (2012). Voltage stability-based DG placement in distribution networks. *IEEE transactions on power delivery*, 28(1), 171-178.
- Hedayati, H., Nabaviniaki, S., Akbarimajd, & Akbarimajd, A. (2008). A method for placement of DG units in distribution networks. *IEEE transactions on power delivery*, 23(3), 1620-1628.
- Hu, L., Liu, K.-Y., Sheng, W., Diao, Y., & Jia, D. (2017). Research on maximum allowable capacity of distributed generation in distributed network under global energy internet considering static voltage stability. *The Journal of Engineering*, 2017(13), 2276-2280.
- Kekatos, V., Wang, G., Conejo, A. J., & Giannakis, G. B. (2014). Stochastic reactive power management in microgrids with renewables. *IEEE Transactions on Power Systems*, 30(6), 3386-3395.
- Li, J., Zhou, H., Zhou, E., Xue, J., Liu, Z., & Wang, X. (2017). Comprehensive evaluation of impacts of high penetration distributed generation integration in distribution network. *2017 IEEE Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2)*, (pp.1-6).
- Muntowifah, S. (2014). Optimasi Penempatan Dg (Distributed Generation) Pada Jaringan Distribusi Sistem Radial Menggunakan GA (Genetic Algoritma) Di Penyulang Watu Ulo Jember. Universitas Jember.
- Ruzi, R. S. (2016). *Analisis dan Evaluasi Kestabilan Tegangan dengan Metode Continuation Power Flow (CPF) pada Sistem Microgrid*. Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Tabarok, D. K., Saleh, A., & Kaloko, B. S. (2017). Optimasi Penempatan Distributed Generation (DG) dan Kapasitor pada Sistem Distribusi Radial Menggunakan Metode Genetic Algorithm (GA)(Studi Kasus pada Penyulang Watu Ulo Jember). *Berkala Sainstek*, 5(1), 35-40.
- Wicaksono, D. A., Penangsang, O., Wibowo, R. S., Aryani, N. K., & Putra, D. F. U. (2019). Optimizing Tie Switches Allocation and Sizing Distributed Generation (DG) Based on Maximize Loadability Simultaneously Using HPSO Algorithm. *2019 International Seminar on Intelligent Technology and Its Applications (ISITIA)*, (pp. 102-107).
- Widiyanto, P., Arif, M., & Hardianto, T. (2015). Aplikasi Energi Terbarukan Melalui Pengukuran Potensi Angin dengan Metode Analisis Weibull pada Pantai Puger Jember. *Jurnal Arus Elektro Indonesia*, 1(1).