

Rekonfigurasi Dinamis Jaring Distribusi Radial 20 kV Teluk Betung untuk Meningkatkan Profil Tegangan dengan Mempertimbangkan Gangguan Saluran dan Injeksi *Renewable Energy*

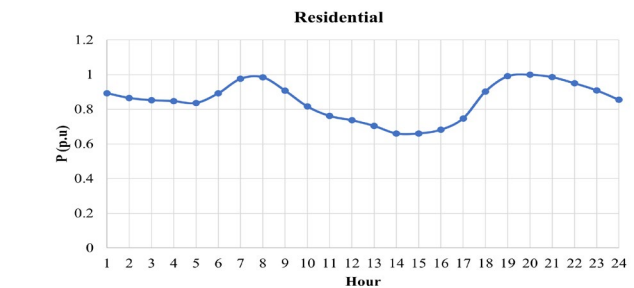
Fachri Azca Haidar Fayumi, Dimas Fajar Uman Putra, dan Ni Ketut Aryani
Departemen Teknik Elektro, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)
e-mail: dimasfup@ee.its.ac.id

Abstrak—Sistem distribusi tenaga listrik semakin berkembang yang ditandai dengan meningkatnya permintaan energi listrik. Terlebih lagi, keberadaan pembangkit listrik dengan sumber terbarukan semakin berkembang dan meluas. Pada kenyataannya, nilai beban dan pembangkitan sumber energi terbarukan selalu berubah. Semakin meningkatnya permintaan energi listrik serta nilai beban yang selalu berubah menyebabkan permasalahan seperti kerugian daya dan penurunan tegangan. Permasalahan ini dapat diselesaikan dengan melakukan rekonfigurasi dinamis yang memperhatikan energi terbarukan dan dinamika perubahan beban. Rekonfigurasi dinamis dilakukan pada jaringan distribusi radial 20 kV ULP Teluk Betung kota Bandar Lampung dengan metode *Binary Particle Swarm Optimization* (BPSO) untuk mengurangi kerugian daya dan meningkatkan nilai tegangan pada jaringan distribusi. Metode Newton-Raphson digunakan sebagai metode aliran daya pada studi rekonfigurasi dinamis ini. Berdasarkan hasil simulasi dan analisis pada sistem distribusi yang terjadi gangguan pemutusan saluran dan terpasang sistem PV, setelah dilakukan rekonfigurasi dinamis pada sistem distribusi didapatkan bahwa dalam waktu 24 jam terjadi pengurangan kerugian daya aktif adalah sebesar 47,001% dan pengurangan kerugian daya reaktif adalah sebesar 46,866%. Nilai tegangan rata-rata pada sistem distribusi dalam 24 jam adalah sebesar 0,98947 p.u dan dengan nilai tegangan minimum adalah sebesar 0,95444 p.u. Dari hasil simulasi dan analisis, rekonfigurasi dinamis dengan metode BPSO mampu meningkatkan nilai tegangan dan menurunkan kerugian daya pada sistem distribusi yang terjadi gangguan saluran dan terpasang sistem PV.

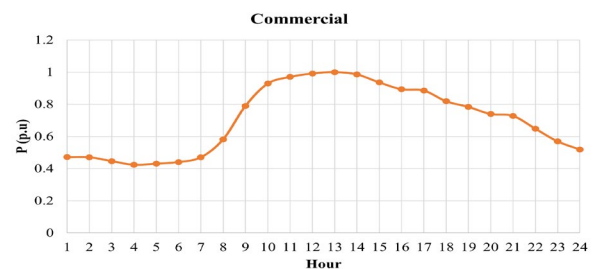
Kata Kunci—*Binary Particle Swarm Optimization* (BPSO), Pengurangan Kerugian Daya, Peningkatan Profil Tegangan, *Photovoltaic*, Rekonfigurasi Jaringan Dinamis, Sistem Distribusi.

I. PENDAHULUAN

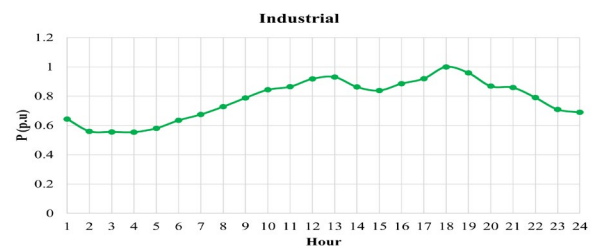
PERKEMBANGAN sosial ekonomi yang cepat menyebabkan kebutuhan energi listrik oleh konsumen terutama di sektor industri dan komersial pada sisi distribusi semakin meningkat [1]. Peningkatan kebutuhan energi listrik mengakibatkan peningkatan arus yang akan meningkatkan kerugian daya dan *drop* tegangan pada jaringan. Kerugian daya dipengaruhi oleh arus resistansi dan reaktansi penyulang [2]. Selain itu, permasalahan lain yang mungkin terjadi adalah gangguan pada saluran, seperti saluran putus karena *short circuit*, fenomena alam atau sistem yang abnormal. Semakin banyaknya *renewable energy* (RE), misalnya *photovoltaic* (PV), yang pembangkitannya tidak menentu di jaringan distribusi juga menjadi tantangan karena dapat



Gambar 1. Jenis kurva beban harian residensial.



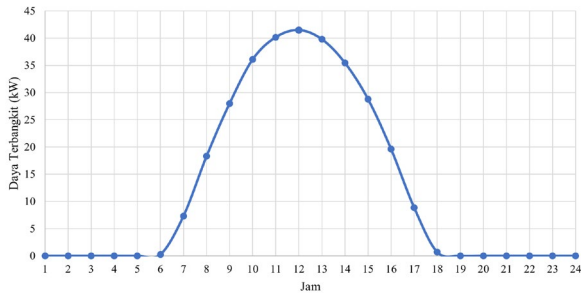
Gambar 2. Jenis kurva beban harian komersial.



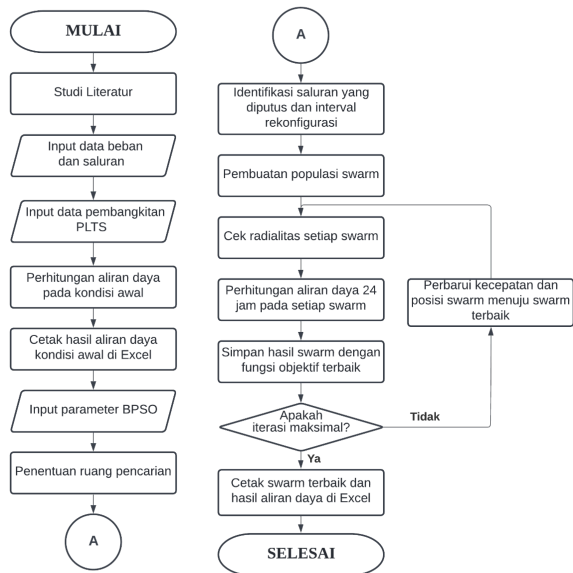
Gambar 3. Jenis kurva beban harian industrial.

mempengaruhi karakteristik penyulang [3]. Oleh karena pentingnya jaringan distribusi, maka PT PLN (Persero) sebagai penyedia jasa listrik di Indonesia harus selalu menjaga kualitas jaringan distribusi. Salah satu solusi untuk menyelesaikan permasalahan kerugian daya dan drop tegangan dengan mempertimbangkan RE yang keluaran dayanya bervariasi adalah dengan rekonfigurasi dinamis jaringan distribusi [4].

Penelitian mengenai rekonfigurasi jaringan distribusi telah berhasil menyelesaikan permasalahan pada sistem distribusi, seperti perbaikan profil tegangan, perbaikan kerugian daya, dan juga untuk menaikkan indeks stabilitas tegangan [5-7]. Pengembangan rekonfigurasi jaringan distribusi dengan interval pernah dianalisis untuk menurunkan kerugian daya [8]. Pada penelitian sebelumnya, telah dilakukan studi



Gambar 4. Data pembangkitan PV.



Gambar 5. Urutan pelaksanaan penelitian.

rekonfigurasi jaringan distribusi radial 20 kV Teluk Betung, namun hanya memperhatikan kondisi tertentu. Oleh karena itu, akan dilakukan pengembangan berupa studi rekonfigurasi dinamis jaringan distribusi radial 20 kV Teluk Betung yang memperhatikan dinamika beban dan pembangkitan PV serta gangguan saluran [9].

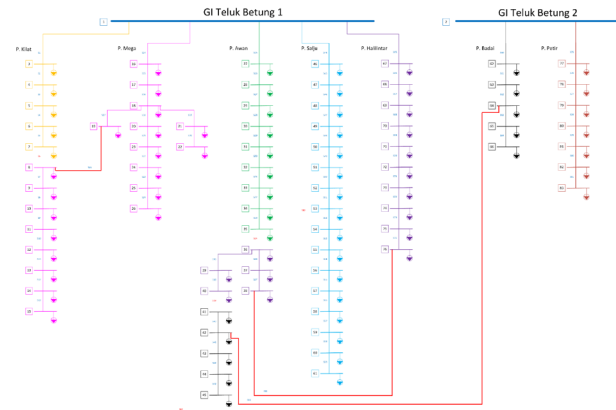
II. DASAR TEORI

A. Sistem Jaringan Distribusi Radial

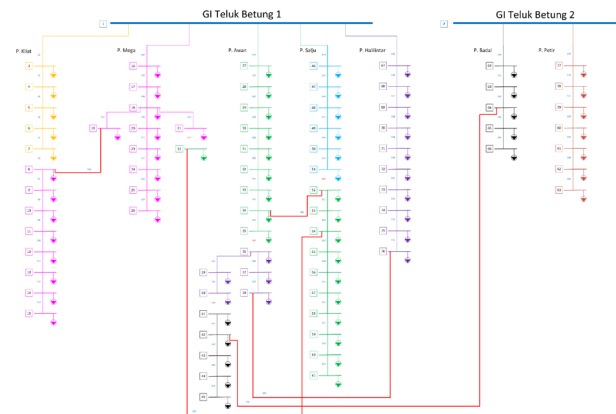
Sistem distribusi merupakan bagian dari sistem tenaga listrik yang berfungsi menyalurkan energi listrik ke konsumen [10]. Terdapat 2 jenis jaringan distribusi, yaitu : jaringan distribusi tegangan menengah (JDTM) dengan tegangan 6 kV atau 20 kV dan jaringan distribusi tegangan rendah (JDTR) dengan tegangan 220 V atau 380 V [11]. Pada jaringan distribusi, topologi yang biasa digunakan adalah topologi radial karena lebih ekonomis [6].

B. Sistem Jaringan Distribusi Radial

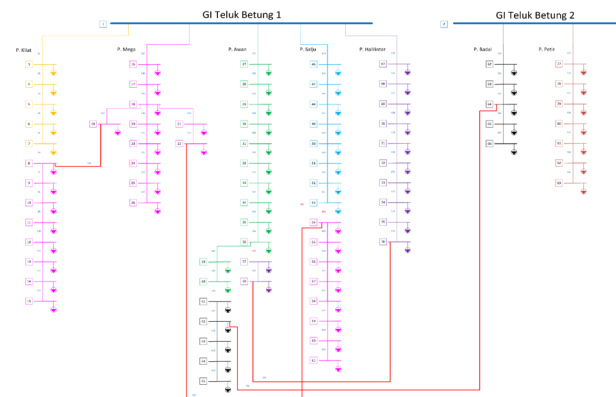
Cahaya matahari dapat diubah menjadi energi listrik dengan menggunakan *Photovoltaic* (PV) [12]. PV sering dipasang di perumahan atau berupa PV *farm* yang secara khusus terhubung dengan jaringan distribusi. Salah satu tantangan PV di jaringan distribusi adalah intermitensi daya PV yang menyebabkan fluktuasi tegangan [13]. Daya keluaran PV dipengaruhi oleh nilai insolasi matahari dan suhu modul PV. Nilai daya keluaran PV dapat dihitung melalui persamaan berikut [12]:



Gambar 6. Hasil rekonfigurasi sebelum gangguan.



Gambar 7. Hasil rekonfigurasi saat gangguan..



Gambar 8. Hasil rekonfigurasi setelah gangguan.

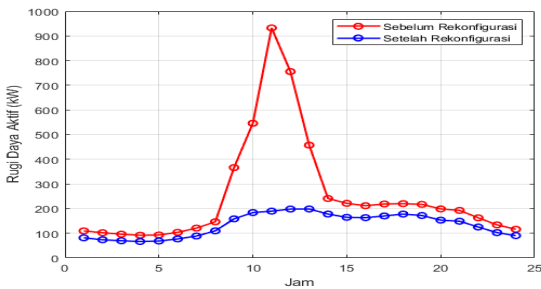
$$P_{PV} = M \left(P_{STC} \times \frac{G_{ING}}{G_{STC}} + (1 + k(T_c - T_r)) \right) \quad (1)$$

dengan keterangan sebagai berikut:

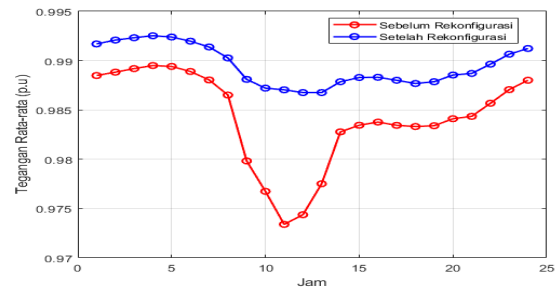
- P_{PV} : daya keluaran PV
- P_{STC} : daya keluaran maksimal PV pada STC (W)
- M : jumlah modul PV
- k : koefisien suhu (%/°C)
- G_{ING} : nilai insolasi matahari sebenarnya (W/m²)
- G_{STC} : nilai insolasi matahari pada STC (1000 W/m²)
- T_c : nilai suhu pada modul PV (°C)
- T_r : nilai suhu referensi (°C)

C. Analisis Aliran Daya

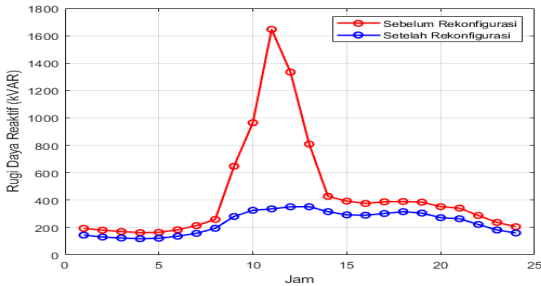
Analisis aliran daya atau disebut juga *Load Flow* menjadi dasar dari desain dan analisis sistem tenaga listrik. Melalui analisis ini, parameter dalam sistem tenaga dapat dianalisis



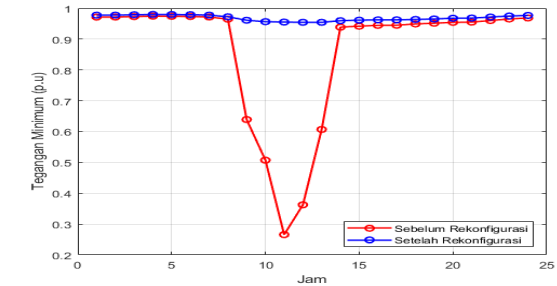
Gambar 9. Perbandingan kerugian daya sistem aktif.



Gambar 11. Perbandingan tegangan sistem rata-rata.



Gambar 10. Perbandingan kerugian daya sistem reaktif.



Gambar 12. Perbandingan tegangan sistem minimum.

[14]. Terdapat beberapa metode yang dapat digunakan, salah satunya adalah Newton-Raphson. Melalui metode ini, arus dan daya kompleks yang mengalir dapat dihitung menggunakan persamaan berikut [14]:

$$I_i = \sum_{j=1}^n Y_{ij} V_j \quad (2)$$

$$P_i - jQ_i = V_i^* I_i \quad (3)$$

Dengan memasukkan persamaan (2) ke dalam persamaan (3) dan mengubah dalam bentuk polar, maka diperoleh persamaan sebagai berikut [14]:

$$P_i - jQ_i = |V_i| \angle -\delta_i \sum_{j=1}^n |Y_{ij}| |V_j| \angle \theta_{ij} + \delta_j \quad (4)$$

$$P_i = \sum_{j=1}^n |V_i| |V_j| |Y_{ij}| \cos(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad (5)$$

$$Q_i = - \sum_{j=1}^n |V_i| |V_j| |Y_{ij}| \sin(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad (6)$$

Persamaan (5) dan (6) adalah persamaan non-linier dari daya aktif dan reaktif. Lalu dilakukan ekspansi sehingga menghasilkan matriks Jacobian pada persamaan (7). Maka dapat diperoleh nilai perkiraan tegangan pada bus i pada setiap iterasi k tertulis pada persamaan (8) [14]:

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_1 & J_2 \\ J_3 & J_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta |V| \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$|V_i^{(k+1)}| = |V_i^{(k)}| + \Delta |V_i^{(k)}| \quad (8)$$

dengan keterangan sebagai berikut:

- I_i : arus yang mengalir pada saluran i
- Y_{ij} : admitansi antara bus i dengan bus j
- V_i : tegangan pada bus i
- ΔP : perubahan daya aktif
- J : matriks Jacobian
- $\Delta |V|$: perubahan *magnitude* tegangan
- $V_i^{(k)}$: tegangan pada iterasi k
- P_i : daya aktif menuju bus i
- Q_i : daya reaktif menuju bus i
- δ_i : sudut delta tegangan
- ΔQ : perubahan daya reaktif

- $\Delta \delta$: perubahan sudut delta tegangan
- $V_i^{(k+1)}$: tegangan pada iterasi $k + 1$

D. Rekonfigurasi Dinamis Jaringan Distribusi

Rekonfigurasi jaringan distribusi berfungsi mengubah kondisi *open/closed* dari *tie-switch* untuk mengatur ulang topologi penyulang distribusi. Rekonfigurasi jaringan mampu memperbaiki kondisi sistem distribusi [15]. Struktur jaringan juga harus dijaga agar tetap radial.

Terdapat dua jenis rekonfigurasi yaitu rekonfigurasi statis yang berfokus pada waktu tertentu dan dinamis yang memperhatikan perubahan beban dan pembangkitan RE pada jaringan distribusi [16]. Rekonfigurasi dinamis sangat penting karena keberadaan RE yang semakin banyak pada jaringan distribusi saat ini.

E. Binary Particle Swarm Optimization (BPSO)

Algoritma PSO terinspirasi dari sekawanan hewan yang bergerak secara abstrak namun dapat menuju tempat yang paling optimal [17]. Terdapat individu yang memiliki nilai posisi dan kecepatan yang selalu berubah di setiap iterasinya [5]. Nilai *Pbest* akan dibandingkan dengan nilai *Gbest* dan dipilih nilai paling optimal untuk menjadi acuan [7].

Salah satu variasi PSO adalah *Binary Particle Swarm Optimization* (BPSO) yang cocok digunakan untuk permasalahan optimasi yang bersifat diskrit. Pada algoritma BPSO domain dari ruang pencarian PSO diubah menjadi domain biner. Proses pengubahan juga diterapkan pada rentang kecepatan serta posisi. Pada rekonfigurasi jaringan distribusi, individu yang bernilai “1” menandakan switch yang terbuka, sedangkan yang bernilai “0” menandakan switch yang tertutup [18].

III. METODOLOGI DAN PEMODELAN SISTEM

A. Metode BPSO

Penelitian ini menerapkan metode BPSO dengan fungsi sigmoid yang menyebabkan hasil output menjadi biner. *Loop* atau ruang pencarian ditentukan terlebih dahulu. Ruang

Tabel 1.
Data parameter BPSO

Parameter	Nilai
Iterasi	200
W_{max}	0.9
W_{min}	0.4
C1	2.0
C2	2.0

Tabel 2.
Data generator bus sistem

NO	Nama Gardu Induk	V (p.u)	MVA
1	Teluk Betung #1 (Trafo 1)	1.0	100
2	Teluk Betung #2 (Trafo 2)	1.0	100

Tabel 3.
Data saluran

NO	Jenis Kabel	Ukuran kabel (mm ²)	R (Ω/km)	X (Ω/km)
1	A3C	150	0,21	0,37357

Tabel 4.
Data rencana saluran baru dan eksisting

Nama	Dari bus	Ke bus	Status	l (km)	R (Ω/km)	X (Ω/km)
S82	34	52	Eksisting	0.1	0.005	0.009
S83	38	76	Eksisting	0.1	0.005	0.009
S84	42	64	Baru	0.41	0.022	0.038
S85	30	79	Baru	0.305	0.016	0.028
S86	8	19	Baru	0.207	0.011	0.019
S87	22	54	Baru	0.209	0.011	0.019

pencarian merupakan *loop* yang tersusun atas saluran lama dan saluran baru. Di dalam setiap *loop* akan didapatkan posisi *tie switch* yang merupakan solusi paling optimal. Data Parameter BPSO ditunjukkan pada Tabel 1 [19].

Swarm dengan nilai *fitness* terbaik akan menjadi nilai acuan yang akan disimpan dalam variabel *Pbest* untuk nilai *fitness* terbaik dalam setiap *swarm* dan variabel *Gbest* untuk nilai *fitness* terbaik dari keseluruhan *swarm*. Pergerakan setiap partikel sesuai dengan persamaan berikut:

$$V_{ir+1} = w \times V_{ir} + c_1 \times rand \times (P_{best_{ir}} - X_{ir}) + c_2 \times rand \times (G_{best_{ir}} - X_{ir}) \quad (9)$$

$$s(v_{ir+1}) = \frac{loop_i}{1+e^{-v_{ir+1}}} \quad (10)$$

$$X_{ir+1} = loop_i(s(v_{ir+1})) \quad (11)$$

$$w = w_{max} - (w_{max} - w_{min}) \times \left(\frac{iter}{max_{iter}}\right) \quad (12)$$

dengan keterangan sebagai berikut:

- X_{ir} : posisi individu sekarang
- V_{ir} : kecepatan individu sekarang
- X_{ir+1} : posisi individu iterasi selanjutnya
- V_{ir+1} : kecepatan individu iterasi selanjutnya
- rand* : nilai random antara 0 – 1
- w* : nilai inersia
- w_{max} : nilai inersia maksimal
- s* : fungsi sigmoid
- c_1 : konstanta *cognitive*
- c_2 : konstanta *social acceleration*
- $P_{best_{ir}}$: posisi terbaik dari individu
- $G_{best_{ir}}$: posisi terbaik dari populasi
- iter* : iterasi saat ini
- max_{iter} : nilai iterasi maksimal

Tabel 5.
Data loop pencarian rekonfigurasi

LOOP	Saluran
1	S36, S38, S39, S40, S60, S61, S62, S84
2	S25, S26, S27, S28, S75, S76, S77, S85
3	S1, S2, S3, S4, S5, S6, S14, S15, S16, S17, S86
4	S29, S30, S31, S32, S44, S45, S46, S47, S48, S49, S50, S82
5	S34, S35, S37, S65, S66, S67, S68, S69, S70, S71, S72, S73, S74, S83
6	S14, S15, S16, S18, S19, S20, S51, S52, S87

Tabel 6.
Hasil simulasi sebelum gangguan

Kondisi Sebelum Gangguan	Sebelum Rekonfigurasi	Setelah Rekonfigurasi
<i>Tie switch</i>	S84 S85 S86 S82 S83 S87	S39 S85 S6 S82 S34 S87
Kerugian daya aktif total	864,078 kW	635,283 kW
Pengurangan kerugian daya aktif	-	26,478%
Kerugian daya reaktif total	1530,024 kVAR	1126,467 kVAR
Pengurangan kerugian daya reaktif	-	26,376%
Tegangan rata-rata sistem dalam 24 jam	0,98861 p.u	0,99183 p.u
Tegangan minimum sistem dalam 24 jam	0,96470 p.u (Bus 15 – Jam ke-8)	0,97237 p.u (Bus 61 – Jam ke-8)

w_{min} : nilai inersia minimal

$loop_i$: panjang loop ke-i

B. Fungsi Objektif

Fungsi objektif yang digunakan adalah untuk meminimalkan rugi-kerugian daya.

$$F = \min(\sum_{k=1}^M I_k^2 \times R_k) \quad (13)$$

C. Fungsi Batasan

Fungsi batasan yang digunakan adalah batasan keseimbangan daya aktif, radialitas, dan nilai tegangan.

a) Keseimbangan daya aktif

$$\sum_{j=1}^L P_{gen_j} = \sum_{k=1}^M P_{loss_k} + \sum_{l=1}^N P_{load_l} \quad (14)$$

b) Radialitas sistem

$$\sum_{k=1}^M S_k = 1 \quad (15)$$

c) Tegangan setiap bus

$$0.9 \leq V_{bus_i} \leq 1.05 \quad (16)$$

dengan keterangan sebagai berikut:

- F* : fungsi objektif
- M* : jumlah saluran
- I_k : arus yang mengalir pada saluran ke-*k*
- R_k : nilai resistansi saluran ke-*k*
- L* : jumlah bus generator
- M* : jumlah saluran
- N* : jumlah bus beban
- P_{gen_j} : daya aktif pada generator ke-*j*
- P_{loss_k} : kerugian daya aktif pada saluran ke-*k*
- P_{load_l} : beban aktif pada bus beban ke-*l*
- S_k : kondisi *switch* pada saluran ke-*k*
- V_{bus_i} : besar tegangan pada bus ke-*i*

Tabel 7.
Hasil simulasi saat gangguan

Kondisi Saat Gangguan	Sebelum Rekonfigurasi	Setelah Rekonfigurasi
<i>Tie switch</i>	S84 S85 S86	S39 S85 S6
	S82 S83 S87	S50 S34 S20
Kerugian daya aktif total	3057,748 kW	928,350 kW
Pengurangan kerugian daya aktif	-	69,639%
Kerugian daya reaktif total	5401,214 kVAR	1645,017 kVAR
Pengurangan kerugian daya reaktif	-	69,544%
Tegangan rata-rata sistem dalam 24 jam	0,97638 p.u	0,98717 p.u
Tegangan minimum sistem dalam 24 jam	0,26578 p.u (Bus 22 – Jam ke-11)	0,95444 p.u (Bus 61 – Jam ke-13)

Tabel 8.
Hasil simulasi setelah gangguan

Kondisi Setelah Gangguan	Sebelum Rekonfigurasi	Setelah Rekonfigurasi
<i>Tie switch</i>	S84 S85 S86	S39 S85 S6
	S82 S83 S87	S82 S35 S52
Kerugian daya aktif total	2133,917 kW	1645,827 kW
Pengurangan kerugian daya aktif	-	22,873%
Kerugian daya reaktif total	1530,024 kVAR	1126,467 kVAR
Pengurangan kerugian daya reaktif	-	26,376%
Tegangan rata-rata sistem dalam 24 jam	0,98861 p.u	0,99183 p.u
Tegangan minimum sistem dalam 24 jam	0,96470 p.u (Bus 15 – Jam ke-14)	0,97237 p.u (Bus 61 – Jam ke-14)

Tabel 9.
Hasil simulasi dalam 24 jam

Kondisi Setelah Gangguan	Sebelum Rekonfigurasi	Setelah Rekonfigurasi
Kerugian daya aktif total	6055,743 kW	3209,460 kW
Pengurangan kerugian daya aktif	-	47,001%
Kerugian daya reaktif total	10713,819 kVAR	5692,665 kVAR
Pengurangan kerugian daya reaktif	-	46,866%
Tegangan rata-rata sistem dalam 24 jam	0,98417 p.u	0,98947 p.u
Tegangan minimum sistem dalam 24 jam	0,26578 p.u (Bus 22 – Jam ke-11)	0,95444 p.u (Bus 61 – Jam ke-13)

D. Data Generatur Bus

Data dari Gardu Induk Teluk Betung yang digunakan disajikan pada Tabel 2.

E. Data Saluran

Saluran pada ULP Teluk Betung menggunakan jenis kabel A3C dengan data saluran ang disajikan pada Tabel 3.

F. Data Kurva Beban Harian

Terdapat tiga jenis kurva beban harian. Kurva beban harian dibutuhkan untuk memperoleh detail beban setiap jam. Hal ini dapat dilihat pada Gambar 1, Gambar 2, dan Gambar 3 [20].

G. Sistem Jaringan Distribusi Radial

1) Menentukan Rencana Saluran Baru

Daftar saluran baru yang direncanakan ditunjukkan pada Tabel 4.

2) Menentukan Ruang Pencarian pada Sistem

Terdapat enam loop pencarian yang disajikan pada Tabel 5.

H. Pemodelan PV

Arah aliran arus beban searah dengan aliran daya karena beban menyerap daya aktif dan reaktif. Apabila terdapat DG, maka arah aliran daya akan berlawanan. PV dimodelkan sebagai beban negatif dengan *unity power factor* [21]. Nilai kapasitas PV bergantung pada luas area pemasangannya. Berdasarkan pertimbangan teknis dan ekonomi diperoleh perbandingan daya terbangkit PV terhadap luas area adalah sebesar 3:20. Grafik pembangkitan PV dapat dilihat pada Gambar 4.

I. Urutan Pelaksanaan

Diagram alir urutan pelaksanaan penelitian studi rekonfigurasi dinamis jaringan distribusi 20 kV Teluk Betung disajikan pada Gambar 5.

IV. ANALISIS HASIL DAN PEMBAHASAN

Sistem yang akan dianalisis merupakan sistem distribusi Teluk Betung tanpa menggunakan GI Tarahan. Pada sistem ini terdapat 83 bus beban dan terpasang 3 buah sistem PV. Pada sistem ini juga, terdapat gangguan pemutusan saluran.

Sebelum dilakukan rekonfigurasi, *tie switch* yang terbuka adalah S84, S85, S86, S82, S83 dan S87. Saat sebelum gangguan, konfigurasi ini menghasilkan kerugian daya aktif dan reaktif sebesar 864,078 kW dan 1530,024 kVAR, dengan tegangan rata-rata dan minimum sistem sebesar 0,98861 p.u dan 0,96470 p.u. Saat gangguan terjadi, menghasilkan kerugian daya aktif dan reaktif sebesar 3057,748 kW dan 5401,214 kVAR, dengan tegangan rata-rata dan minimum sistem sebesar 0,97638 p.u dan 0,26578 p.u. Saat setelah gangguan, menghasilkan kerugian daya aktif dan reaktif sebesar 2133,917 kW dan 1530,024 kVAR, dengan tegangan rata-rata dan minimum sistem sebesar 0,98861 p.u dan 0,96470 p.u. Hasil simulasi sebelum gangguan terdapat pada Tabel 6, untuk hasil simulasi saat gangguan terdapat pada Tabel 7, sedangkan hasil simulasi setelah gangguan disajikan pada Tabel 8.

Setelah rekonfigurasi, konfigurasi *tie switch* yang terbuka pada sistem berubah tiga kali, yaitu sebelum gangguan (01.00–08.00), saat gangguan (09.00–13.00), dan setelah gangguan (14.00–24.00). *Tie switch* yang terbuka sebelum gangguan adalah S39, S85, S6, S82, S34 dan S87 seperti pada

gambar 6. Nilai kerugian daya aktif dan reaktif sistem menjadi 635,283 kW dan 1126,467 kVAR. Pengurangan kerugian daya aktif dan reaktif sebesar 26,478% dan 26,376%. Hasil rekonfigurasi menyebabkan tegangan rata-rata dan minimum sistem menjadi 0,99183 p.u dan 0,97237 p.u. Hasil simulasi dalam 24 jam disajikan pada Tabel 9.

Setelah rekonfigurasi, konfigurasi *tie switch* yang terbuka pada sistem berubah tiga kali, yaitu sebelum gangguan (01.00–08.00), saat gangguan (09.00–13.00), dan setelah gangguan (14.00–24.00). *Tie switch* yang terbuka sebelum gangguan adalah S39, S85, S6, S82, S34 dan S87 seperti pada gambar 6. Nilai kerugian daya aktif dan reaktif sistem menjadi 635,283 kW dan 1126,467 kVAR. Pengurangan kerugian daya aktif dan reaktif sebesar 26,478% dan 26,376%. Hasil rekonfigurasi menyebabkan tegangan rata-rata dan minimum sistem menjadi 0,99183 p.u dan 0,97237 p.u.

Tie switch yang terbuka saat gangguan adalah S39, S85, S6, S50, S34, dan S20 seperti pada Gambar 7. Nilai kerugian daya aktif dan reaktif sistem menjadi 928,350 kW dan 1645,017 kVAR. Pengurangan kerugian daya aktif dan reaktif sebesar 69,639%. dan 69,544% Hasil rekonfigurasi menyebabkan tegangan rata-rata dan minimum sistem menjadi 0,98717 p.u dan 0,95444 p.u. Terdapat dua pasang *switching event* antara sebelum dan saat gangguan.

Tie switch yang terbuka setelah gangguan adalah S39, S85, S6, S82, S35, dan S52 seperti pada Gambar 8. Nilai kerugian daya aktif dan reaktif sistem menjadi 1645,827 kW dan 1126,467 kVAR. Pengurangan kerugian daya aktif dan reaktif sebesar 22,873%. dan 26,376% Hasil rekonfigurasi menyebabkan tegangan rata-rata dan minimum sistem menjadi 0,99183 p.u dan 0,97237 p.u. Terdapat tiga pasang *switching event* antara saat dan setelah gangguan. Grafik perbandingan kerugian daya dan keadaan tegangan pada kondisi 4 dapat dilihat pada Gambar 9, Gambar 10, Gambar 11, dan Gambar 12. Garis merah pada grafik menunjukkan keadaan sistem distribusi sebelum dilakukan rekonfigurasi dinamis, sedangkan garis biru pada grafik menunjukkan keadaan sistem distribusi setelah dilakukan rekonfigurasi dinamis. Secara total, terjadi penurunan kerugian daya aktif dan reaktif sebesar 47,001% dan 46,866% dengan tegangan rata-rata dan minimum 0,98947 p.u dan 0,95444 p.u.

V. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil simulasi dan analisis, maka dapat ditarik kesimpulan: (1) PV dapat membantu suplai daya gardu induk, sehingga dapat menurunkan kerugian daya dan meningkatkan tegangan. (2) Kerugian daya dan drop tegangan akan meningkat pada penyulang yang mendapat tambahan beban. Kerugian daya dan drop tegangan akan berkurang pada penyulang yang berkurang bebannya. (3) Hasil simulasi menunjukkan ketika sistem distribusi dilakukan rekonfigurasi dinamis, maka terjadi pengurangan kerugian daya aktif dan reaktif sebesar 47,001% dan 46,866% dengan tegangan rata-rata dan minimum adalah sebesar 0,95444 p.u dan 0,98947 p.u secara berurutan. (4) Bus beban dengan saluran yang terkena gangguan pemutusan harus disuplai oleh penyulang lain.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] G. Canzhi, B. Zhejing, and Y. Wenjun, "Dynamic reconfiguration of distribution network with PV generation prediction based on credibility theory," in *2016 Chinese Control and Decision Conference (CCDC)*, May 2016, pp. 1224–1229. doi: 10.1109/CCDC.2016.7531171.
- [2] A. A. Firdaus, O. Penangsang, A. Soeprijanto, and D. F. U. Putra, "Rekonfigurasi Jaringan Distribusi Menggunakan Binary Particle Swarm Optimization untuk Meningkatkan Nilai Indeks Stabilitas Tegangan," in *Prosiding SNaPP*, 2014, pp. 491–498.
- [3] J. Olamaei, T. Niknam, and G. Gharehpetian, "Application of particle swarm optimization for distribution feeder reconfiguration considering distributed generators," *Applied Mathematics and Computation*, vol. 201, no. 1–2, pp. 575–586, Jul. 2008. doi: 10.1016/j.amc.2007.12.053.
- [4] J. Zhan, W. Liu, C. Y. Chung, and J. Yang, "Switch opening and exchange method for stochastic distribution network reconfiguration," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 11, no. 4, pp. 2995–3007, Jul. 2020. doi: 10.1109/TSG.2020.2974922.
- [5] V. J. Shetty, R. B. Magadam, and S. G. Ankaliki, "Distribution system Network Reconfiguration for Voltage Profile Improvement and Loss Reduction Using BPSO," in *2019 2nd International Conference on Power and Embedded Drive Control (ICPEDC)*, Aug. 2019, pp. 454–457. doi: 10.1109/ICPEDC47771.2019.9036534.
- [6] J. Kartoni and E. Ervianto, "Analisa rekonfigurasi pembebanan untuk mengurangi rugi-rugi daya pada saluran distribusi 20 kV," *Jom FTEKNIK*, vol. 3, no. 2, pp. 1–10, 2016.
- [7] O. Zebua and I. M. Ginarsa, "Rekonfigurasi jaringan distribusi untuk meminimisasi rugi-rugi pada penyulang kabut di gardu induk teluk betung menggunakan metode binary particle swarm optimization (BPSO)," *JURNAL NASIONAL TEKNIK ELEKTRO*, vol. 5, no. 1, pp. 110–117, Mar. 2016. doi: 10.20449/jnte.v5i1.198.
- [8] X. Geng, H. Niu, J. Chen, and B. Li, "Study on Dynamic Reconfiguration of Distribution Network Considering Distribution Generation," *MATEC Web of Conferences*, vol. 100, p. 04008, Mar. 2017. doi: 10.1051/mateconf/201710004008.
- [9] A. I. Pramudya, *Rekonfigurasi Jaringan Distribusi Radial 20 kV ULP Teluk Betung Kota Bandar Lampung Menggunakan Metode Modified Particle Swarm Optimization (MPSO) untuk Mengurangi Rugi-Rugi Daya pada Jaringan Distribusi*, Surabaya: Institut Teknologi Sepuluh Nopember, 2021.
- [10] P. Mangera and D. Hardiantono, "analisis rugi tegangan jaringan distribusi 20 kv pada PT. PLN (persero) cabang Merauke," *Jurnal MJEME*, vol. 1, no. 2, pp. 61–69, 2019.
- [11] R. Syahputra, *Transmisi dan Distribusi Tenaga Listrik*. Yogyakarta: LP3M UMY, 2017.
- [12] R. S. Wibowo, K. R. Firmansyah, N. K. Aryani, and A. Soeprijanto, "Dynamic Economic Dispatch of Hybrid Microgrid with Energy Storage Using Quadratic Programming," in *2016 IEEE Region 10 Conference (TENCON)*, Nov. 2016, pp. 667–670. doi: 10.1109/TENCON.2016.7848086.
- [13] M. M. Begovic, I. Kim, D. Novosel, J. R. Aguero, and A. Rohatgi, "Integration of Photovoltaic Distributed Generation in the Power Distribution Grid," in *2012 45th Hawaii International Conference on System Sciences*, Jan. 2012, pp. 1977–1986. doi: 10.1109/HICSS.2012.335.
- [14] H. Saadat, *Power System Analysis*. New York: McGraw-Hill, 1999.
- [15] L. Xu, R. Cheng, Z. He, J. Xiao, and H. Luo, "Dynamic reconfiguration of distribution network containing distributed generation," in *2016 9th International Symposium on Computational Intelligence and Design (ISCID)*, Dec. 2016, pp. 3–7. doi: 10.1109/ISCID.2016.1010.
- [16] S. Hamid-Oudjana, M. Mosbah, R. Zine, and S. Arif, "Optimum Dynamic Network Reconfiguration in Smart Grid Considering Photovoltaic Source," in *International Conference in Artificial Intelligence in Renewable Energetic Systems*, 2019, vol. 102, pp. 557–565. doi: 10.1007/978-3-030-37207-1_59.
- [17] J. Kennedy and R. Eberhart, "Particle Swarm Optimization," in *Proceedings of ICNN'95 - International Conference on Neural Networks*, 1995, vol. 4, pp. 1942–1948. doi: 10.1109/ICNN.1995.488968.
- [18] A. A. Abou El-Ela, R. A. El-Sehiemy, and N. K. El-Ayaat, "Multi-objective Binary Particle Swarm Optimization Algorithm for Optimal Distribution System Reconfiguration," in *2019 21st International Middle East Power Systems Conference (MEPCON)*, Dec. 2019, pp. 435–440. doi: 10.1109/MEPCON47431.2019.9008170.
- [19] R. Poli, J. Kennedy, and T. Blackwell, "Particle swarm optimization," *Swarm Intelligence*, vol. 1, no. 1, pp. 33–57, Oct. 2007. doi: 10.1007/s11721-007-0002-0.
- [20] W. Sheng, K. Liu, H. Pei, Y. Li, D. Jia, and Y. Diao, "A fast reactive

power optimization in distribution network based on large random matrix theory and data analysis,” *Applied Sciences (Switzerland)*, vol. 6, no. 6, 2016, doi: 10.3390/app6060158.

[21] M. A. Cohen and D. S. Callaway, “Effects of distributed PV generation on California’s distribution system, Part 1: Engineering simulations,” *Solar Energy*, vol. 128, pp. 126–138, Apr. 2016, doi: 10.1016/j.solener.2016.01.002.