



Pengaruh pembangkit *photovoltaic* sebagai *distributed energy resources* terhadap profil tegangan dan rugi-rugi daya pada Penyulang Bantul 05 Yogyakarta

Jimmy Trio Putra^{a,1}, Istiqomah^a, Riki Khomarudin^a, Agus Diantoro^a

^aDepartemen Teknik Elektro dan Informatika, Sekolah Vokasi, Universitas Gadjah Mada, Gedung Herman Yohanes Sekip Unit III, Catur Tunggal, Depok, Sleman, Yogyakarta, 55281, Indonesia

¹E-mail: jimmytrioputra@ugm.ac.id

INFO ARTIKEL

Riwayat artikel:

Diajukan pada 02 November 19

Direvisi pada 11 November 19

Ditetujui pada 18 November 19

Tersedia daring pada 26 November 19

Kata kunci:

OpenDSS, *Photovoltaic*, Profil Tegangan, Rugi-rugi Daya.

Keywords:

OpenDSS, *Photovoltaic*, Power Losses, Voltage Profile.

ABSTRAK

Permasalahan besarnya jumlah beban dan letak pembangkit yang jauh dari sistem distribusi menimbulkan jatuh tegangan dan rugi-rugi daya semakin meningkat. Selain itu, *Distributed Energy Resources* (DER) yang terintegrasi pada penyulang distribusi menjadikan tantangan yang baru terhadap sistem distribusi. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui besarnya dampak pemasangan pembangkit *Photovoltaic* (PV) sebagai DER terhadap penyulang Bantul, Yogyakarta. Peneliti menggunakan simulasi dengan mode aliran daya dari perangkat lunak *Open Distribution System Simulator* (OpenDSS) dalam menganalisis perbandingan profil tegangan dan besarnya rugi-rugi daya sebelum dan setelah pemasangan PV. Penelitian dibagi dalam dua skenario penambahan *Distributed Generation* (DG) yaitu skenario 1 dengan menggunakan *single DG* terpasang pada bus 33 sedangkan skenario 2 dengan *multi-DG* terpasang pada bus 19 dan 33. Hasil penelitian awal tanpa pemasangan DG menunjukkan bahwa pada bus terendah memiliki nilai profil tegangan sebesar 0.86 p.u. dengan total rugi-rugi daya sebesar 439.9 kW. Sedangkan integrasi DG terbukti dapat meningkatkan profil tegangan dan meminimalisir total rugi daya. Skenario 1 dapat memperbaiki profil tegangan terendah penyulang dari 0.86 p.u. menjadi 0.92 p.u. dan total rugi-rugi daya yang awalnya sebesar 439.9 kW menjadi sebesar 125.2 kW. Skenario 2 menjadi skenario terbaik dengan perbaikan profil tegangan pada bus terendah dari 0.86 p.u. menjadi sebesar 0.9695 p.u. dan rugi-rugi daya total awalnya sebesar 439.9 kW menjadi sebesar 62.6 kW.

ABSTRACT

The amount of load and location of powerplant can cause voltage drop and power losses were increased. In addition, *Distributed Energy Resources* (DER) which were integrated with distribution feeders put the significant challenges to distribution systems. This study aims to determine the impact of *Photovoltaic* (PV) plants as DER on Bantul feeders, Yogyakarta. Researchers used power flow mode simulations from the *Open Distribution System Simulator* (OpenDSS) software to analyzed the voltage profile and power losses before and after PV integration. The study divided into two scenarios for the addition of *Distributed Generation* (DG), namely scenario 1 using *single DG* installed on the bus 33 while scenario 2 with *multi-DG* installed on buses 19 and 33. The results of the study without DG installation showed that the lowest bus has a voltage profile value of 0.86 p.u. with a total power losses of 439.9 kW. Meanwhile, DG integration is proven to be able to increase the voltage profile and minimize the total power loss. Scenario 1 can improve the feeder's lowest voltage profile from 0.86 p.u. to 0.92 p.u. and the total power losses which were originally 439.9 kW to 125.2 kW. Scenario 2 becomes the best scenario with the improvement of the voltage profile on the lowest bus from 0.86 p.u. to 0.9695 p.u. and the initial total power losses of 439.9 kW to 62.6 kW.

<http://dx.doi.org/10.36055/tjst.v15i2.6811>

1. Pendahuluan

Sistem distribusi tenaga listrik merupakan saluran yang menghubungkan sistem transmisi menuju ke beban atau konsumen. Sebagian besar dari saluran distribusi berkonfigurasi jaringan radial [1]. Gardu Induk (GI) Penyulang Bantul memiliki konfigurasi jaringan radial yang berfungsi sebagai penyalur dalam menyuplai beban di wilayah Kabupaten Bantul dan sekitarnya dengan total terdapat 18 penyulang. Salah satu permasalahan utama yang biasanya terjadi dari saluran distribusi ini adalah besarnya rugi-rugi daya dan profil tegangan yang tidak memenuhi standar. Rugi-rugi daya menyebabkan kurang efisiennya suatu jaringan sistem tenaga listrik dalam pengiriman dari pembangkit menuju ke beban atau konsumen. Sedangkan jatuh tegangan akan menyebabkan rusaknya peralatan-peralatan listrik yang ada pada konsumen [2].

Pada sisi lain, pemerintah melalui kebijakan energi nasional yang dituangkan dalam Rencana Umum Energi Nasional (RUEN) memiliki target pemanfaatan *Distributed Energy Resources* (DER) dengan sumber energi terbarukan sebesar 23% pada tahun 2025, 30% pada tahun 2030 dan mencapai 31% pada tahun 2050 dari total pemenuhan seluruh pemanfaatan energi secara nasional [3]. Sehingga, wujud keseriusan pemerintah dalam hal pemanfaatan energi terbarukan dan pemenuhan rasio elektrifikasi secara nasional dengan mendorong pembangkit *photovoltaic*, *wind turbine*, biogas, bionergi dan lain-lain diintegrasikan pada sistem distribusi tenaga listrik yang dimiliki oleh Perusahaan Listrik Negara (PLN). DER memberikan berbagai keuntungan positif baik dari segi ekonomi maupun lingkungan [4-5]. Selain itu, penambahan DER pada sistem tenaga listrik konvensional akan menimbulkan perubahan baru pada perencanaan dan operasi kelistrikan terutama pada profil tegangan dan rugi-rugi daya sistem [4]. *Photovoltaic* (PV) merupakan salah satu DER yang bersumberkan dari energi terbarukan dengan memanfaatkan teknologi dalam mengubah sinar matahari dalam menghasilkan listrik. PV memiliki daya keluaran yang *intermittent* bergantung pada kondisi temperatur, musim, kelembapan, pergerakan awan sehingga daya keluaran selalu berubah setiap waktu [6-8]. Daya keluaran *intermittent* dan terintegrasi tersebut menjadikan sistem distribusi harus melakukan penyesuaian baik dari sisi proteksi [9-10], pengaturan tegangan [11-12], stabilitas tegangan [13-14], penyimpangan tegangan [13-15].

Aliran daya listrik dapat dilakukan dalam beberapa metode konvensional yang telah dikenal, diantaranya *Gauss Seidel* [16], *Newton Raphson* [17-18], *Fast Decoupled* [19]. Akan tetapi, analisis aliran daya dengan metode konvensional tersebut memiliki tingkat kehandalan rendah dan kurang efektif dalam melakukan perhitungan yang kompleks pada sistem distribusi radial [20]. Pada penelitian ini, peneliti melakukan hal yang berbeda dengan menggunakan pembangkit PV sebagai DER yang terintegrasi pada jaringan penyulang Bantul 05 Yogyakarta, yang dimiliki oleh PLN dalam menganalisis pengaruh integrasi pembangkit terhadap profil tegangan dan rugi-rugi daya dengan menggunakan mode aliran daya yang dimiliki oleh simulator *Open Distribution System Simulator* (OpenDSS). OpenDSS memiliki banyak keuntungan dibandingkan simulator lainnya dalam hal platform urutan waktu simulasi, integrasi antar simulator, pemodelan saluran multifasa dengan konfigurasi yang berbeda, pengoperasian cepat dan mudah, dan banyak keuntungan lainnya. Aliran daya yang dijalankan pada sistem distribusi radial dengan rasio X/R yang tinggi, nilai node yang besar dan karakteristik lainnya pada sistem distribusi membuat metode konvensional kesulitan dalam memecahkan permasalahan, akan tetapi dengan metode aliran daya menggunakan simulator OpenDSS dapat diselesaikan dengan mudah, komputasi yang efektif, kalkulasi numerik yang tepat dan cepat [20]. Selain itu, penelitian ini menggunakan data spesifikasi dan peralatan riil yang diambil dari salah satu penyulang Bantul di Yogyakarta, dengan data beban yang fluktuatif sesuai dengan karakteristik penyulang dan data daya pembangkit *Photovoltaic* yang *intermittent* disesuaikan dengan daya riil dari *Queensland University*.

2. Aliran Daya Menggunakan OpenDSS

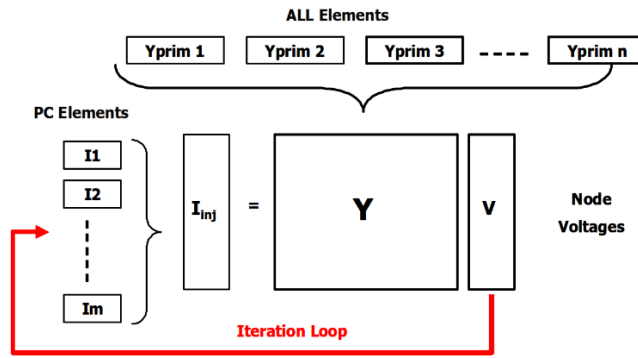
OpenDSS merupakan simulator yang digunakan dalam menganalisis utilitas sistem distribusi dengan kemampuan implementasi program *stand-alone* dan dapat diintegrasikan dengan beberapa *platform* perangkat lunak yang lain (COM server DLL). Dikembangkan pada tahun 1997, DSS pada awalnya dirancang untuk memperhitungkan dampak waktu dan lokasi jaringan DER dengan memperkenalkan konsep analisis *Quasi-Static Time-Series* (QSTS) ke industri tenaga listrik. Untuk mengkoordinasikan dan memajukan aplikasi smart grid, DSS menjadi *platform open-source* sepuluh tahun kemudian dengan lebih dari 65000 unduhan dan ribuan pengguna secara global, Simbol perangkat lunak OpenDSS dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Simbol software OpenDSS [21].

OpenDSS adalah simulator sistem distribusi tenaga listrik yang dirancang untuk mendukung integrasi *Distributed Energy Resources* (DER) terdistribusi, menyertakan analisis energi secara terperinci, data inverter mutakhir dan modernisasi jaringan. Perangkat lunak ini memungkinkan para insinyur untuk melakukan analisis kompleks menggunakan platform yang fleksibel, dapat disesuaikan, dan mudah digunakan untuk tujuan khusus dalam memenuhi tantangan sistem distribusi saat ini dan masa depan dan memberikan landasan dalam memahami dan mengintegrasikan teknologi dan sumber energi terbarukan.

Aliran daya menggunakan OpenDSS dapat dijalankan dalam berbagai mode solusi termasuk *single snapshot mode*, *daily mode*, *dutycycle mode*, *Monte Carlo mode*, dan beberapa mode dengan variasi beban terhadap fungsi waktu. Ketika aliran daya dijalankan, rugi-rugi daya, tegangan, aliran beban, dan informasi lainnya tersedia untuk total sistem, setiap elemen, maupun area tertentu yang diinginkan. Aliran daya yang dijalankan pada sistem distribusi radial dengan rasio X/R yang tinggi, nilai node yang besar menggunakan metode *Newthon-Raphson*, *Fast decoupled*, dan *Gauss-Seidel* untuk diselesaikan tetapi dengan metode aliran daya menggunakan simulator OpenDSS dapat diselesaikan dengan mudah dan cepat [20].



Gambar 2. OpenDSS solution loop [21].

Gambar 2 menggambarkan bagaimana OpenDSS menempatkan semua elemen *Power Delivery* dan elemen *Power Conversion* dalam menemukan solusi permasalahan ketenagaan listrik. OpenDSS menggunakan perumusan *Nodal Admittance* dari model rangkaian yang dapat dituliskan dalam teks fundamental pada analisis sistem tenaga. OpenDSS menyediakan algoritma yang membangun matriks node pada elemen sistem distribusi daya yang tersedia. Rumus fundamental dari kinerja besarnya tegangan diperoleh dengan melakukan solusi secara langsung [21]:

$$I = YV, \tag{1}$$

dimana beban dan generator dimodelkan dengan ekuivalen liniernya tanpa adanya injeksi arus, sedangkan solusi utama difokuskan pada persamaan sistem nonlinier dalam bentuk berikut [21]:

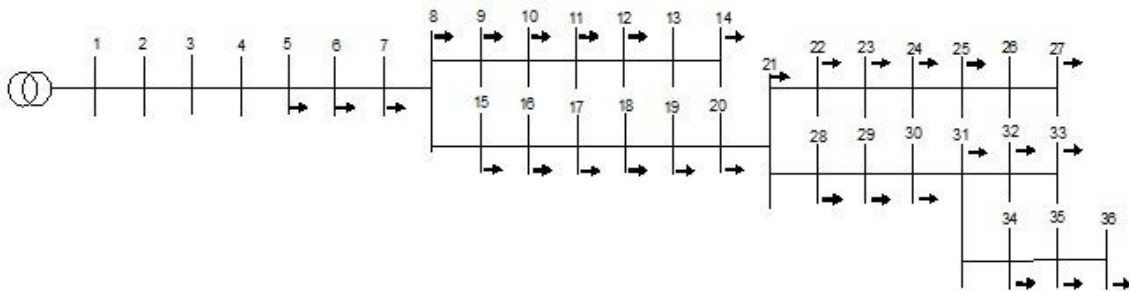
$$I_{inj}(V) = Y_{system}V. \tag{2}$$

Sedangkan cara OpenDSS dalam menentukan *fixed point* sederhana dapat dituliskan berikut [21]:

$$V_{n+1} = [Y_{system}]^{-1}I_{inj}(V_n) \quad n = 0,1,2, \dots \text{until coveredged} \tag{3}$$

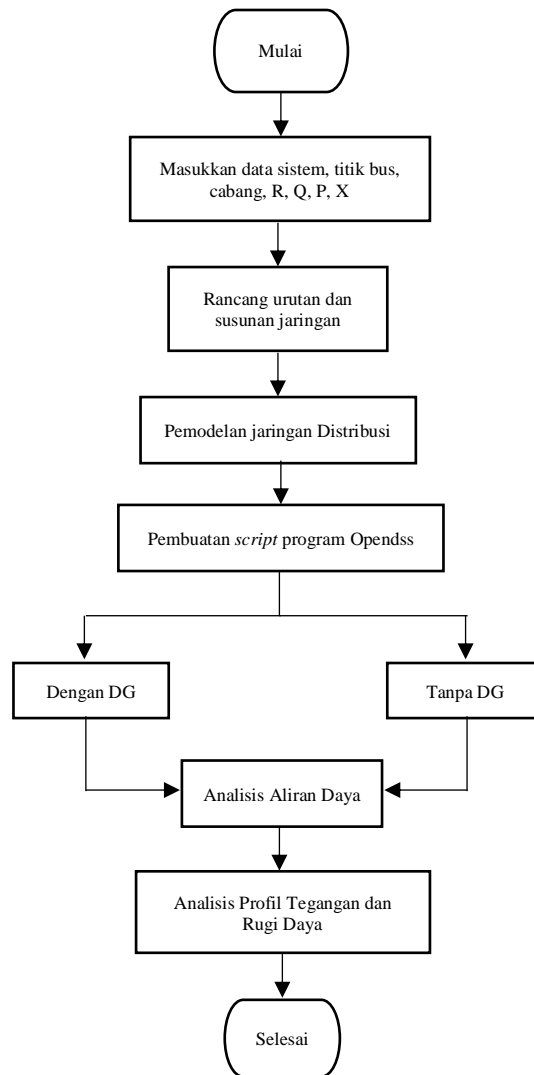
3. Penyulang BNL 05 Yogyakarta

Data yang digunakan dalam penelitian ini merupakan data jaringan distribusi dari salah satu penyulang pada Gardu Induk Bantul, yaitu Penyulang Bantul 05. Level tegangan pada sistem distribusi menggunakan level tegangan 20 kV. Gambar 3 menunjukkan sistem distribusi Penyulang Bantul 05 yang telah disederhanakan dan digunakan dalam penelitian ini.



Gambar 3. Single line diagram Penyulang Bantul 05.

Gambar 4 menunjukkan diagram alir keseluruhan penelitian untuk menjelaskan apa saja yang akan dilakukan pada penelitian ini secara umum:



Gambar 4. Diagram alir penelitian.

Jenis penghantar yang digunakan adalah jenis *All Aluminium Alloy Conductor* (AAAC) tipe 6201 yang merupakan standar spesifikasi SPLN 41-8: 1981, bentuk jenis penghantar AAAC dapat dilihat pada Gambar 5.



Gambar 5. Penghantar AAAC 6201 [22].

Data penghantar yang digunakan sebagai media penghubung saluran pada penyulang Bantul 05. Total panjang saluran pada Penyulang Bantul 05 adalah ± 19.5 km dengan nilai impedansi saluran berbeda-beda tiap penghantar. Terdapat dua ukuran diameter penghantar AAAC yang digunakan yaitu 240 mm^2 dan 300 mm^2 . Penghantar dengan ukuran diameter 300 mm^2 digunakan pada saluran yang keluar dari Gardu Induk menuju tiang saluran distribusi. Tabel 1 menunjukkan hubungan antar bus pada penyulang Bantul 05.

Tabel 1. Data penghantar pada Penyulang Bantul 05.

Nama	Bus 1	Bus 2	Panjang (km)	Jenis kabel	R0	R1	X0	X1
<i>Cable 1</i>	GI_Bantul	Bus 2	0.100	AAAC	0.08	0.25	0.105	0.26
<i>Cable 2</i>	Bus 3	Bus 4	0.100	AAAC	0.08	0.25	0.105	0.26
<i>Cable 3</i>	Bus 4	Bus 5	0.300	AAAC	0.161	0.098	0.463	0.245
<i>Cable 4</i>	Bus 5	Bus 6	1.600	AAAC	0.161	0.098	0.463	0.245
<i>Cable 5</i>	Bus 6	Bus 7	1.025	AAAC	0.161	0.098	0.463	0.245
<i>Cable 6</i>	Bus 7	Bus 8	1.025	AAAC	0.161	0.098	0.463	0.245

Nama	Bus 1	Bus 2	Panjang (km)	Jenis kabel	R0	R1	X0	X1
Cable 7	Bus 8	Bus 9	0.050	AAAC	0.161	0.098	0.463	0.245
Cable 8	Bus 9	Bus 10	0.025	AAAC	0.161	0.098	0.463	0.245
Cable 9	Bus 10	Bus 11	0.025	AAAC	0.161	0.098	0.463	0.245
Cable 10	Bus 11	Bus 12	0.050	AAAC	0.161	0.098	0.463	0.245
Cable 11	Bus 12	Bus 13	2.620	AAAC	0.161	0.098	0.463	0.245
Cable 12	Bus 13	Bus 14	0.800	AAAC	0.161	0.098	0.463	0.245
Cable 13	Bus 9	Bus 15	0.800	AAAC	0.161	0.098	0.463	0.245
Cable 14	Bus 15	Bus 16	0.100	AAAC	0.161	0.098	0.463	0.245
Cable 15	Bus 16	Bus 17	0.150	AAAC	0.161	0.098	0.463	0.245
Cable 16	Bus 17	Bus 18	0.150	AAAC	0.161	0.098	0.463	0.245
Cable 17	Bus 18	Bus 19	0.350	AAAC	0.161	0.098	0.463	0.245
Cable 18	Bus 19	Bus 20	0.075	AAAC	0.161	0.098	0.463	0.245
Cable 19	Bus 20	Bus 21	0.075	AAAC	0.161	0.098	0.463	0.245
Cable 20	Bus 21	Bus 22	0.050	AAAC	0.161	0.098	0.463	0.245
Cable 21	Bus 22	Bus 23	0.225	AAAC	0.161	0.098	0.463	0.245
Cable 22	Bus 23	Bus 24	0.225	AAAC	0.161	0.098	0.463	0.245
Cable 23	Bus 24	Bus 25	0.500	AAAC	0.161	0.098	0.463	0.245
Cable 24	Bus 25	Bus 26	0.700	AAAC	0.161	0.098	0.463	0.245
Cable 25	Bus 21	Bus 27	0.700	AAAC	0.161	0.098	0.463	0.245
Cable 26	Bus 27	Bus 28	0.050	AAAC	0.161	0.098	0.463	0.245
Cable 27	Bus 28	Bus 29	0.350	AAAC	0.161	0.098	0.463	0.245
Cable 28	Bus 29	Bus 30	0.350	AAAC	0.161	0.098	0.463	0.245
Cable 29	Bus 30	Bus 31	1.025	AAAC	0.161	0.098	0.463	0.245
Cable 30	Bus 31	Bus 32	1.025	AAAC	0.161	0.098	0.463	0.245
Cable 31	Bus 30	Bus 33	0.050	AAAC	0.161	0.098	0.463	0.245
Cable 32	Bus 33	Bus 34	2.400	AAAC	0.161	0.098	0.463	0.245
Cable 33	Bus 34	Bus 35	2.400	AAAC	0.161	0.098	0.463	0.245

Penyulang Bantul 05 merupakan salah satu penyulang yang tehubung pada transformator daya I Gardu Induk Bantul yang memiliki kapasitas daya 60 MVA. Tegangan diturunkan dari tegangan tinggi 150 kV menjadi tegangan menengah 20 kV sebelum didistribusikan. Pada saluran distribusi terdapat transformator *step-down* yang terpasang antara bus 20 kV dengan bus 0.38 kV dengan rating kVA yang berbeda-beda sesuai dengan rating beban. Data transformator yang terdapat pada sistem distribusi Penyulang Bantul 05 dapat ditunjukkan melalui Tabel 2.

Tabel 2. Data Transformator Penyulang Bantul 05.

Nama Trafo	Bus 1	Bus 2	kVA	kV High	kV Low	%R	%X	%G
TRF_I_BNL	Bus 2	Bus 3	60000	150	22	0,278	12,497	0,125
T2	Bus 6	Bus 36	350	20	0.38	2,219	3,328	0,106
T3	Bus 7	Bus 37	675	20	0.38	2,219	3,328	0,11
T4	Bus 8	Bus 38	350	20	0.38	2,219	3,328	0,106
T5	Bus 9	Bus 39	100	20	0.38	2,219	3,328	0,055
T6	Bus 10	Bus 40	150	20	0.38	2,219	3,328	0,073
T7	Bus 11	Bus 41	100	20	0.38	2,219	3,328	0,055
T8	Bus 12	Bus 42	175	20	0.38	2,219	3,328	0,088
T9	Bus 13	Bus 43	350	20	0.38	2,219	3,328	0,097
T10	Bus 14	Bus 44	175	20	0.38	2,219	3,328	0,088
T11	Bus 15	Bus 45	600	20	0.38	2,219	3,328	0,107
T12	Bus 16	Bus 46	1150	20	0.38	2,219	3,328	0,111
T13	Bus 17	Bus 47	600	20	0.38	2,219	3,328	0,107
T14	Bus 18	Bus 48	300	20	0.38	2,219	3,328	0,087
T15	Bus 19	Bus 49	500	20	0.38	2,219	3,328	0,105
T16	Bus 20	Bus 50	300	20	0.38	2,219	3,328	0,087
T17	Bus 21	Bus 51	100	20	0.38	2,219	3,328	0,047
T18	Bus 22	Bus 52	150	20	0.38	2,219	3,328	0,063
T19	Bus 23	Bus 53	100	20	0.38	2,219	3,328	0,047
T20	Bus 24	Bus 54	450	20	0.38	2,219	3,328	0,096
T21	Bus 25	Bus 55	800	20	0.38	2,219	3,328	0,108
T22	Bus 26	Bus 56	450	20	0.38	2,219	3,328	0,096
T23	Bus 27	Bus 57	250	20	0.38	2,219	3,328	0,092
T24	Bus 28	Bus 58	450	20	0.38	2,219	3,328	0,102
T25	Bus 29	Bus 59	250	20	0.38	2,219	3,328	0,092
T26	Bus 30	Bus 60	250	20	0.38	2,219	3,328	0,082

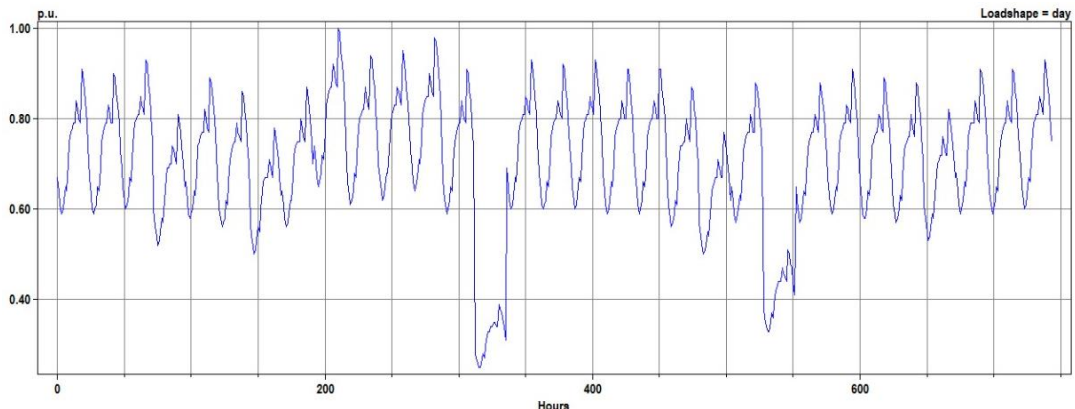
Nama Trafo	Bus 1	Bus 2	kVA	kV High	kV Low	%R	%X	%G
T27	Bus 31	Bus 61	450	20	0.38	2,219	3,328	0,101
T28	Bus 32	Bus 62	250	20	0.38	2,219	3,328	0,082
T29	Bus 33	Bus 63	550	20	0.38	2,219	3,328	0,102
T30	Bus 34	Bus 64	1000	20	0.38	2,219	3,328	0,112
T31	Bus 35	Bus 65	550	20	0.38	2,219	3,328	0,102

Pada *single line diagram* pada Gambar 4, terdiri dari 30 buah beban terhubung dengan hubungan Y, memiliki faktor daya sebesar 0.85, dan total daya beban sebesar 5271.5 kW. Adapun data tiap beban yang ada pada penyulang ditunjukkan pada Tabel 3.

Tabel 3. Data beban Penyulang Bantul 05.

Load	Bus	Mode	Fasa	kV	kVA	kW	Pf	kVA _r
Lump 1	Bus 36	Y	3	0.38	296	252	0.85	156
Lump 2	Bus 37	Y	3	0.38	592	503	0.85	312
Lump 3	Bus 38	Y	3	0.38	296	252	0.85	156
Lump 4	Bus 39	Y	3	0.38	43.8	37.23	0.85	23.073
Lump 5	Bus 40	Y	3	0.38	87.5	74.375	0.85	46.093
Lump 6	Bus 41	Y	3	0.38	43.8	37.23	0.85	23.073
Lump 7	Bus 42	Y	3	0.38	175	149	0.85	92.187
Lump 8	Bus 43	Y	3	0.38	350	198	0.85	184
Lump 9	Bus 44	Y	3	0.38	175	149	0.85	92.187
Lump 10	Bus 45	Y	3	0.38	513	436	0.85	270
Lump 11	Bus 46	Y	3	0.38	1025	871	0.85	540
Lump 12	Bus 47	Y	3	0.38	513	436	0.85	270
Lump 13	Bus 48	Y	3	0.38	210	179	0.85	111
Lump 14	Bus 49	Y	3	0.38	420	357	0.85	221
Lump 15	Bus 50	Y	3	0.38	210	179	0.85	111
Lump 16	Bus 51	Y	3	0.38	37.5	31.875	0.85	19.754
Lump 17	Bus 52	Y	3	0.38	75	63.75	0.85	39.509
Lump 18	Bus 53	Y	3	0.38	37.5	31.875	0.85	19.754
Lump 19	Bus 54	Y	3	0.38	346	294	0.85	182
Lump 20	Bus 55	Y	3	0.38	692	588	0.85	365
Lump 21	Bus 56	Y	3	0.38	346	294	0.85	182
Lump 22	Bus 57	Y	3	0.38	184	156	0.85	96.928
Lump 23	Bus 58	Y	3	0.38	368	313	0.85	194
Lump 24	Bus 59	Y	3	0.38	184	156	0.85	96.928
Lump 25	Bus 60	Y	3	0.38	163	139	0.85	85.866
Lump 26	Bus 61	Y	3	0.38	325	276	0.85	171
Lump 27	Bus 62	Y	3	0.38	163	139	0.85	85.866
Lump 28	Bus 63	Y	3	0.38	450	383	0.85	237
Lump 29	Bus 64	Y	3	0.38	900	765	0.85	474
Lump 30	Bus 65	Y	3	0.38	450	383	0.85	237

Penelitian dilakukan dengan menggunakan data beban fluktuatif. Sistem tenaga listrik harus dioperasikan dengan mempertahankan daya saluran dan tegangan bus secara optimal untuk memenuhi kebutuhan beban yang fluktuatif. Gambar 6 menunjukkan profil beban riil pada penyulang Bantul 05 selama 1 bulan dalam satuan p.u.:



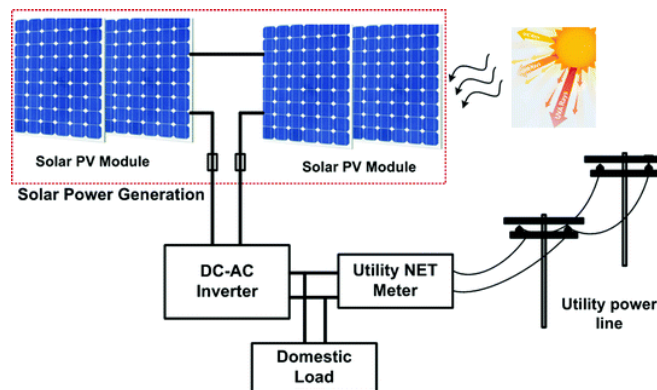
Gambar 6. Grafik beban Penyulang Bantul 05 selama 1 bulan.

Pada penyulang Bantul 05 beban puncak terjadi pada pukul 18.00 WIB dengan nilai daya sebesar 5946.67 kW dan beban minimum pada pukul 03.00 WIB dengan daya sebesar 3880 kW.

4. Skenario Pemasangan *Photovoltaic*

Jenis DG yang digunakan adalah *photovoltaic* (PV). Hal ini dikarenakan PV lebih fleksibel digunakan dan dipasang diberbagai kondisi jika dibandingkan dengan *Hydro Generator* seperti PLTMH dan PLTB. Kelebihan lain dari PV yaitu ketersediaan sinar matahari sepanjang hari, siklus kerja yang lama, perawatan yang mudah, biaya operasi yang rendah, dan ramah lingkungan. Penelitian ini menganalisis pengaruh *Photovoltaic-based Distributed Generation* (PV-DG) terhadap profil tegangan dan rugi-rugi daya aktif pada saluran. Diasumsikan pada seluruh bus sistem dapat dipasang PV-DG, skema pembangkitan listrik dengan menggunakan *photovoltaic* dapat diasumsikan seperti Gambar 7.

Cara kerja sistem pembangkit listrik tenaga surya, menggunakan *grid-connected panel* sel surya *photovoltaic* (PV). Modul sel surya PV mengubah energi surya menjadi arus listrik DC. Arus listrik DC yang dihasilkan ini akan dialirkan melalui inverter (konversi daya) yang mengubahnya menjadi arus listrik AC, yang secara otomatis juga akan mengatur seluruh sistem. Listrik AC akan didistribusikan melalui panel distribusi yang akan mengalirkan listrik pada sistem distribusi.



Gambar 7. Skema PV-DG [23].

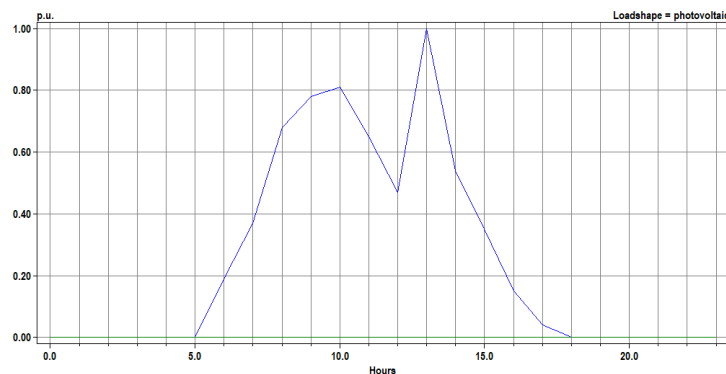
Berikut merupakan parameter-parameter yang diperlukan dalam melakukan pemasangan PV-DG yang ditunjukkan pada tabel berikut:

Tabel 4. Data parameter pada perencanaan pemasangan PV-DG.

DG	Fasa	Bus 1	kV	kW	Δ/γ	Mode	Model	Hz	Status
PV1	3	Bus x	0.38	y	Δ	photovoltaic	3	50	Variabel

Pada Tabel 4 Kolom Bus 1 merupakan lokasi penambahan DG pada bus terpilih sedangkan kolom kW merupakan besar nilai kapasitas DG yang akan ditambahkan. Pada penelitian yang dilakukan, penentuan lokasi DG diambil pada bus section tertentu yang memiliki daya beban terbesar, serta nilai rugi daya dan penurunan tegangan yang cukup besar.

Penambahan PV-DG membutuhkan data daya yang dihasilkan setiap harinya oleh PV. Studi kasus dibuat dengan data daya *photovoltaic* yang diperoleh dari hasil pengamatan dan pengukuran setiap harinya di *Queensland University*. Diasumsikan pada PV yang akan dipasang mempunyai data daya seperti pada Tabel 4. Pada Gambar 8 menunjukkan profil daya yang dihasilkan oleh *photovoltaic* di Universitas Queensland, Australia [24].



Gambar 8. Kurva profil daya PV.

Berdasarkan Gambar 8 dapat diamati bahwa untuk penambahan PV-DG pada jaringan distribusi, nilai daya yang dihasilkan fluktuatif bergantung pada intensitas radiasi matahari per jam sehingga statusnya variabel. Penambahan pembangkit *photovoltaic* pada penyulang Bantul 05 pada penelitian ini dilakukan dengan mengikuti skenario berikut:

Tabel 5. Skenario 1.

Jenis DG	Fasa	Bus 1	kV	kW	kVAR	Mode	Model	Hz	Status
Photovoltaic 1	3	Bus 33	0.38	2500	1000	photovoltaic	3	50	Variabel

Tabel 6. Skenario 2.

DG	Fasa	Bus 1	kV	kW	kVAR	Mode	Model	Hz	Status
Photovoltaic 1	3	Bus 19	0.38	2500	1000	photovoltaic	3	50	Variabel
Photovoltaic 2	3	Bus 33	0.38	2500	1000	photovoltaic	3	50	Variabel

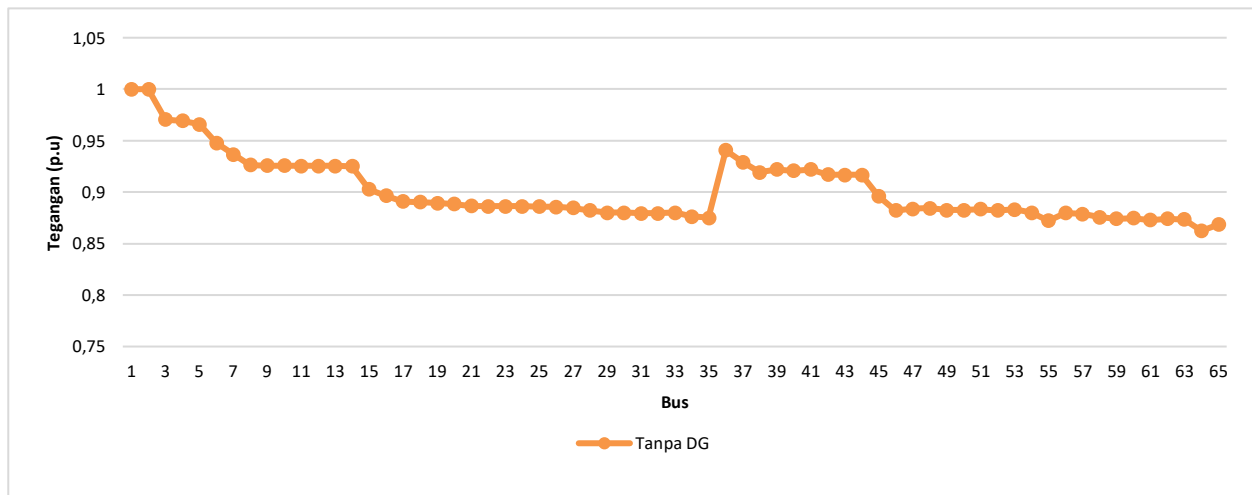
5. Hasil dan Pembahasan

5.1. Profil tegangan tanpa pemasangan photovoltaic

Tabel 7 menunjukkan hasil simulasi aliran daya pada sistem menggunakan software OpenDSS sebelum adanya penambahan DG. Hasil dari simulasi menunjukkan rugi-rugi daya aktif pada sistem sebesar 439.9 kW dengan nilai tegangan terendah 0.86 p.u. Nilai ini sudah diluar batasan nominal profil tegangan sesuai SPLN 1:1978 sehingga diperlukan perbaikan profil tegangan dan minimalisasi rugi-rugi daya aktif saluran. Tegangan pada setiap titik bus memenuhi kekangan standar yaitu 0.95 – 1.05 p.u. Pada Gambar 9 menunjukkan nilai profil tegangan sebelum pemasangan DG pada setiap bus di Penyulang Bantul 05.

Tabel 7. Profil tegangan 8.

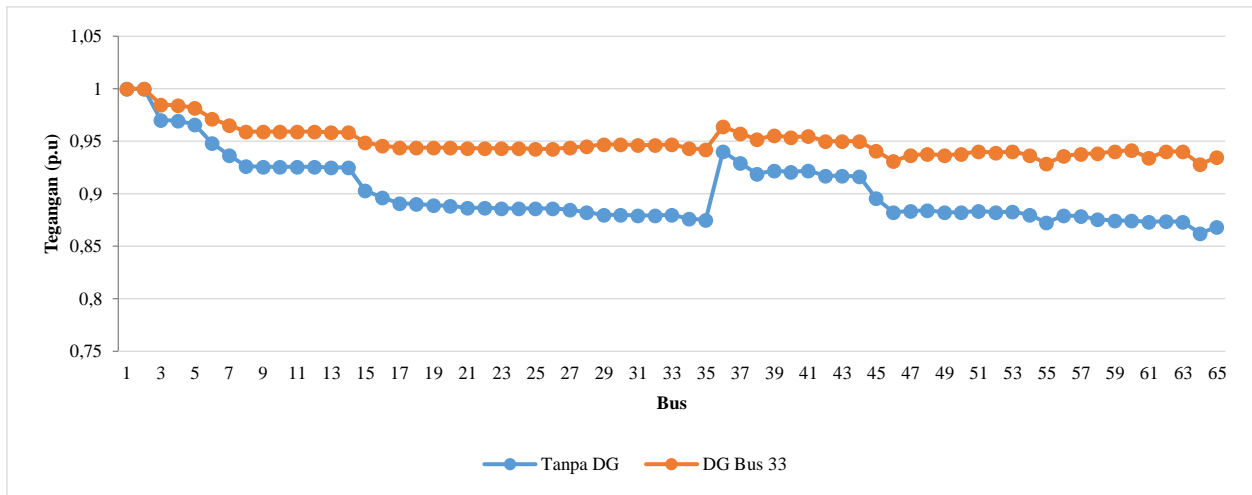
Parameter yang diukur	Sistem Distribusi Penyulang Bantul 05
V_{max} (p.u)	1,00
V_{min} (p.u)	0,86
ΣP_{load} (kW)	5271,5
ΣkW_{loss} (kW)	439,9



Gambar 9. Profil tegangan sistem distribusi tanpa pemasangan DG.

5.1. Profil tegangan Penyulang Bantul 05 dengan Skenario 1

Pada skenario 1 buah PV-DG ini dilakukan simulasi dengan menempatkan PV-DG pada bus yang memiliki profil tegangan sangat rendah yaitu Bus 33. Bus 33 memiliki nilai tegangan yaitu 17.6 kV atau 0.86 p.u. Nilai ini berada jauh di bawah standar yang ditetapkan yaitu 7.37% di bawah 0.95 p.u. Berikut adalah hasil simulasi untuk single PV-DG pada bus 33 dengan kapasitas DG sebesar 2500 kW ditunjukkan pada Gambar 10.

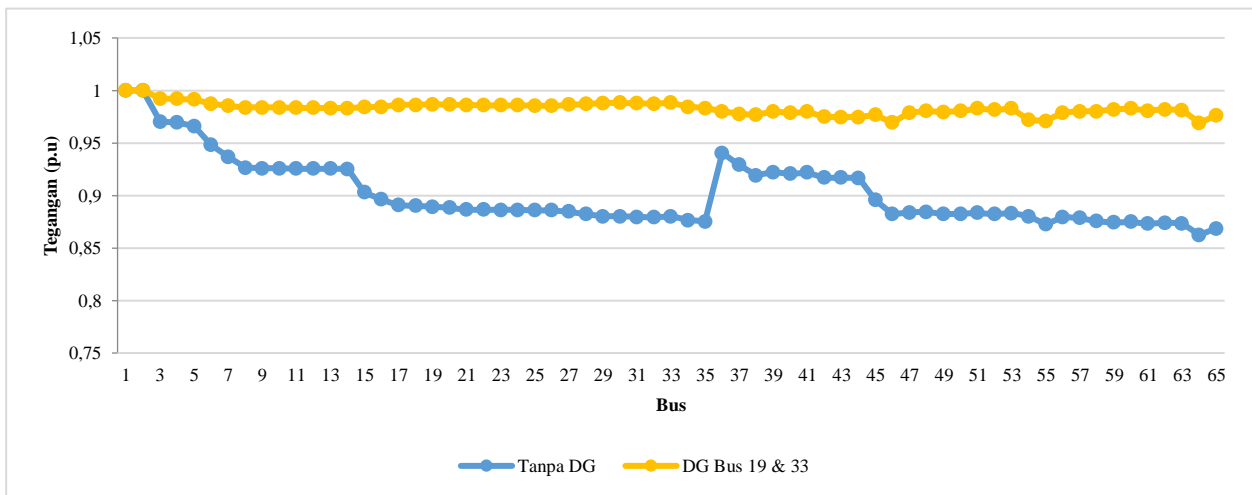


Gambar 10. Profil tegangan skenario 1.

Hasil yang ditunjukkan pada Gambar 10 menginterpretasikan bahwa garis yang berwarna biru merupakan profil tegangan sebelum penempatan PV-DG, dan garis yang berwarna oranye merupakan profil tegangan setelah penempatan PV-DG. Terjadi perbaikan profil tegangan setelah penempatan PV-DG. Dari hasil penempatan 1 buah PV-DG pada bus 33 berkapasitas 2500 kW, dapat dilihat bahwa perbaikan profil tegangan terjadi pada bus 3 sampai dengan bus 65 dengan profil tegangan terendah setelah dipasang DG yaitu 0.92 p.u. Pada bus 1 dan 2 tidak terjadi perbaikan profil tegangan karena nilai profil tegangan sebelum pemasangan DG sudah baik yaitu 1 p.u. Total profil tegangan yang membaik setelah penempatan *photovoltaic-based* DG berjumlah 63 buah bus.

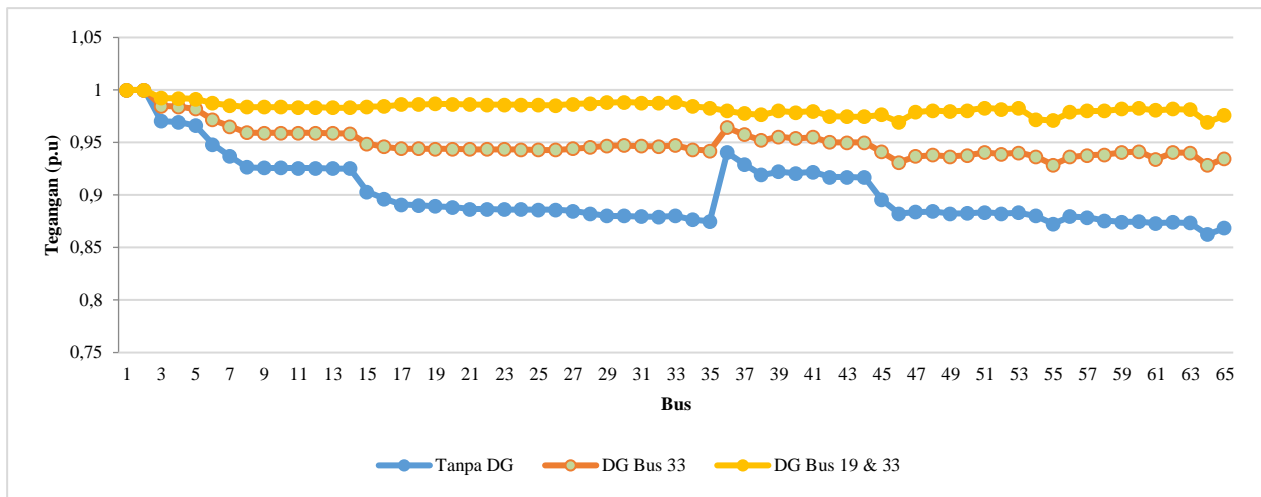
5.2. Profil tegangan Penyulang Bantul 05 dengan Skenario 2

Pada skenario 2 buah PV-DG ini dilakukan simulasi dengan menempatkan PV-DG pada bus yang memiliki profil tegangan sangat rendah yaitu Bus 33 dan Bus 19. Bus 33 memiliki nilai tegangan yaitu 17.6 kV atau 0.86 p.u sedangkan Bus 19 memiliki nilai tegangan sebesar 17.79 kV atau 0.8893 p.u. Nilai ini berada jauh di bawah standar yang ditetapkan yaitu di bawah 0.95 p.u. Berikut adalah hasil simulasi untuk multi PV-DG pada Bus 33 dan Bus 19 dengan kapasitas DG masing-masing sebesar 2500 kW dan 2500 kW ditunjukkan pada Gambar 11.



Gambar 11. Profil tegangan skenario 2.

Hasil pada Gambar 11 menginterpretasikan bahwa terjadi perbaikan profil tegangan setelah penempatan PV-DG. Dari hasil penempatan 2 buah PV-DG pada Bus 33 dan Bus 19 dengan kapasitas DG masing-masing sebesar 2500 kW, dapat dilihat bahwa perbaikan profil tegangan terjadi pada bus 3 sampai dengan bus 65 dengan profil tegangan terendah setelah dipasang DG yaitu 0.9695 p.u. Pada bus 1 dan 2 tidak terjadi perbaikan profil tegangan karena nilai profil tegangan sebelum pemasangan DG sudah baik yaitu 1 p.u. Total profil tegangan yang membaik setelah penempatan *photovoltaic-based* DG berjumlah 63 buah bus. Berdasarkan kedua skenario yang telah dilakukan, Gambar 12 menunjukkan grafik perbandingan profil tegangan keduanya dan sebelum penambahan DG sebagai berikut:



Gambar 12. Profil tegangan tiap bus setiap skenario.

Hasil pada Gambar 12 menginterpretasikan bahwa terjadi perbaikan profil tegangan setelah penempatan PV-DG, dan skenario 2 menjadi yang paling baik dalam memperbaiki profil tegangan dibandingkan skenario 1 untuk kasus pada penyulang Bantul 05, Yogyakarta.

5.3. Rugi-rugi daya Penyulang Bantul 05

Setelah disimulasikan menggunakan perangkat lunak OpenDSS selain diperoleh nilai profil tegangan masing-masing bus, dapat diketahui juga besarnya rugi-rugi daya total saluran yang ditunjukkan pada Tabel 8. Besarnya rugi-rugi daya total saluran tanpa pemasangan PV-DG sebesar 439.9 kW atau 8.34 % dari total daya beban. Sedangkan setelah adanya pemasangan PV-DG dengan skenario 1 menurun menjadi 149.7kW atau 2.1% dari total beban, Terakhir dengan menggunakan skenario 2 didapatkan besarnya rugi-rugi daya total sebesar 53.3 Kw atau 0.88% dari total beban keseluruhan. Detail rugi-rugi daya pada masing-masing branch dapat dilihat pada Tabel 9.

Tabel 8. Rugi-rugi daya total pada Penyulang Bantul 05.

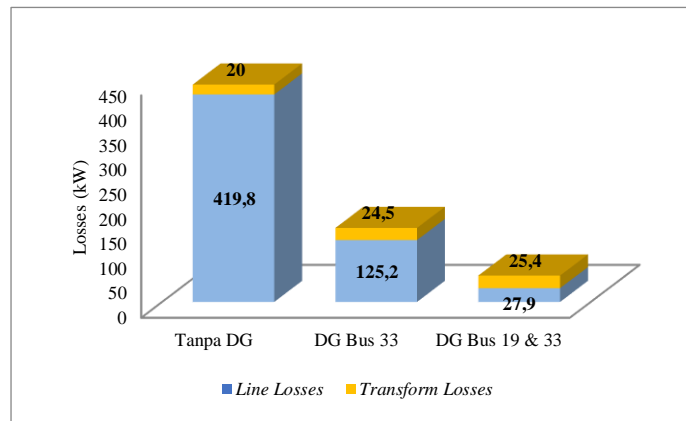
	Tanpa DG	Skenario 1	Skenario 2
Total Losses (%)	8.34	2.1	0.88
Total Losses (kW)	439.8	149.7	53.3
Line Losses (kW)	419.8	125.2	27.9
Transformer Losses (kW)	20	24.5	25.4

Tabel 9. Detail rugi-rugi daya pada masing-masing branch.

Nama	Branch		Tanpa DG		Skenario 1		Skenario 2	
	Bus 1	Bus 2	P _{loss} (kW)	Q _{loss} (kvar)	P _{loss} (kW)	Q _{loss} (kvar)	P _{loss} (kW)	Q _{loss} (kvar)
Cable 1	GI_Bantul	Bus 2	0.11354	-6.8611	0.03964	-6.91433	0.00541	-6.93902
Cable 2	Bus 3	Bus 4	6.39028	4.4836	2.23189	1.48706	0.30551	0.0984806
Cable 3	Bus 4	Bus 5	19.17153	13.4529	6.69604	4.46241	0.91672	0.295941
Cable 4	Bus 5	Bus 6	102.26601	71.8021	35.72161	23.8305	4.89406	1.59097
Cable 5	Bus 6	Bus 7	61.30897	43.0061	20.44192	13.529	2.29842	0.424223
Cable 6	Bus 7	Bus 8	53.41442	37.3487	15.94177	10.3038	1.02159	-0.490762
Cable 7	Bus 8	Bus 9	2.42490	1.69246	0.67749	0.430867	0.02852	-0.0392011
Cable 8	Bus 9	Bus 10	0.06377	-0.0863665	0.06868	-0.0925111	0.06531	-0.1023
Cable 9	Bus 10	Bus 11	0.05102	-0.0955124	0.05504	-0.102302	0.05234	-0.111603
Cable 10	Bus 11	Bus 12	0.01807	-0.039882	0.01951	-0.0427125	0.01856	-0.0463436
Cable 11	Bus 12	Bus 13	0.07111	-0.318909	0.07682	-0.341909	0.07307	-0.365213
Cable 12	Bus 13	Bus 14	0.00791	-0.364292	0.00854	-0.39094	0.00813	-0.411847
Cable 13	Bus 9	Bus 15	101.13390	70.088	22.12300	12.98	0.21798	-2.97368
Cable 14	Bus 15	Bus 16	26.77348	18.4711	4.83068	2.59053	0.26685	-0.764501
Cable 15	Bus 16	Bus 17	19.54452	13.2785	1.99555	0.553858	1.62519	0.211413
Cable 16	Bus 17	Bus 18	2.04339	1.37283	0.13107	-0.0157575	0.34715	0.129887
Cable 17	Bus 18	Bus 19	2.83413	1.89327	0.14123	-0.0634266	0.62644	0.270817
Cable 18	Bus 19	Bus 20	2.40172	1.58232	0.06174	-0.120584	0.15304	-0.0700375
Cable 19	Bus 20	Bus 21	5.12946	3.35157	0.08681	-0.322438	0.24279	-0.245472
Cable 20	Bus 21	Bus 22	0.11186	0.0077384	0.12854	0.0101051	0.12684	0.00131177
Cable 21	Bus 22	Bus 23	0.10085	-0.00016337	0.11589	0.00102302	0.11453	-0.0075310
Cable 22	Bus 23	Bus 24	0.06371	-0.00263754	0.07320	-0.00222435	0.07241	-0.0078457

Nama	Branch		Tanpa DG		Skenario 1		Skenario 2	
	Bus 1	Bus 2	P_{loss} (kW)	Q_{loss} (kvar)	P_{loss} (kW)	Q_{loss} (kvar)	P_{loss} (kW)	Q_{loss} (kvar)
Cable 23	Bus 24	Bus 25	0.16077	-0.102408	0.18474	-0.11407	0.18387	-0.137427
Cable 24	Bus 25	Bus 26	0.01807	-0.205032	0.02076	-0.232021	0.02019	-0.255176
Cable 25	Bus 21	Bus 27	3.31901	1.90463	0.55943	-0.147247	0.15864	-0.486202
Cable 26	Bus 27	Bus 28	4.12135	2.29163	1.02555	-0.0331544	0.35654	-0.584762
Cable 27	Bus 28	Bus 29	3.16553	1.60709	1.62257	0.394582	0.73248	-0.315491
Cable 28	Bus 29	Bus 30	0.19548	0.0928659	0.14116	0.0462785	0.06946	-0.0102576
Cable 29	Bus 30	Bus 31	0.16064	-0.864069	0.18917	-0.998073	0.18153	-1.10413
Cable 30	Bus 31	Bus 32	0.01804	-0.965862	0.02124	-1.11799	0.02031	-1.21921
Cable 31	Bus 30	Bus 33	0.10493	0.027706	0.25165	0.125824	0.15047	0.04806
Cable 32	Bus 33	Bus 34	2.81581	-0.258689	3.31801	-0.258599	3.32106	-0.490934
Cable 33	Bus 34	Bus 35	0.31664	-2.04475	0.37311	-2.36389	0.36606	-2.60319

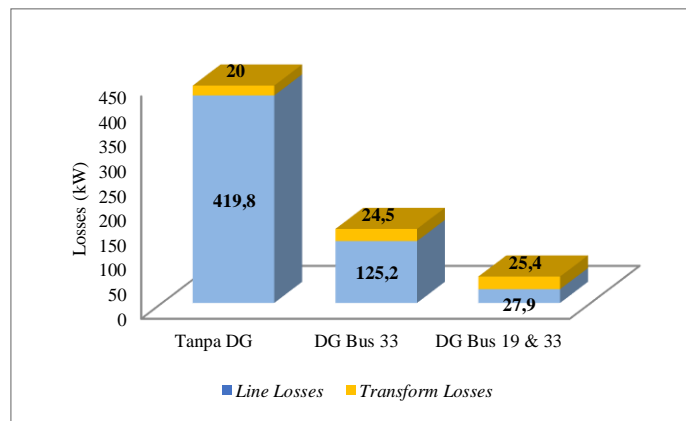
Gambar 13 menunjukkan perbandingan perbandingan rugi-rugi daya pada Penyulang Bantul 05 sebelum dan sesudah ditambahkan DG pada saluran dan transformator:



Gambar 13. Grafik perbandingan rugi-rugi daya pada saluran dan transformator.

Berdasarkan grafik di atas, secara umum nilai rugi-rugi daya aktifnya semakin berkurang seiring bertambahnya jumlah DG yang terpasang. Namun untuk nilai rugi-rugi daya transformator (*transform losses*), sesudah ditambah DG nilainya bertambah. Hal ini disebabkan adanya transformator tambahan saat penambahan DG untuk menaikkan tegangan yang dihasilkan PV dari 0.38 kV menjadi 20 kV.

Gambar 13 menunjukkan perbandingan perbandingan rugi-rugi daya pada Penyulang Bantul 05 sebelum dan sesudah ditambahkan DG pada saluran dan transformator:

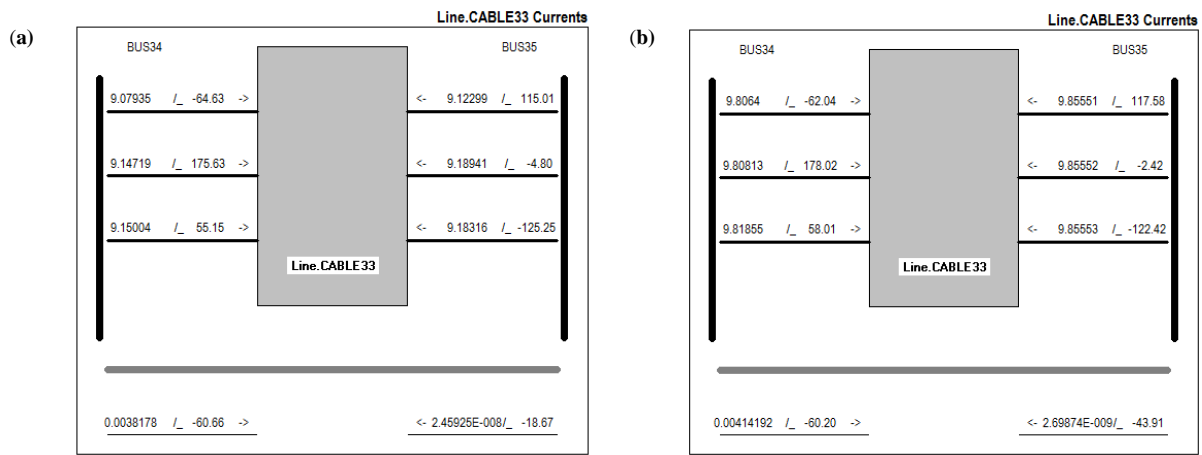


Gambar 13. Grafik perbandingan rugi-rugi daya pada saluran dan transformator.

Berdasarkan grafik di atas, secara umum nilai rugi-rugi daya aktifnya semakin berkurang seiring bertambahnya jumlah DG yang terpasang. Namun untuk nilai rugi-rugi daya transformator (*transform losses*), sesudah ditambah DG nilainya bertambah. Hal ini disebabkan adanya transformator tambahan saat penambahan DG untuk menaikkan tegangan yang dihasilkan PV dari 0.38 kV menjadi 20 kV.

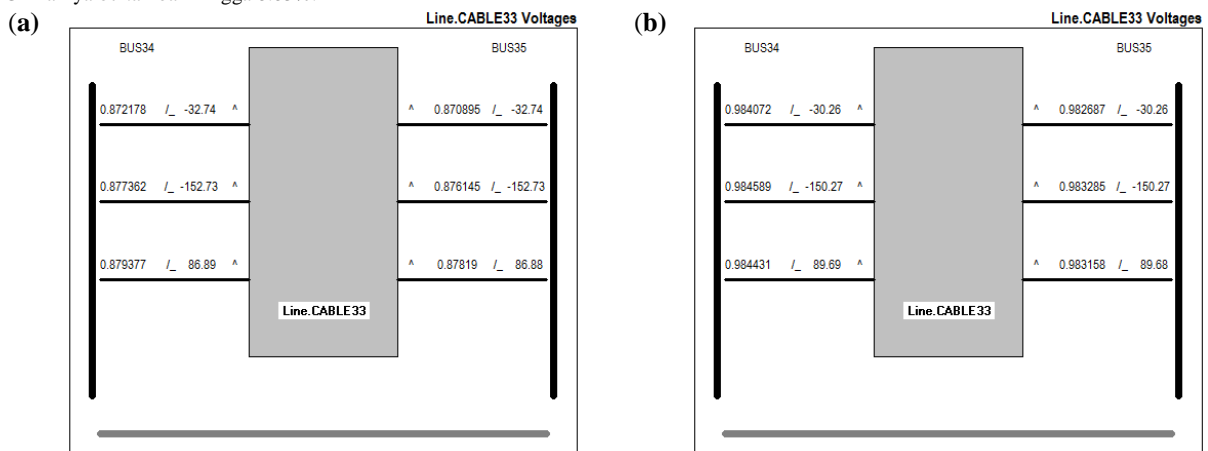
5.4. Visualisasi Tegangan, Arus, dan Daya pada OpenDSS

Kelebihan dari *software* OpenDSS, selain dapat menampilkan nilai profil tegangan dan rugi-rugi daya, OpenDSS juga dapat memvisualisasikan nilai arus, tegangan, dan daya pada tiap fasanya. Pada pemodelan Penyulang Bantul 05 menggunakan sistem 3 fasa sehingga terdapat tiga kawat fasa. Pada Gambar 14, Gambar 15, dan Gambar 16 merupakan salah satu contoh saja dalam memvisualisasikan nilai arus, tegangan, dan daya pada masing – masing fasa dari Cable33 sebelum dan sesudah dipasangi DG.



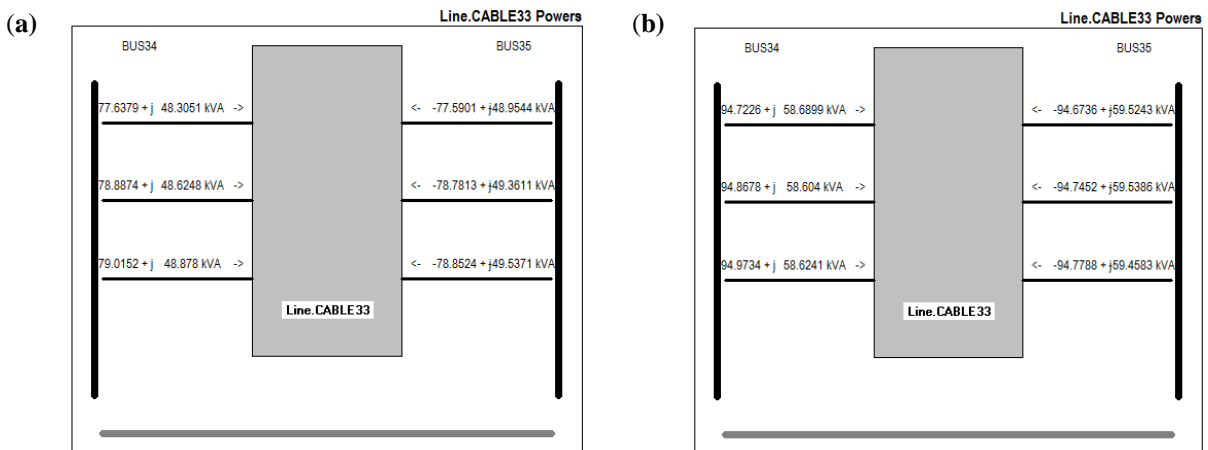
Gambar 14. Visualisasi arus pada Cable 33 (a) Tanpa DG (b) Dengan 2 PV-DG.

Berdasarkan gambar tersebut di atas, dapat disimpulkan bahwa nilai arus yang mengalir pada masing – masing fasa setelah dilakukan penambahan 2 PV-DG nilainya bertambah hingga 8.83%.



Gambar 15. Visualisasi tegangan pada Cable 33 (a) Tanpa DG (b) Dengan 2 PV-DG.

Berdasarkan Gambar 15 dapat disimpulkan bahwa nilai tegangan pada masing–masing fasa Cable33 setelah dilakukan penambahan 2 PV-DG nilainya bertambah hingga 13.12%. Sebelum penambahan DG, nilai tegangan pada tiap fasanya masih beradah di bawah standar kekangan PLN yaitu 0.86 p.u. Setelah penambahan DG, tegangannya menjadi 0.96 p.u. Hal ini membuktikan bahwa penambahan DG pada sistem distribusi Penyulang Bantul 05 dapat meningkatkan kualitas profil tegangan.



Gambar 16. Visualisasi daya semu pada Cable 33 (a) Tanpa DG (b) Dengan 2 PV-DG.

Berdasarkan Gambar 16 dapat disimpulkan bahwa besar daya yang mengalir pada masing–masing fasa setelah dilakukan penambahan 2 PV-DG nilainya bertambah hingga 23.2%. Hal ini dikarenakan nilai daya merupakan hasil perkalian antara arus dan tegangan yang nilainya juga bertambah.

6. Kesimpulan

Penyulang Bantul 05, Yogyakarta memiliki nilai beban yang paling tinggi dan jarak paling jauh yang dilayani oleh Gardu Induk Bantul. Aliran daya menggunakan simulator OpenDSS menunjukkan bahwa profil tegangan pada beberapa *branch* Bantul 05 memiliki nilai profil tegangan dibawah standar SPLN 1:1978 bahkan mencapai nilai terendah 0.86 p.u dengan total rugi-rugi daya sebesar 439.9 kW. Integrasi *Photovoltaic* pada sistem distribusi pada penelitian ini membuktikan bahwa pemasangan pembangkit dapat meningkatkan profil tegangan dan menurunkan total rugi-rugi daya pada sistem.

Penempatan PV-DG dengan skenario 1 dapat memperbaiki nilai profil tegangan bus terendah yang awalnya 0.86 p.u menjadi sebesar 0.92 p.u dan total rugi-rugi daya yang awalnya sebesar 439.9 kW menjadi sebesar 125.2 kW atau 2.1% dari total daya beban. Sedangkan penempatan PV-DG dengan skenario 2 dapat memperbaiki nilai profil tegangan pada bus terendah dari 0.86 p.u menjadi sebesar 0.9695 p.u dan rugi-rugi daya total awalnya sebesar 439.9 kW menjadi sebesar 62.6 kW atau 1.03% dari total daya beban. Dapat ditarik kesimpulan bahwa skenario 2 dengan dua buah PV-DG yang dipasang pada Bus 19 dan 33 sebesar 2500 kW dan 1000 kVAR menjadi yang paling baik dalam memperbaiki profil tegangan dan meminimalkan rugi-rugi daya dibandingkan skenario 1.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Gonen, Turan. (2007). *Electric Power Distribution System Engineering* (2nd ed.). California State University Sacramento, California: CRC Press.
- [2] R.C. Dugan, S. Santoso, M.F. McGranahan, and H.W. Beaty. (2003). *Electrical Power System Quality*. Mc-Graw-Hill Professional engineering. McGraw-Hill.
- [3] Peraturan Pemerintah Republik Indonesia. (2014). Kebijakan Energi Nasional. PP Nomor 79 Tahun 2014.
- [4] R. A. R. Walling, R. Saint, R. C. Dugan, J. Burke, and L. A. Kojovic. (2008). *Summary of distributed resources impact on power delivery system*, IEEE Trans. Power Del., vol. 23, no. 3, (pp. 1636–1644).
- [5] D. Trebolle, T. Gómez, R. Cossent and P. Frias. (2009). *Distribution planning with reliability options for distributed generation*. Elsevier, p.1.
- [6] P.M.S. Carvalho, P.F. Correia, and L.A.F. Ferreira. (2008). Distributed reactive power generation control for voltage rise mitigation in distribution networks. Power Systems, IEEE Transactions on, vol.23, no.2, (pp 766-772).
- [7] JT Putra, S Sarjiya, M Isnaeni. (2015). Impact of high penetration of Photovoltaic Generation on voltage fluctuation of transmission and distribution systems. 2015 2nd International Conference on Information Technology, Computer, and Electrical Engineering (ICITACEE). (pp: 333-336). IEEE.
- [8] U.S. Department of Energy. (2008). *20 Percent wind energy by 2030-Increasing Wind Energy's Contribution to U.S. Electricity Supply*. National Renewable Energy Laboratory.
- [9] Javadian S, Haghifam M-R, Firoozabad MF, Bathaee S. (2013). *Analysis of Protection System's Risk in Distribution Networks with DG*. Int. J Electrical Power Energy Syst.44:688:95.
- [10] JavadianS, Haghiam M-R, Bathaee S, Firoozabad MF. (2013). *Adaptive Centralized Protection Scheme for Distribution System with DG using Risk Analysis for Protective Devices Placement*. Int Journal Electric Power Energy Syst;44:337-45.
- [11] Miyoung Kim, R. Hara, and H. Kita. (2009). Design of the optimal ulct parameters in distribution system with distributed generations, Power Systems, IEEE Transactions on, vol. 24, no. 1, (pp. 297 –305).
- [12] F.A. Viawan and D. Karlsson. (2008). *Voltage and reactive power control in systems with synchronous machine-based distributed generation*. Power Delivery, IEEE Transactions on, vol. 23, no. 2, (pp. 1079 –1087).
- [13] A. Mohamed Imran, M. Kowsalya, and D. P. Kothari. (2014). *A novel integration technique for optimal network reconfiguration and distributed generation placement in power distribution networks*. Int. J. Electr. Power Energy Syst. 63, 461.
- [14] M. H. Moradi, S. M. Reza Tousi, and M. Abedini. (2014). *Multi-objective PFDE algorithm for solving the optimal siting and sizing problem of multiple DG sources*. Int. J. Electr. Power Energy Syst. 56, 117.
- [15] J. D. Kueck, B. J. Kirby, L. M. Tolbert, and D. T. Rizy. (2004). Voltage regulation: Tapping distributed energy resources. Public Utilities Fortnightly, (pp 46–51)
- [16] Tao. Jen hao. (2002). *A Modified Gauss Seidel Algorithm of Three-Phase Power Flow Analysis in Distribution Networks*. International Journal Electric Power & Energy Systems, vol 24. No 2, (pp97-102).
- [17] H. Le Nguyen. (1997). Newthon Raphson method in complex form [power system load flow analysis]. IEEE Transaction on Power Systems, vol.12, No.3, (pp:1355-1359).
- [18] Siregar, Y., Harahap, R. *Penentuan Lokasi Swing Bus di Jaringan Listrik Sumatera Bagian Utara 150 kV*. Teknika, vol. 13, No.2, (pp:123-134).
- [19] Yubin, Y., Mingwu, L. (2012). *Designs of Fast Decoupled Load Flow for Study Purpose*. Energy Procedia, vol 1, part A, (pp:127-133).
- [20] OpenDSS. [Online] <http://sourceforge.net/projects/electricdss/>.
- [21] R.C.Dugan. (2013). *Reference Guide: The Open Distribution System Simulator (OpenDSS)*. Electric Power Resarch Institute.
- [22] Departemen Perusahaan Umum Listrik Negara. (1981). *Hantaran Aluminium Campuran (AAAC) 6201*. SPLN 41-8:1981.
- [23] Karthikeyan V., Rajasekar S., Das V., Karuppanan P., Singh A.K. (2017). *Grid-Connected and Off-Grid Solar Photovoltaic System*. In: Islam F., Mamun K., Amanullah M. (eds) Smart Energy Grid Design for Island Countries. Green Energy and Technology. Springer.
- [24] UQ solar photovoltaic data. [Online] <http://solar.uq.edu.au/>.