

Jurnal *Rekayasa Elektrika*

VOLUME 15 NOMOR 1

April 2019

**Optimasi Penempatan dan Kapasitas PLTS on grid Pada Sistem Distribusi Radial
Menggunakan Metode Algoritma Genetika Multi Konstrain** 47-55
Muammar Zainuddin dan Haditsah Annur

JRE	Vol. 15	No. 1	Hal 1-74	Banda Aceh, April 2019	ISSN. 1412-4785 e-ISSN. 2252-620X
-----	---------	-------	----------	---------------------------	--------------------------------------

Optimasi Penempatan dan Kapasitas PLTS on grid pada Sistem Distribusi Radial Menggunakan Metode Algoritma Genetika Multi Konstrain

Muammar Zainuddin¹ dan Haditsah Annur²

¹Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Ichsan Gorontalo

²Program Studi Teknik Informatika, Fakultas Ilmu Komputer, Universitas Ichsan Gorontalo

Jl. Drs. Achmad Najamuddin, Kota Gorontalo 96138

e-mail: muammarz@unisan.ac.id

Abstrak—Peluang bisnis pembangkit listrik tenaga surya (PLTS) terhubung ke sistem distribusi (*on grid*) membawa tantangan tersendiri terhadap kualitas daya dan fluktuasi tegangan pada sistem distribusi. Tujuan penelitian ini untuk mengoptimalkan lokasi dan kapasitas daya PLTS *on grid* agar nilai tegangan yang dihasilkan sesuai standar operasi dan memenuhi persyaratan teknik penyambungan pada sistem distribusi. Sistem distribusi yang diuji yaitu penyulang distribusi radial 69 Bus. Metode yang diusulkan menggunakan teknik optimasi algoritma genetika. Nilai batasan optimasi diusulkan menggunakan tiga batasan yaitu batas nilai tegangan, batas nilai kapasitas daya aktif PLTS, dan batas total kapasitas daya aktif PLTS. Optimasi dilakukan sebanyak tiga kali simulasi dengan mempertimbangkan nilai persentase total kapasitas daya aktif PLTS terhadap total beban sistem distribusi. Hasil optimasi yang diusulkan pada simulasi-1 ditemukan 7 lokasi *grid* dengan total daya aktif 1,156 MW (38% PV) dan menghasilkan nilai fitness 0,029. Simulasi-2 ditemukan 7 lokasi dengan total daya aktif 1,243 MW (41% PV) dan menghasilkan nilai fitness 0,023. Pada simulasi-3 ditemukan 11 lokasi dengan total daya aktif 1,385 MW (46% PV) dan menghasilkan nilai fitness 0,022. Nilai *fitness* terbaik merupakan nilai rugi-rugi daya aktif terendah. Masuknya sejumlah sistem PLTS on grid dengan lokasi tersebar pada jaringan dapat meningkatkan level tegangan sistem distribusi.

Kata kunci: *PLTS on grid, algoritma genetika, multi konstrain, rugi-rugi daya, jatuh tegangan*

Abstract—The photovoltaic grid-connected business opportunity offers challenges to power quality and voltage fluctuations in the distribution system. The purpose of this study is to optimize the location and power capacity of the grid-connected photovoltaic so that the voltage values are in accordance with the operating standards and meet the requirements of the connection techniques in the distribution system. The distribution system tested is the 69 Buses radial distribution feeder. The optimization uses three constraints namely voltage constraints, active power capacity constraints and total active power capacity constraints of the Grid-Connected Photovoltaic. The Optimization is carried out by considering the value of the percentage of the total active power of the Grid-Connected Photovoltaic capacity to the total load in the distribution system. The optimization results in the first simulation indicated 7 grid locations with a total active power of 1.156 MW (38% PV) and produced a fitness value of 0.029. The second Simulation showed 7 locations with a total active power of 1.243 MW (41% PV) and produced a fitness value of 0.023. The Third simulation was identified with 11 locations with a total active power of 1.385 MW (46% PV) and produced a fitness value of 0.022. The best fitness value is the lowest value of the active power losses. The entry of a number of the Grid-Connected Photovoltaic System with distributed location can increase the voltage level in the distribution system.

Keywords: *grid-connected photovoltaic, genetic algorithm, multi constraint, losses, voltage drop*

Copyright © 2019 Jurnal Rekayasa Elektrika. All right reserved

I. PENDAHULUAN

Pembangkit listrik tenaga surya (PLTS) *rooftop on grid* saat ini menjadi trend terbaru model bisnis kelistrikan di Indonesia. PLTS *rooftop on grid* mendorong pengalaman pelanggan listrik di Era *Electricity* 4.0. Dukungan perusahaan penyedia listrik negara dalam implementasi PLTS *rooftop on grid* oleh pelanggan yaitu dengan

menyediakan fasilitas paralel dan membuat skema bisnis ekspor-impor daya listrik. Salah satu inovasi disruptif listrik 4.0 yaitu masyarakat memiliki kebebasan untuk memenuhi kebutuhan listriknya sendiri dan dapat menjual listriknya kepada pihak lain. Hal tersebut didukung oleh terbitnya Peraturan Menteri ESDM No. 49 Tahun 2018 [1]. Namun, bisnis PLTS *rooftop on grid* menjadi tantangan tersendiri terhadap penyediaan *reserve margin*

yang cukup dan tepat untuk mengimbangi *intermittensi solar photovoltaic* (PV) [2] reduce pollution and expand the nation's green spaces. Part of the plan is to promote the integration of solar photovoltaics (PVs. Permasalahan lainnya yaitu *reliability* dan *power quality* konsumen PLTS *rooftop on grid* harus tetap terjaga.

Penerapan PLTS *on grid* dan tersebar (*Distributed Generation-DGs*) di Indonesia menjadi salah satu solusi untuk memaksimalkan potensi energi terbarukan di suatu wilayah, mengurangi pemakaian bahan bakar minyak oleh pembangkit konvensional, dan peningkatan kualitas daya listrik [3] governed by state or provincial incentives and/or mandated by green-generation portfolio requirements, are facing installations of large PV plants with capacities in the order of several megavoltamperes (MVAs. PLTS *on grid* memiliki peran terhadap kualitas daya pada sistem distribusi. Peran tersebut yaitu memperbaiki nilai tegangan, memperbaiki dampak ketidakseimbangan beban, menurunkan kejadian fluktuasi daya aktif dan reaktif, meningkatkan faktor daya, menurunkan angka rugi-rugi daya dan memperbaiki nilai keandalan sistem [4], [5] incentives, technology developments and cost reduction. PV installed capacities can vary from a few kW (small-scale. Ukuran kapasitas daya PLTS *on grid* akan menentukan skala utilitas titik hubung pada *grid*. Ukuran daya skala kecil terhubung pada saluran distribusi sekunder, ukuran skala sedang untuk perumahan dan bangunan komersil terhubung pada sistem distribusi primer atau sekunder, dan ukuran daya skala besar terhubung pada saluran tiga fasa distribusi primer [6] governed by state or provincial incentives and/or mandated by green-generation portfolio requirements, are facing installations of large PV plants with capacities in the order of several megavoltamperes (MVAs, [7]. Ketidakseimbangan daya sistem PLTS pada saat terhubung pada penyulang distribusi berdampak pada fluktuasi tegangan di titik sambung [8]. Hal tersebut disebabkan oleh perbedaan level jatuh tegangan di sepanjang penyulang dan perubahan radiasi matahari. Menghubungkan PLTS pada penyulang distribusi harus memenuhi persyaratan teknik penyambungan yaitu pemilihan lokasi (*placement*) dan kapasitas (*sizing*) daya PLTS [9] dan tidak membawa dampak yang buruk terhadap nilai tegangan. Berdasarkan persyaratan tersebut maka dibutuhkan perhitungan optimal dalam penentuan lokasi titik hubung dan ukuran daya PLTS *on grid*.

Penentuan lokasi *on grid* dan kapasitas daya PLTS diusulkan menggunakan teknik optimasi. Teknik optimasi yang diusulkan pada penelitian ini menggunakan metode Algoritma Genetika (*Genetic Algorithm*). Metode optimasi ini telah digunakan pada beberapa studi terkait pembangkitan tersebar (DGs) untuk mengoptimalkan dampak positif terhadap kehadiran sejumlah pembangkit kecil pada sistem distribusi [10], [11]. Namun sistem DG yang dibahas pada studi tersebut belum membedakan jenis sumber energi dan karakteristik pembangkitnya. Sistem DG dianggap sebagai penyuplai daya aktif dan daya reaktif pada grid. Hal yang sama juga telah dilakukan pada studi penempatan optimal peralatan listrik seperti bank kapasitor

pada sistem distribusi listrik [12], [13]. Oleh karena itu pada penelitian ini spesifik membahas implementasi pembangkit listrik tenaga surya yang terhubung pada grid dan tersebar dalam satu sistem distribusi radial.

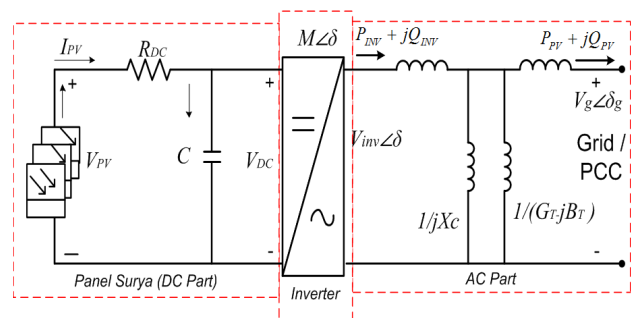
Tujuan penelitian ini yaitu menentukan lokasi titik hubung (*on grid*) dan ukuran kapasitas daya yang optimal pada PLTS agar nilai tegangan yang dihasilkan sesuai standar aturan jaringan sistem tenaga listrik 20 kV (+5% atau -10% dari tegangan nominal) dan memenuhi persyaratan teknik penyambungan pembangkit energi terbarukan pada sistem distribusi [9]. Analisis aliran daya pada sistem distribusi dilakukan untuk melihat hasil perbandingan rugi-rugi daya dan profil tegangan setelah hadirnya PLTS *on grid* pada penyulang distribusi radial.

II. STUDI PUSTAKA

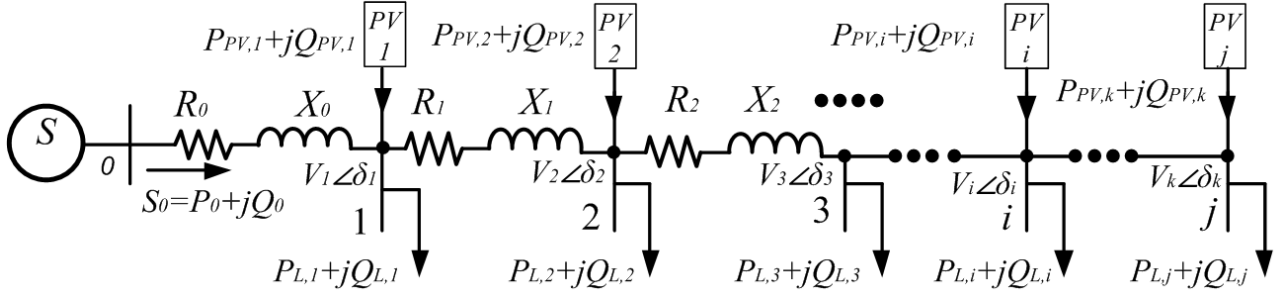
A. Sistem PLTS on Grid

Sistem PLTS *on grid* berbeda dari segi utilitas karakteristiknya dengan pembangkit lainnya. Perbedaan paling mendasar adalah tidak adanya penggunaan peralatan yang sifatnya mekanis pada proses konversi energi matahari. Gambar 1 ditampilkan diagram sistem PLTS *on grid* yang terdiri dari bagian listrik DC (Panel Surya), bagian inverter yang berperan untuk mengubah tegangan DC menjadi tegangan AC, dan bagian listrik AC yang terhubung dengan transformator sistem distribusi [14]. Dalam rangkaian ini dapat diketahui aliran daya dan nilai tegangan sistem PLTS ke dalam *grid*. Apabila radiasi matahari, suhu *cell PV* dan tegangan pada titik sambung *point of common coupling* (PCC) diketahui maka variabel daya pada sistem PV dapat dinilai. Ketika pembangkit surya *photovoltaic* (PV) bertindak sebagai bus PQ, maka nilai P_{PV} dan Q_{PV} bernilai nol. Hal tersebut terjadi apabila pembangkit PV tidak berkontribusi dalam pengaturan tegangan *grid* dan tidak mengeksport daya listrik (radiasi matahari 0 W/m²) [15]. Tegangan PCC diperoleh dengan memasukkan nilai daya yang diekspor dari sistem PLTS ke dalam analisa aliran daya. Dimana V_{PV} adalah tegangan output pada PV array (*direct current-dc*). V_{INV} adalah tegangan output inverter yang terhubung dengan transformator. $R_T + jX_T$ adalah nilai resistansi dan reaktansi pada transformator.

Daya aktif yang dikirim oleh inverter (P_{INV}) dan daya aktif pada titik sambung grid (P_{PV}) mengalami perubahan



Gambar 1. Diagram sistem PLTS *on grid* [16]



Gambar 2. Model PLTS on grid pada sistem distribusi radial

nilai berdasarkan arus dan tegangan ($I-V$) pada PV array. Perubahan $I-V$ mengikuti perubahan radiasi matahari selama operasi PLTS. Aliran daya kompleks (S) dari inverter sistem PLTS sampai ke dalam grid dinyatakan dengan Persamaan (1)-(4) :

$$\tilde{S}_{INV} = P_{INV} + jQ_{INV}, \quad (1)$$

$$\tilde{S}_{PV} = P_{PV} + jQ_{PV} = V_g \angle \delta_g (-I_{INV})^*, \quad (2)$$

$$P_{PV} = \frac{V_{INV} V_g}{X_T} \sin(\theta_g - \theta_{INV}), \quad (3)$$

$$Q_{PV} = \frac{V_{INV}^2}{X_T} - \frac{V_{INV} V_g}{X_T} \cos(\theta_g - \theta_{INV}). \quad (4)$$

Beban listrik pada inverter PLTS on grid adalah beban pada grid (P_L). Pada Gambar 2 ditampilkan model PLTS on grid pada sistem distribusi radial [17]. Kualitas nilai arus (I_{PV}) dan output tegangan PV (V_{PV}) dengan arus (I_{AC}) dan tegangan (V_{AC}) pada grid merupakan standar utama prasyarat sistem PV terhubung ke grid. Inverter PLTS dilengkapi dengan sistem proteksi yang dirancang dari sistem tenaga listrik. Sistem PLTS dapat terputus (*off Grid*) untuk mencegah inverter dari arus gangguan hubung singkat yang besar dan pada saat inverter tidak dapat mengirimkan daya ke beban.

Sistem PLTS terhubung dengan grid melalui sebuah inverter yang berfungsi sebagai konverter daya AC yang sebelumnya merupakan daya DC dari panel surya. Sistem distribusi radial terdiri dari sejumlah bus sebanyak- j , maka diasumsikan bus ke-0 (bus awal) merupakan slack-bus. Pada kondisi praktis nilai beban pada sistem tenaga listrik merupakan persamaan daya. Arah arus keluaran sistem PLTS on grid searah dengan arah arus beban, maka persamaan tegangan pada bus- i sampai ke bus- j diuraikan menurut persamaan aliran daya.

B. Persamaan Aliran Daya pada Sistem Distribusi Radial

Studi aliran daya digunakan untuk menghitung besaran nilai perubahan tegangan dan rugi-rugi daya pada saluran. Apabila nilai skalar tegangan $|V|$ dan sudut fasa δ awal telah diketahui, selanjutnya iterasi awal dilakukan untuk menghitung nilai daya aktif dan tegangan (P-V) serta nilai daya aktif dan daya reaktif (P-Q) pada masing-masing bus

beban [18], [19].

Saluran distribusi dimodelkan sebagai persamaan impedansi seri (5);

$$Z_i = R_i + jX_i. \quad (5)$$

PLTS pada bus- i dimodelkan sebagai sumber daya konstan yang dituliskan (6);

$$S_{PV,i} = P_{PV,i} + jQ_{PV,i}, \quad (6)$$

Persamaan (7) yaitu suplai daya utama dari gardu induk;

$$S_0 = P_0 + jQ_0, \quad (7)$$

daya semu (S) dan nilai tegangan pada ujung bus terima dari cabang pertama diuraikan (8) dan (9);

$$S_1 = S_0 - S_{loss,1} - Z_1 \frac{(P_0^2 + Q_0^2)}{|V|^2} - S_{L,1}, \quad (8)$$

tegangan pada ujung penerima selanjutnya direpresentasikan melalui Persamaan (10);

$$V_i = \left(V_0 - \frac{P_0 R_i + Q_0 X_i}{V_0} \right) - j \left(\frac{P_0 X_i + Q_0 R_i}{V_0} \right), \quad (10)$$

$$\theta_i = -\tan^{-1} \left(\frac{(P_0 X_i + Q_0 R_i) / V_0}{(P_0 R_i + Q_0 X_i) / V_0} \right). \quad (11)$$

Daya aktif (P) dan daya reaktif (Q) pada bus penerima lainnya $j = (i+1)$ dapat dituliskan dengan Persamaan (12) dan (13),

$$P_j = P_i - R_j \frac{P_i^2 + Q_i^2}{|V_i|^2} - P_{L,j} + P_{PV,j}, \quad (12)$$

$$Q_j = Q_i - X_j \frac{P_i^2 + Q_i^2}{|V_i|^2} - Q_{L,j} + Q_{PV,j}, \quad (13)$$

besaran tegangan magnitudo pada ujung bus penerima dituliskan melalui Persamaan (14);

$$|V_j|^2 = |V_i|^2 - 2(P_j \cdot P_i + X_j \cdot G_i) + (R_j^2 + X_j^2) \frac{P_i^2 + Q_i^2}{|V_i|^2}, \quad (14)$$

V_i adalah besarnya tegangan pada bus i .

Persamaan aliran daya dan perubahan nilai tegangan baru dapat dicapai melalui proses iterasi. Apabila nilaidan belum konvergen pada iterasi pertama maka pembentukan elemen matriks *Jacobian* dilakukan selanjutnya. Persamaan (15) dan (16) adalah persamaan untuk menghitung nilai sudut fasa $\delta^{(k+1)}$ dan tegangan $V^{(k+1)}$ yang baru dari bus-*i* ke bus-*j*,

$$\delta_i^{(k+1)} = \delta_i^{(k)} + \Delta\delta_i^{(k)}, \tag{15}$$

$$V_i^{(k+1)} = |V_i^{(k)}| + \Delta|V_i^{(k)}|, \tag{16}$$

daya yang mengalir dari bus-*i* ke bus-*j* atau sebaliknya dari bus-*j* ke bus-*i* didefinisikan dengan Persamaan (17),

$$S_{ij} = P_{ij} + Q_{ij}. \tag{17}$$

Proses iterasi selanjutnya dilakukan apabila telah diperoleh nilai tegangan dan sudut fasa yang baru. Persamaan (18) adalah perhitungan rugi-rugi daya (S_{loss}) pada penyulang distribusi radial *i-j* (bus-*i* ke bus-*j* dan sebaliknya) dituliskan:

$$S_{Loss,ij} = S_{ij} + S_{ji}. \tag{18}$$

apabila nilai konvergen telah terpenuhi maka proses iterasi akan berhenti.

C. Metode Algoritma Genetika

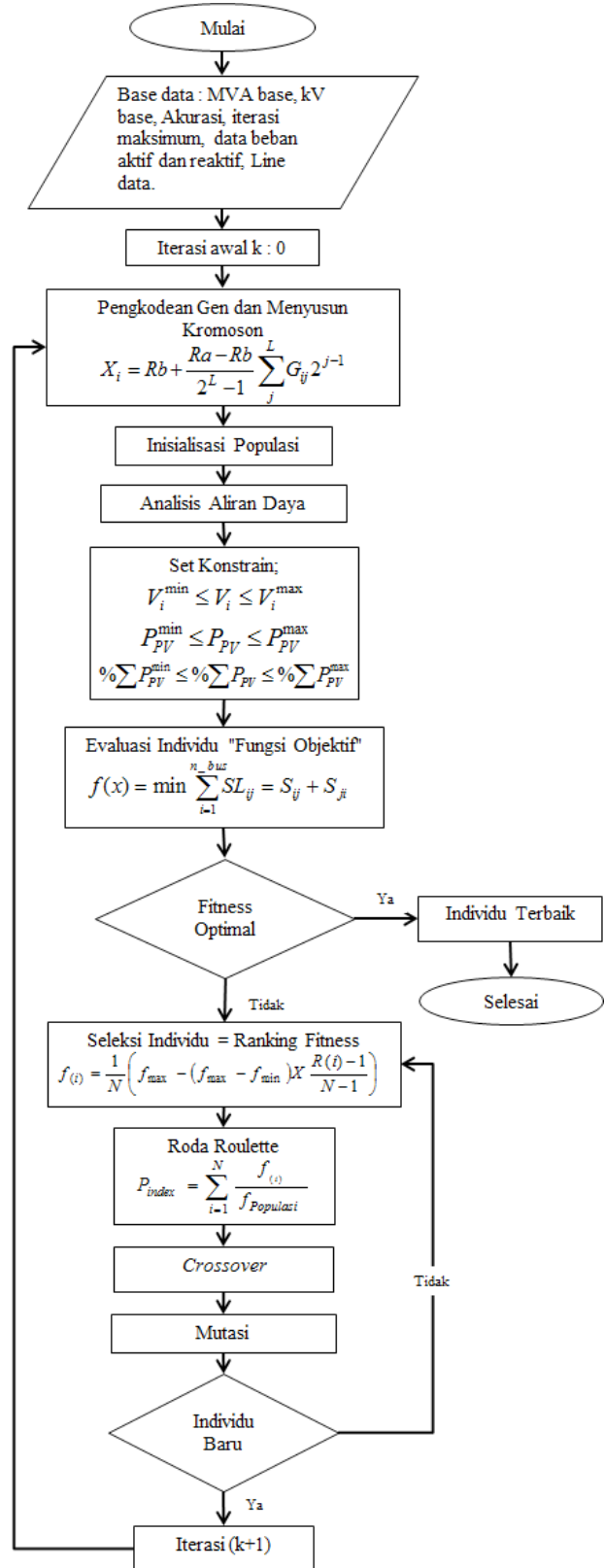
Metode algoritma genetika dengan berbagai teknik dalam kasus pencarian lokasi dan kapasitas optimal pada pembangkit maupun peralatan listrik telah dilakukan oleh beberapa peneliti dunia. Metode algoritma genetika pada kasus pencarian lokasi dan kapasitas pembangkit tersebar (*Distributed Generations*) dapat menurunkan rugi-rugi daya dan meningkatkan indeks tegangan bus pada sistem distribusi yang lemah [20], [21]. Kombinasi Algoritma Genetika, PSO, dan WIPSO dapat meningkatkan kestabilan tegangan [22]–[24]. Penempatan optimal bank kapasitor dan unit DG pada sistem distribusi radial menggunakan algoritma genetika untuk meminimalkan rugi-rugi daya dan mengurangi dampak harmonisa [25].

Algoritma genetika bekerja berdasarkan prinsip karakteristik evolusi suatu makhluk hidup. Titik fokus dalam melakukan proses optimasi tersebut yaitu representasi individu, penentuan individu terbaik (nilai fitness) dengan penerapan batasan nilai (konstrain) setiap individu, dan perkawinan silang hingga menemukan individu keturunan terbaik. Nilai Fitness dari kromosom bermanfaat pada proses selanjutnya, yaitu sebagai perbandingan besarnya fungsi obyektif pada setiap kromosom. Fungsi obyektif nantinya akan diurutkan menjadi indeks kromosom yang akan dipilih menjadi individu baru yang akan mengalami kawin silang berikutnya.

III. METODE

Alur penyelesaian metode optimasi algoritma genetika berdasarkan tujuan penelitian ini ditampilkan pada Gambar 3.

Implementasi hasil algoritma genetika pada penelitian ini adalah menentukan kandidat titik (bus) paralel dengan PLTS *on grid* beserta kapasitas dayanya. Sistem distribusi radial yang diuji adalah sistem 69 bus. Dalam mengidentifikasi letak PLTS pada bus dan



Gambar 3. Diagram alir program algoritma genetika

kapasitas dayanya digunakan sejumlah kromosom yang merepresentasikan nilai masing-masing kapasitas daya dan lokasinya. Berikut penjelasan alur tahapan algoritma genetika sesuai Gambar 3.

1. *Pengkodean Gen dan Menyusun Kromosom*; bit pertama pada satu string kromosom merupakan Gen-1. Apabila bit pertama bernilai biner 1 menandakan suatu kondisi sebuah bus dengan PLTS didalamnya. Apabila bit pertama bernilai 0 memberikan informasi sebuah bus tanpa PLTS. Kelompok Gen kedua sampai gen terakhir merepresentasikan ukuran kapasitas PLTS. Skema pengkodean biner pada kapasitas daya PLTS on grid diberikan oleh Persamaan (19),

$$X_i = R_b + \frac{R_a - R_b}{2^L - 1} \sum_j^L G_{ij} 2^{j-1}, \quad (19)$$

dimana R_a adalah atas atas variabel (P_{min}), R_b batas bawah variabel (P_{maks}), L panjang/jumlah bit pengkodean, G_{ij} nilai bit (0 atau 1) dari sebuah Gen pada suatu kromosom, 2^{j-1} koefisien *decoding* dari urutan Gen, dan X_i nilai riil suatu variabel.

2. *Menentukan Nilai Fitness Optimal* (terbaik) melalui fungsi minimisasi angka rugi daya aktif (P).

Fungsi objektif rugi-rugi daya aktif,

$$X_i = R_b + \frac{R_a - R_b}{2^L - 1} \sum_j^L G_{ij} 2^{j-1}. \quad (20)$$

3. *Menentukan set Konstrain*; dalam kasus pencarian lokasi dan kapasitas daya yang optimal pada PLTS on grid diberikan tiga batasan atau konstrain sebagai pertimbangan terhadap standar aturan jaringan pada sistem distribusi listrik.

- **Konstrain 1: batas kapasitas daya aktif PLTS (P_{PV})**

$$P_{PV}^{min} \leq P_{PV} \leq P_{PV}^{maks}, \quad (21)$$

nilai batas kapasitas daya PLTS on grid untuk satu lokasi yaitu $P_{min} = 30$ kW, dan $P_{maks} = 200$ kW, sesuai batas kapasitas terhubung pada sistem distribusi di luar pulau jawa [9].

- **Konstrain 2: batas total kapasitas daya aktif PLTS ($\% \sum P_{PV}$)** terhadap total beban penyulang $\sum P_{beban}$,

$$\% \sum P_{PV}^{min} \leq \% \sum P_{PV} \leq \% \sum P_{PV}^{maks}, \quad (22)$$

nilai batas total kapasitas daya aktif PLTS terhadap total beban penyulang yaitu $\% \sum P_{PV} (min) = 25\%$ dan $\% \sum P_{PV} (maks) = 50\%$.

- **Konstrain 3; Batas tegangan bus (V_i):**

$$V_i^{min} \leq V_i \leq V_i^{maks}, \quad (23)$$

Nilai batas tegangan bus yaitu $V_{min} = 0,95$ p.u, dan $V_{maks} = 1,05$ p.u, sesuai standard tegangan -10% dan +5% [9].

4. *Ranking Fitness*; Penskalaan nilai fitness diterapkan

untuk menyeleksi masing-masing individu, sehingga nilai fitness berada pada interval $f_{maks} - f_{min}$.

$$f_{(i)} = \frac{1}{N} \left(f_{maks} - (f_{maks} - f_{min}) * \frac{R_{(i)} - 1}{N - 1} \right), \quad (24)$$

dimana $f(i)$ adalah nilai fitness suatu individu (i), f_{maks} nilai fitness maksimum, f_{min} nilai fitness minimum, N jumlah populasi, dan $R(i)$ ranking individu ke- i .

5. *Roda Roulette* yaitu membuat nilai interval 0-1 dari nilai-nilai fitness suatu kromosom kemudian dibagi dengan nilai total fitness dari seluruh kromosom,

$$P_{index} = \sum_{i=1}^N \frac{f_{(i)}}{f_{Populasi}}. \quad (25)$$

6. *Crossover* (Pindah Silang); secara random dipilih satu titik potong, kemudian dari orang tua-1 bagian pertama digabungkan dengan orang tua-2 bagian kedua dari satu kromosom dalam satu populasi (P_c = Probabilitas *Crossover*).

$$Pindah\ silang = P_c \times Jumlah\ Gen. \quad (26)$$

7. *Mutasi* yaitu dengan mengubah gen yang sama kemudian ditukar dengan nilai kebalikannya (nilai 1 diubah menjadi 0, dan sebaliknya).

Pada penelitian ini dilakukan tiga kali simulasi optimasi dengan memperhitungkan batasan optimal peningkatan jumlah daya PV ($\% \sum P_{PV}$) yaitu peningkatan jumlah daya aktif (Watt) dari 25% sampai dengan 50% dari total beban penyulang. Hal ini diperlukan agar nilai agregat batas kapasitas PLTS on grid tidak melewati batas kapasitas beban pada penyulang. Dalam menyusun Algoritma Genetika, ditentukan beberapa parameter optimasi yaitu; Jumlah Gen = 10; Jumlah Populasi = 69; Kromosom = Ukuran populasi x Jumlah Gen; Jumlah Populasi = 100; Probabilitas *Crossover* = 0,80; Probabilitas Mutasi = 0,05.

Optimasi algoritma genetika pada setiap simulasi diterapkan berdasarkan tiga batasan (konstrain) yaitu (1) konstrain kapasitas daya aktif PLTS, (2) konstrain total kapasitas daya aktif PLTS dan (3) konstrain tegangan pada bus. Konstrain pertama yaitu batas kapasitas daya aktif di setiap lokasi PLTS dimaksudkan untuk memperoleh nilai kapasitas daya aktif maksimal untuk satu sistem PLTS pada satu lokasi grid. Konstrain kedua yaitu konstrain total kapasitas daya aktif PLTS yang dimaksudkan agar nilai total daya aktif PLTS secara keseluruhan dalam satu penyulang tidak melewati batas kapasitas beban pada penyulang. Konstrain ketiga dimaksudkan untuk memperoleh nilai tegangan pada sistem distribusi sesuai standar aturan jaringan.

Sistem distribusi radial yang diuji menggunakan algoritma genetika yaitu penyulang distribusi 69 bus. Gambar 4 menampilkan *single line diagram* saluran

distribusi. Beban daya aktif dan reaktif pada saluran distribusi yaitu 3,036 MW dan 1,833 Mvar. Pada Gambar 5 ditunjukkan grafik profil beban dan tegangan bus pada sistem distribusi kondisi awal (*existing*).

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

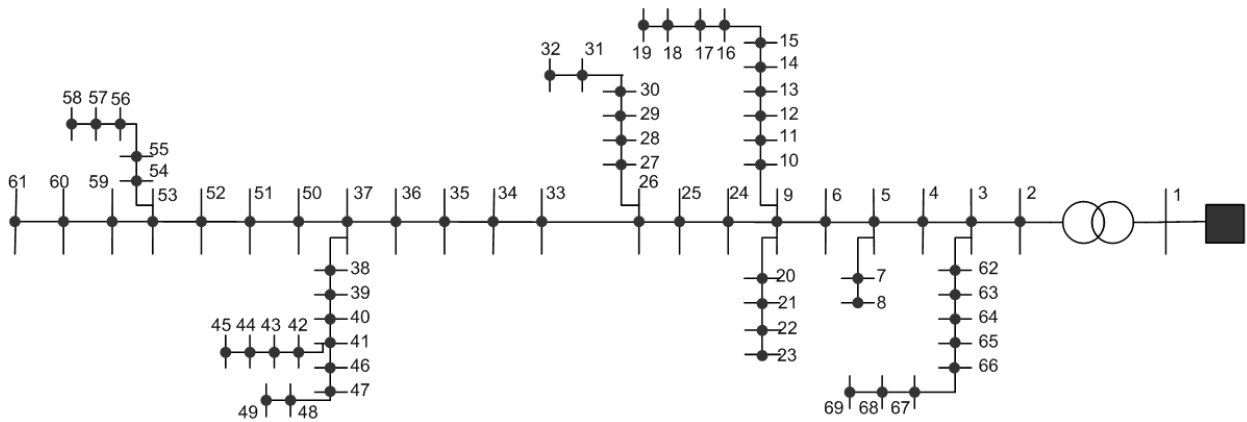
Hasil analisis aliran daya kondisi awal sistem distribusi tanpa kehadiran PLTS didalamnya menghasilkan total rugi-rugi daya aktif pada sistem distribusi yaitu sebesar 0,075 MW dari jumlah daya yang mengalir dari sumber daya utama ke beban yaitu sebesar 3,111 MW. Gambar 6 menampilkan grafik hasil optimasi sebagai fungsi minimisasi rugi-rugi daya aktif dari metode algoritma genetika multi konstrain. Nilai fungsi minimisasi rugi-rugi daya aktif merupakan nilai fitness terbaik. Berdasarkan hasil optimasi algoritma genetika dengan mengamati konstrain yang diterapkan, menemukan sejumlah variasi lokasi dan ukuran kapasitas daya PLTS *on grid* yang optimal.

Hasil simulasi-1 ditunjukkan pada Gambar 6(a) dimana konstrain 1 menghasilkan 7 lokasi bus serta kapasitas daya yang optimal masing-masing PLTS *on grid*. Konstrain 2 menghasilkan total kapasitas daya aktif PLTS *on grid* yaitu 1,156 MW pada nilai fitness 0,029 MW. Konstrain 3 menghasilkan profil tegangan paling terendah pada bus bus yaitu 0,96 p.u. Hasil optimasi GA pada simulasi-2

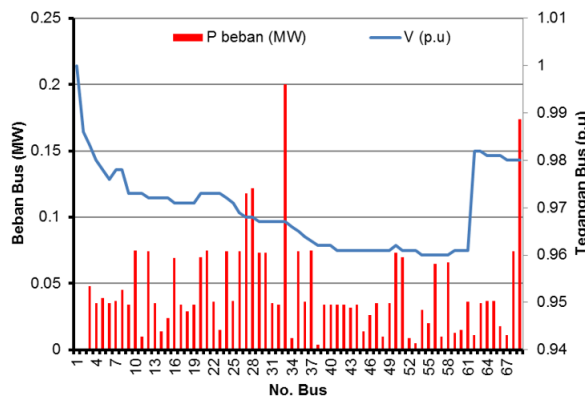
ditampilkan pada Gambar 6(b). Konstrain 1 menghasilkan 7 lokasi optimal serta kapasitas daya yang berbeda dari simulasi-1. Konstrain 2 menghasilkan total kapasitas daya aktif sebesar 1,243 MW atau sebesar 41% dari total beban penyulang. Pada konstrain 3 menghasilkan profil tegangan seluruh bus yang semakin naik atau semakin membaik. Nilai tegangan bus terendah yaitu 0,972 p.u. Optimasi pada simulasi-2 menghasilkan fitness terbaik pada nilai 0,023 MW. Hasil simulasi-3 yang ditampilkan pada gambar 6(c) menemukan adanya peningkatan jumlah sebaran lokasi PLTS *on grid*. Terdapat 11 lokasi serta kapasitas daya yang optimal untuk penerapan PLTS *on grid*. Total kapasitas daya aktif PLTS *on grid* sebesar 46% atau 1,385 MW dari total beban penyulang. Konstrain 3 menghasilkan profil tegangan setiap bus semakin naik dan atau semakin membaik. Nilai tegangan terendah pada bus yaitu 0,973 dan menghasilkan nilai fitness 0,022 MW.

Variasi lokasi injeksi (*grid*) dan kapasitas daya PLTS ditunjukkan pada Tabel 1. Berdasarkan hasil simulasi optimasi diperoleh nilai rugi-rugi daya aktif paling terkecil yaitu pada optimasi simulasi-3. Pada simulasi-3, jumlah dan sebaran lokasi PLTS *on grid* berbeda dengan simulasi-1 dan simulasi-2. Hal ini disebabkan oleh algoritma genetika yang diterapkan telah memenuhi batas konstrain yang telah ditetapkan.

Perbandingan tegangan bus pada penyulang sebelum dan setelah optimasi GA ditampilkan pada Gambar 7.



Gambar 4. Single line diagram sistem distribusi radial 69 bus



Gambar 5. Profil beban dan tegangan sistem distribusi kondisi awal

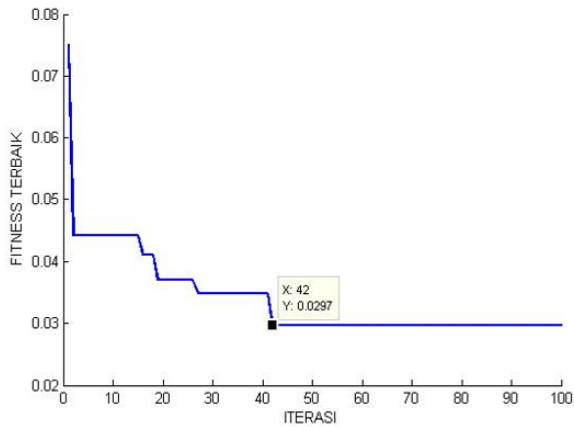
Masuknya sistem PLTS pada saluran distribusi pada beberapa lokasi dapat menurunkan total rugi-rugi daya dan memperbaiki nilai tegangan bus. Setelah masuknya PLTS berdasarkan hasil optimasi maka diperoleh nilai profil tegangan pada bus mengalami kenaikan. Perbandingan dari ketiga hasil simulasi menunjukkan kualitas tegangan terbaik berada pada simulasi-3 (46% PV). Penempatan lokasi PLTS *on grid* yang optimal berpengaruh pada naiknya level tegangan pada bus sebelum dan setelah

lokasi bus PLTS *on grid*. Hal ini menjelaskan bahwa variasi sebaran PLTS *on grid* yang lebih banyak akan berdampak lebih luas pada naiknya profil tegangan sistem distribusi. Namun pertimbangan kelayakan teknis terhadap kapasitas (*sizing*) PLTS *on grid* harus mempertimbangkan kemungkinan dampak merugikan pada sistem distribusi yaitu dapat menyebabkan aliran daya balik pada sistem distribusi listrik [26]

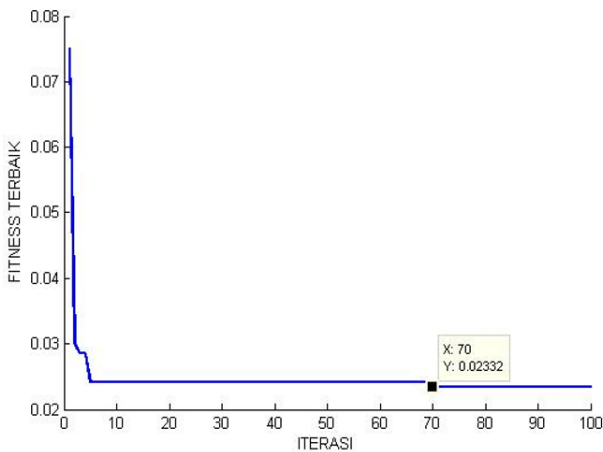
Hasil optimasi lokasi (*placement*) penyambungan

Tabel 1. Lokasi dan kapasitas PLTS *on grid*

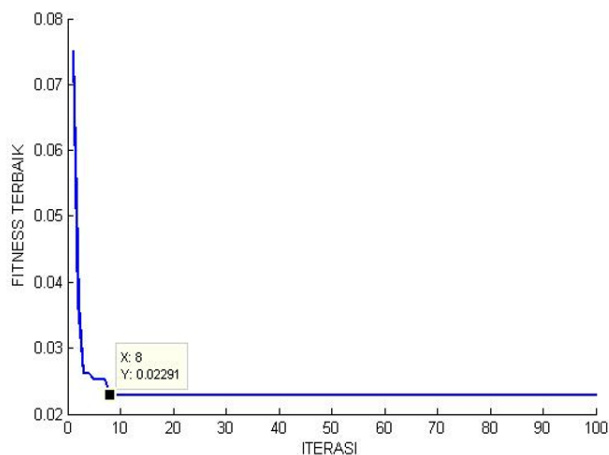
No Bus	Kapasitas PLTS (MW)	\sum PPV (MW)	% \sum PPV Terhadap \sum Beban	Rugi-rugi daya (MW)
39	0,194			
45	0,164			
50	0,175			
64	0,141	1,156	38%	0,029
65	0,166			
66	0,136			
69	0,180			
<hr/>				
34	0,193			
45	0,169			
49	0,160			
54	0,196	1,243	41%	0,023
56	0,169			
62	0,183			
68	0,173			
<hr/>				
15	0,129			
18	0,126			
19	0,146			
22	0,132			
32	0,115			
34	0,116	1,385	46%	0,022
39	0,102			
44	0,107			
51	0,150			
54	0,121			
59	0,141			



(a) Simulasi-1: \sum daya aktif PV = 38%

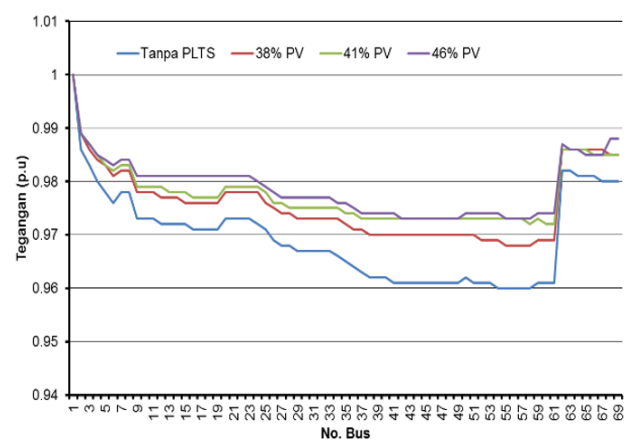


(b) Simulasi-2: \sum daya aktif PV = 41%



(c) Simulasi-3: \sum daya aktif PV = 46%

Gambar 6. Grafik proses iterasi pada algoritma genetika, (a) simulasi-1, (b) Simulasi-2, (c) Simulasi-3



Gambar 7. Perbandingan profil tegangan bus sebelum dan setelah optimasi algoritma genetika

pembangkit listrik tenaga surya yang diperoleh harus mempertimbangkan dampak dari PLTS *on grid* tidak melebihi kapasitas termal dan kapasitas hubung singkat pada sistem distribusi radial.

Performansi optimasi algoritma genetika yang digunakan pada penelitian ini dapat dibandingkan dengan penelitian lainnya yang berhubungan dengan kasus pencarian optimal pembangkit tersebar (*Distributed Generations-DG*). Optimasi algoritma genetika oleh Moradi M [22] menghasilkan 3 lokasi injeksi DG pada kasus sistem distribusi *IEEE 69 Bus* (Bus 21: 0,9297 MW, Bus 62: 1,0752 MW, dan Bus 64: 0,9848 MW). Optimasi algoritma genetika oleh Essallah S [20], pada kasus *IEEE 33 Bus* menghasilkan lokasi penempatan optimum pada Bus 14 (1,529 MVA); Bus 19 (1,949 MVA); Bus 25 (1,533 MVA); Bus 29 (2,076 MVA);, dan Bus 30 (1,984 MVA).

V. KESIMPULAN

Metode optimasi algoritma genetika multi konstrain yang digunakan pada penelitian ini bertujuan untuk memberikan solusi penempatan lokasi dan kapasitas daya PLTS *on grid* yang sesuai dengan kondisi awal pada sistem distribusi. Sistem distribusi yang diuji yaitu penyulang 69 bus konfigurasi radial. Simulasi optimasi algoritma genetika yang diterapkan berdasarkan tiga batasan (konstrain) yaitu konstrain tegangan, konstrain kapasitas PLTS, dan konstrain total kapasitas PLTS. Simulasi optimasi dilakukan sebanyak tiga kali dengan mempertimbangkan variasi lokasi dan kapasitas daya PLTS. Simulasi-1 menemukan 7 lokasi pada *grid* dengan total kapasitas daya aktif 1,156 MW (38%), simulasi-2 menemukan 7 lokasi *grid* dengan total kapasitas 1,243 MW (41%), dan simulasi-3 menemukan 11 lokasi *grid* dengan total kapasitas 1,385 MW (46%). Hasil yang optimal merupakan Fitness Terbaik atau rugi-rugi daya terendah. Metode optimasi yang digunakan menghasilkan penurunan total rugi-rugi daya aktif dari kondisi awal sebesar 2,4% menjadi 1,08% pada optimasi simulasi-3. Nilai tegangan bus menjadi lebih baik atau meningkat dari kondisi awal tegangan terendah pada bus mencapai 0,960 p.u kemudian naik menjadi 0,973 p.u pada optimasi simulasi-3. Variasi lokasi dan kapasitas daya aktif (Watt) pada PLTS berdampak pada naiknya level tegangan pada bus sebelum dan setelah lokasi *grid* PLTS.

UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan Terima kasih diberikan kepada Kementerian Riset, Teknologi, dan Pendidikan Tinggi Republik Indonesia sebagai pemberi dana hibah sehingga penelitian ini dapat terlaksana dengan baik (hibah penelitian dosen pemula).

REFERENSI

[1] Permen ESDM No. 49 Tahun 2018, "Penggunaan Sistem PLTS Surya Atap oleh Konsumen PT. PLN (Persero)," 2018.

[2] B. Sivaneasan, M. L. Lim, and K. P. Goh, "Overcoming Solar PV Intermittency using Demand Response Management in Buildings," in *Energy Procedia*, vol. 143, pp. 210–215, 2017.

[3] F. Katiraei and J. R. Agüero, "Solar PV integration challenges," *IEEE Power Energy Mag.*, 2011.

[4] J. R. Agüero, S. Member, and S. J. Steffel, "Integration Challenges of Photovoltaic Distributed Generation on Power Distribution Systems," in *IEEE Power and Energy Society General Meeting*, pp. 1–6, 2011.

[5] P. Chongfuangprinya, J. Spare, J. R. Agüero, J. H. R. Enslin, and H. Al-Atrash, "Integration of micro-scale Photovoltaic Distributed Generation on power distribution systems: Steady-state analyses," in *Transmission and Distribution Conference and Exposition (T D), 2012 IEEE PES*, pp. 1–6, 2012.

[6] F. Katiraei and J. R. Agüero, "Solar PV Integration Challenges," *IEEE Power Energy Mag.*, vol. 9, no. 3, pp. 62–71, 2011.

[7] M. R. Islam, F. Rahman, and W. Xu, *Green Energy and Technology Advances in Solar Photovoltaic Power Plants*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2016.

[8] S. Teleke, F. Jahanbakhsh, F. Katiraei, J. R. Agüero, and S. Member, "Analysis of Interconnection of Photovoltaic Distributed Generation," in *Industry Applications Society Annual Meeting*, 2011, pp. 1–6.

[9] PT. PLN (Persero), "Pedoman penyambungan pembangkit listrik energi terbarukan ke sistem distribusi PLN," 2014, no. 0357.K/DIR/2014.

[10] M. Bhattacharya and D. Das, "Multi-objective placement and sizing of DGs in distribution network using genetic algorithm," in *2016 National Power Systems Conference (NPSC)*, pp. 1–6, 2016.

[11] R. Shivarudraswamy, D. N. N. Gaonkar, Jayalakshmi N.S., and N. S. Jayalakshmi, "GA based optimal location and size of the distributed generators in distribution system for different load conditions," *1st IEEE Int. Conf. Power Electron. Intell. Control Energy Syst. ICPEICES 2016*, pp. 2–5, Jul. 2017.

[12] M. A. S. Masoum, M. Ladjevardi, A. Jafarian, and E. F. Fuchs, "Optimal Placement, Replacement and Sizing of Capacitor Banks in Distorted Distribution Networks by Genetic Algorithms," *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 19, no. 4, pp. 1794–1801, Oct. 2004.

[13] D. K. Tabarok *et al.*, "Optimizing the Placement of Distributed Generation (DG) and Capacitor in Distribution Radial System With Genetic Algorithm (GA) Method (Case Study At Watu Ulo feeder Jember)," *Berk. SAINSTEK*, vol. 1, no. 1, pp. 35–40, 2017.

[14] B. Yang, W. Li, Y. Zhao, and X. He, "Design and analysis of a grid-connected photovoltaic power system," *IEEE Trans. Power Electron.*, 2010.

[15] W. Yi-bo, W. Chun-sheng, L. Hua, and X. Hong-hua, "Steady-State Model and Power Flow Analysis of Grid-Connected Photovoltaic Power System," in *IEEE International Conference on Industrial Technology*, 2008, no. 6.

[16] Y. B. Wang, C. S. Wu, H. Liao, and H. H. Xu, "Steady-state model and power flow analysis of grid-connected photovoltaic power system," in *Proceedings of the IEEE International Conference on Industrial Technology*, 2008.

[17] Q. Alsafasfeh *et al.*, "Solar PV Grid Power Flow Analysis," *Sustainability*, vol. 11, no. 6, p. 1744, Mar. 2019.

[18] T. Gönen, "Electric power distribution engineering," in *Electric power distribution engineering*, 2014.

[19] H. Musa, L. A. Yusuf, and S. S. Adamu, "Power Flow Studies for Radial Distribution Systems With Distributed Generation," *J. Res. Innov. Eng.*, vol. 1, no. 1, pp. 20–30, 2016.

[20] S. Essallah, A. Bouallegue, and A. Khedher, "Optimal Sizing and Placement of DG Units in Radial Distribution System," *Int. J. Renew. Energy Res.*, vol. 8, no. 1, 2018.

- [21] T. Shukla, S. Singh, and K. Naik, "Allocation of optimal distributed generation using GA for minimum system losses in radial distribution networks," *Int. J. Eng. Sci. Technol.*, vol. 2, no. 3, pp. 94–106, 2010.
- [22] M. H. H. Moradi and M. Abedini, "A combination of genetic algorithm and particle swarm optimization for optimal distributed generation location and sizing in distribution systems," *Int. J. Green Energy*, vol. 9, no. 7, pp. 641–660, 2012.
- [23] I. Ziari, G. Ledwich, A. Ghosh, D. Cornforth, and M. Wishart, "Optimal allocation and sizing of DGs in distribution networks," in *IEEE PES General Meeting, PES 2010*, 2010.
- [24] A. Rajendran and K. Narayanan, "Optimal Installation of Different DG Types in Radial Distribution System Considering Load Growth," *Electr. Power Components Syst.*, vol. 45, no. 7, pp. 739–751, Apr. 2017.
- [25] S. A. Taher, M. Hasani, and A. Karimian, "A novel method for optimal capacitor placement and sizing in distribution systems with nonlinear loads and DG using GA," *Commun. Nonlinear Sci. Numer. Simul.*, 2011.
- [26] R. A. Shayani and M. A. G. De Oliveira, "Photovoltaic generation penetration limits in radial distribution systems," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 26, no. 03, pp. 1625–1631, 2011.

Penerbit:

Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Syiah Kuala

Jl. Tgk. Syech Abdurrauf No. 7, Banda Aceh 23111

website: <http://jurnal.unsyiah.ac.id/JRE>

email: rekayasa.elektrika@unsyiah.net

Telp/Fax: (0651) 7554336

