

The impact of biogas power plant penetration on power system stability in the 20 kV distribution network of Tanjung Pura

M. Juliansyah Ashari¹, Andik Bintoro², Teuku Multazam³

^{1,3}Department of Electrical Engineering, Malikussaleh University, Indonesia

²Department of Electrical Engineering and Computer, Malikussaleh University, Indonesia

*Corresponding Author: Juliansyah.200150009@mhs.unimal.ac.id

ABSTRACT

The penetration of biogas power plants into the distribution network can affect power system stability, particularly in the 20 kV distribution network in Tanjung Pura. This study aims to analyze the impact of biogas power plant penetration on voltage stability and power flow dynamics in the distribution network. A simulation-based approach using ETAP software is employed to evaluate different penetration levels, ranging from low to high. The results indicate that biogas power plant (PLTBg) penetration increases system voltage from the existing 17.92 kV (89.63%) to 18.34 kV (91.73%) at 25% penetration and reaches 19.50 kV (97.50%) at 100% penetration. Under a load increase of 25% to 75%, the voltage without penetration ranges from 17.56 kV (87.80%) to 17.05 kV (85.30%). With gradual penetration, the voltage rises to 17.99 kV (90%)–17.28 kV (86.40%) at 25% penetration and reaches 19.15 kV (95.40%)–18.47 kV (92.30%) at 75% penetration. Additionally, higher PLTBg penetration reduces active power losses but increases reactive power losses, which could compromise network stability if not properly compensated. The optimal condition is observed at 50% loading with 75% penetration, where voltage remains within normal limits while both active and reactive power losses are more stable compared to other scenarios.

Keywords: *Biogas Power Plant, Stability, ETAP 19.0.1, Load Increment, Renewable Energy Penetration*

ABSTRAK

Penetrasi pembangkit listrik tenaga biogas (PLTBg) ke dalam jaringan distribusi dapat memengaruhi stabilitas sistem tenaga listrik, khususnya pada jaringan distribusi 20 kV di Tanjung Pura. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis dampak penetrasi PLTBg terhadap stabilitas tegangan dan dinamika aliran daya dalam jaringan distribusi. Studi ini menggunakan simulasi berbasis perangkat lunak ETAP untuk mengevaluasi berbagai tingkat penetrasi, dari rendah hingga tinggi. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penetrasi PLTBg meningkatkan tegangan sistem dari kondisi awal 17,92 kV (89,63%) menjadi 18,34 kV (91,73%) pada penetrasi 25% dan mencapai 19,50 kV (97,50%) pada penetrasi 100%. Pada skenario peningkatan beban 25% hingga 75%, tegangan tanpa penetrasi berada dalam rentang 17,56 kV (87,80%) hingga 17,05 kV (85,30%). Dengan penetrasi bertahap, tegangan meningkat menjadi 17,99 kV (90%)–17,28 kV (86,40%) pada penetrasi 25% dan mencapai 19,15 kV (95,40%)–18,47 kV (92,30%) pada penetrasi 75%. Selain itu, peningkatan penetrasi PLTBg mengurangi rugi daya aktif tetapi meningkatkan rugi daya reaktif, yang dapat mengganggu stabilitas jaringan jika tidak dikompensasi dengan baik. Kondisi optimal diperoleh pada skenario pembebanan 50% dengan penetrasi 75%, di mana tegangan tetap dalam batas normal, sementara rugi daya aktif dan reaktif lebih stabil dibandingkan skenario lainnya.

Kata kunci: *Pembangkit Listrik Tenaga Biogas, Stabilitas, ETAP 19.0.1, Penambahan beban, Penetrasi Energi Terbarukan.*

Manuscript received 13 Maret 2025; accepted 31 May. 2025.

Journal Geuthee of Engineering and Energy is licensed under a Creative Commons Attribution-Share Alike 4.0 International License.



1. PENDAHULUAN

Pada dekade terakhir, isu terkait penggunaan bahan bakar fosil dan peningkatan efek rumah kaca telah menjadi perhatian global yang krusial. Dampak dari penggunaan bahan bakar fosil terhadap lingkungan mendorong perkembangan berbagai inovasi di bidang sistem tenaga listrik. Salah satu inovasi penting adalah pengembangan energi alternatif seperti energi angin, solar panel, bahan bakar nabati (biofuel), dan biogas. Penggunaan energi terbarukan ini bertujuan untuk mengurangi ketergantungan pada bahan bakar fosil serta menurunkan emisi gas rumah kaca[1].

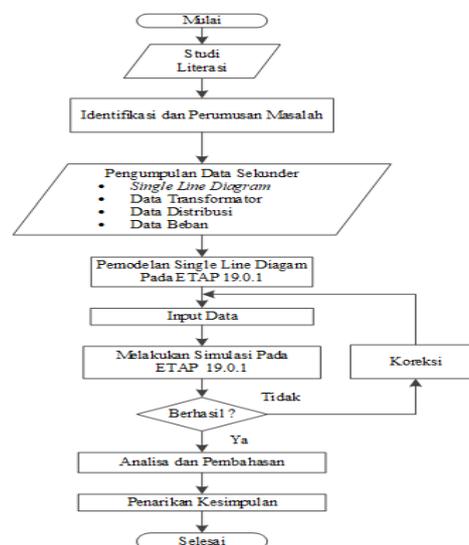
PT Perkebunan Nusantara II, sebagai produsen energi independen (IPP), mengoperasikan Pembangkit Listrik Tenaga Biogas (PLTBg) berkapasitas 1x1,1 MW sejak awal 2020, menyuplai 8,3 GWh ke Jaringan Distribusi 20 kV PT PLN (Persero) ULP Tanjung Pura. Namun, peningkatan beban listrik di wilayah tersebut menuntut pasokan yang lebih stabil dan andal, terutama dengan integrasi energi terbarukan[2].

Meskipun PLTBg menawarkan solusi ramah lingkungan, integrasinya ke jaringan menghadapi tantangan teknis, termasuk jatuh tegangan di ujung jaringan, terutama saat terjadi gangguan atau ketidakstabilan. Fluktuasi tegangan, gangguan sementara, dan perubahan beban dapat menyebabkan pemadaman mendadak pada PLTBg, mengganggu operasi pembangkit serta keandalan pasokan listrik ke konsumen.

Penelitian ini bertujuan untuk melakukan simulasi dan analisis guna mengevaluasi pengaruh penetrasi pembangkit listrik tenaga biogas terhadap stabilitas jaringan distribusi di Tanjung Pura serta, pengaruh dari persebaran pembebanan yang berbeda-beda terhadap PLTBg. Simulasi akan dilakukan menggunakan perangkat lunak Electrical Transient Analyzer Program (ETAP) untuk mengevaluasi kinerja jaringan listrik sebelum dan sesudah adanya penetrasi PLTBg.

2. RESEARCH METHOD

Metode penelitian dalam kajian ini digunakan untuk memudahkan peneliti dalam melakukan langkah kerja. Pada penelitian ini langkah kerja yang dilakukan meliputi beberapa tahapan seperti terlihat pada gambar 1 dimulai dari studi literasi, identifikasi dan perumusan masalah, pengumpulan data, pemodelan single line diagram pada ETAP, input data, melakukan simulasi pada ETAP, hasil simulasi dan analisa:



Gambar 1.1 Metode penelitian

2.1 Sistem Tenaga Listrik

Sistem tenaga listrik modern merupakan satu kesatuan yang terintegrasi antara unit pembangkit tenaga listrik, system transmisi dan juga sistem distribusi tenaga listrik sebagai

sebuah sistem interkoneksi beserta sistem proteksi di dalamnya yang berfungsi untuk menyalurkan energi listrik dari sumber tenaga listrik sampai ke pelanggan/konsumen listrik[3].

2.2 Sistem Distribusi Tenaga Listrik

Sistem distribusi adalah bagian dari sistem tenaga listrik yang paling dekat dengan pelanggan. Faktor ini menjadikan sistem distribusi dengan tingkat gangguan paling banyak dibandingkan dengan sistem lainnya. Jaringan distribusi terdiri dari jaringan penghantar yang menghubungkan antara gardu induk pusat beban dengan pelanggan. Jaringan distribusi berfungsi untuk mendistribusikan listrik ke pelanggan sesuai kebutuhan. Level tegangan pada sistem distribusi tenaga listrik dibagi menjadi 2 bagian yaitu sistem distribusi primer dan sistem distribusi sekunder[4].

2.2.1 Sistem Distribusi Sekunder

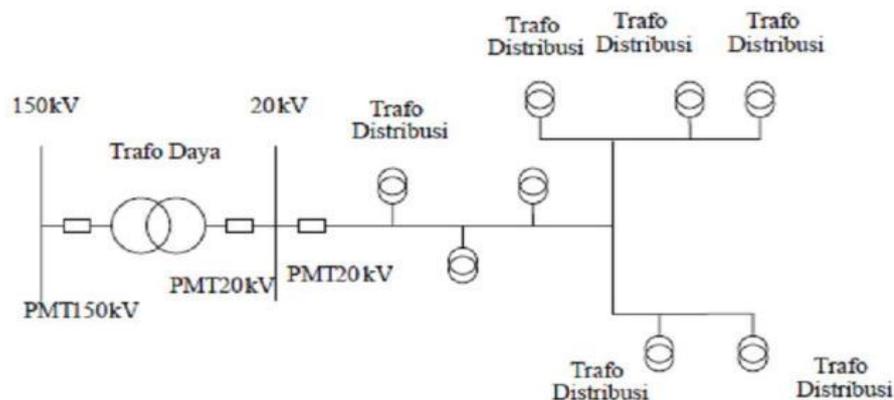
Jaringan distribusi 20 kV sering disebut sistem distribusi tegangan menengah dan jaringan distribusi 380/220V sering disebut jaringan distribusi sekunder atau disebut jaringan tegangan rendah 380/220V[5].

2.2.2 Sistem Distribusi Primer

Jaringan pada sistem distribusi tegangan menengah (primer 20 kV) dapat dikelompokkan menjadi lima model yaitu.

a. Jaringan Distribusi Pola Radial

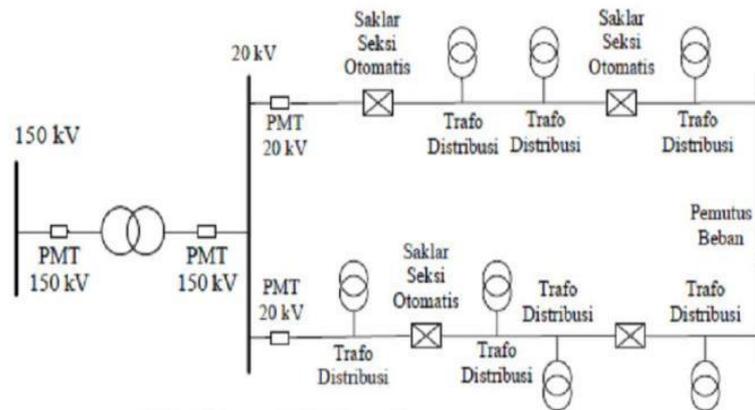
Bentuk jaringan system distribusi radial merupakan bentuk jaringan distribusi yang paling sederhana, terutama ditinjau dari segi pemeliharaannya. Pada saluran radial mempunyai satu jalan aliran daya ke beban. Sistem ini biasa dipakai untuk melayani daerah beban dengan kerapatan beban rendah dan sedang. Pada sistem saluran radial sebuah feeder menyalurkan tenaga listrik yang terpisah antara feeder satu dengan feeder yang lainnya[6].



Gambar 2.1 Jaringan Distribusi Pola Radial

b. Jaringan Distribusi Pola Lingkaran (Loop)

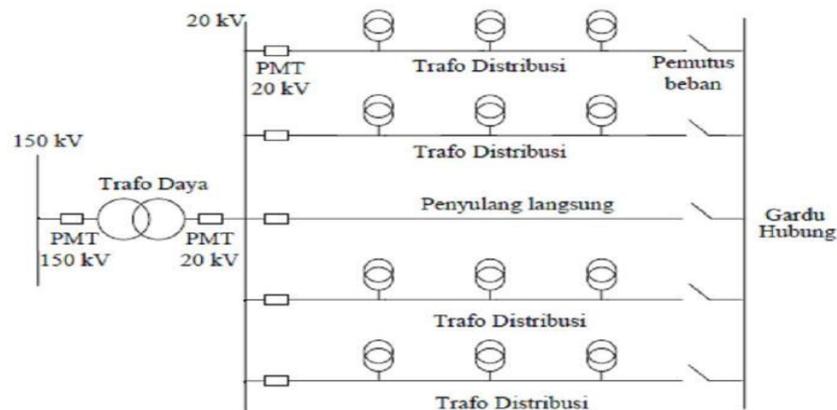
Sistem jaringan ini disebut rangkaian tertutup karena saluran primer yang menyalurkan daya sepanjang daerah beban yang dilayani membentuk suatu rangkaian tertutup. Keunggulan dari sistem distribusi jaringan lingkaran adalah perawatannya sederhana, keandalan yang tinggi dan tegangan baik. Kekurangan sistem ini adalah biaya investasinya cukup mahal bila dibandingkan dengan jaringan distribusi radial, hal ini disebabkan akibat banyaknya menggunakan pemangam serta penghubung tenaga listrik[7].



Gambar 2.2 Jaringan Distribusi Pola Lingkaran (Loop)

c. Jaringan Distribusi Pola Spindel

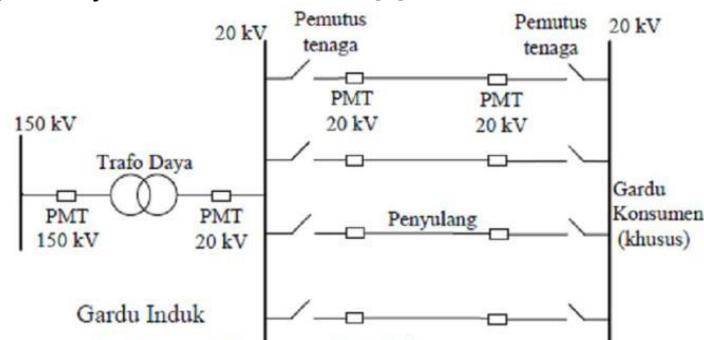
Jaringan primer pola spindel merupakan pengembangan dari pola radial dan loop terpisah. Beberapa saluran yang keluar dari gardu induk diarahkan menuju suatu tempat yang disebut gardu hubung (GH), kemudian antara GI dan GH tersebut dihubungkan dengan satu saluran yang disebut express feeder. Sistem gardu distribusi ini terdapat disepanjang saluran kerja dan terhubung secara seri. Saluran kerja yang masuk ke gardu dihubungkan oleh saklar pemisah, sedangkan saluran yang keluar dari gardu dihubungkan oleh sebuah saklar beban. Jadi sistem ini dalam keadaan normal bekerja secara radial dan dalam keadaan darurat bekerja secara loop melalui saluran cadangan dan GH[8].



Gambar 2.3 Jaringan Distribusi Pola Spindel

d. Jaringan Distribusi Pola Hantaran Penghubung (Tie Line)

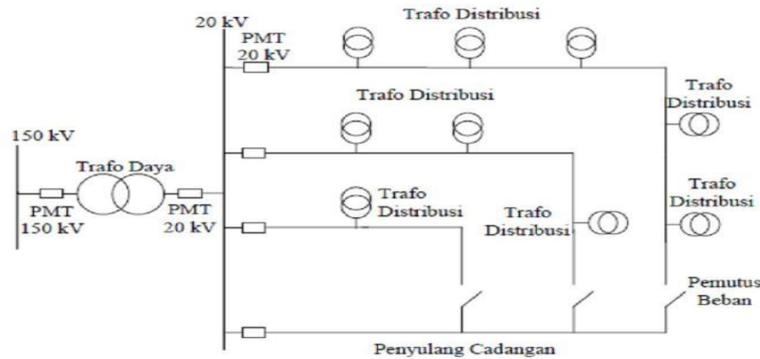
Pola jaringan ini mempunyai beberapa rel daya dan antara rel-rel tersebut dihubungkan oleh saluran penghubung yang disebut tie feeder. Dengan demikian setiap gardu distribusi dapat menerima atau mengirim daya dari atau ke rel lain[9].



Gambar 2.4 Jaringan Distribusi Pola Hantaran Penghubung (Tie Line)

e. Jaringan Distribusi Pola Gugus/Klaster

Konfigurasi gugus seperti pada gambar berikut ini banyak digunakan untuk kota besar yang mempunyai kepadatan beban yang tinggi. Dalam sistem ini terdapat penyulang cadangan. Dimana penyulang ini berfungsi bila ada gangguan yang terjadi pada salah satu penyulang konsumen maka penyulang cadangan inilah yang menggantikan fungsi suplai ke konsumen[10].



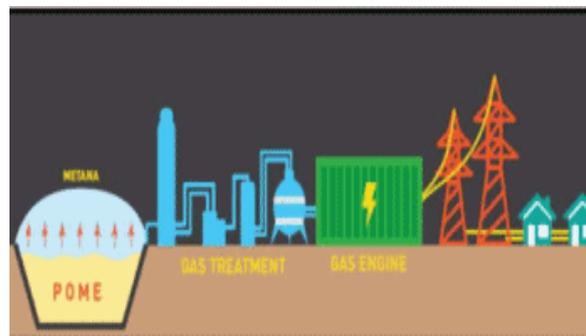
Gambar 2.5 Jaringan Distribusi Pola Gugus/Klaster

2.3 Proses Pemanfaatan Biogas Menjadi Energi Listrik

Metode pemanfaatan biogas dilakukan melalui methane recovery, dengan teknologi umum seperti covered lagoon, di mana permukaan kolam ditutup menggunakan bahan tahan api untuk menangkap gas metana. Biogas yang dihasilkan kemudian dimurnikan dari gas pengotor.

Limbah cair industri kelapa sawit (Palm Oil Mill Effluent atau POME) memiliki kandungan organik tinggi yang dapat mencemari lingkungan jika tidak diolah. Pengolahan umumnya dilakukan dengan injeksi bakteri atau activated sludge untuk menurunkan Chemical Oxygen Demand (COD) dan Biological Oxygen Demand (BOD) [11 - 12].

Proses anaerobik lebih dipilih karena konsumsinya rendah dan menghasilkan biogas sebagai energi tambahan. Biogas mentah mengandung berbagai gas seperti H_2S , CO_2 , dan uap air yang perlu dipisahkan sebelum digunakan. H_2S dipisahkan melalui scrubber untuk mencegah korosi pada turbin gas. Kandungan air dihilangkan dengan dehumidifier, sementara CO_2 dapat dipisahkan menggunakan stripper untuk meningkatkan kemurnian metana. Gas metana yang telah dimurnikan digunakan sebagai bahan bakar turbin gas untuk menghasilkan listrik atau sebagai sumber energi untuk boiler dalam sistem utilitas pabrik kelapa sawit. Diagram alir peroses pembangkit listrik biogas dapat di tinjau pada Gambar berikut[13 - 14].



Gambar 2.6 Diagram Pembangkit Listrik Tenaga Biogas

3. RESULTS AND DISCUSSION

Analisa perbandingan profil tegangan merupakan langkah penting dalam evaluasi performa sistem tenaga listrik. Hasil simulasi aliran daya menunjukkan perbedaan antara profil tegangan yang diperoleh dari simulasi. Langkah ini memberikan wawasan mendalam terkait stabilitas dan distribusi tegangan dalam sistem. Perbandingan profil tegangan meliputi jatuh tegangan, dan peningkatan tegangan dari data yang diperoleh sebelum dan setelah penetrasi PLTBg diberikan pada Tabel berikut.

Tabel 3.1 Profil Tegangan

Bus ID	Profil Tegangan (kV)				
	<i>Eksisting</i>	PLTBg 25%	PLTBg 50%	PLTBg 75%	PLTBg 100 %
Bus 1138-993	17,92	18,34	18,74	19,13	19,49

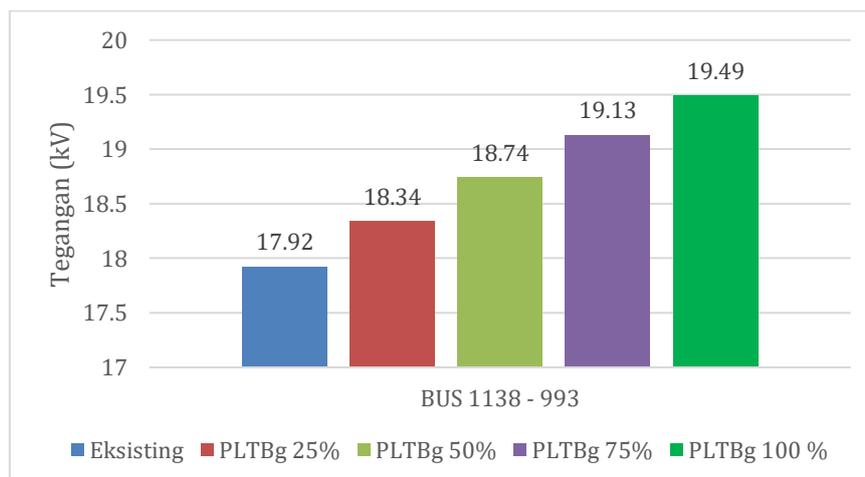
Tabel 3.2 Jatuh Tegangan

Bus ID	Jatuh Tegangan (kV)				
	<i>Eksisting</i>	PLTBg 25%	PLTBg 50%	PLTBg 75%	PLTBg 100 %
Bus 1138-993	1,66	1,26	0,87	0,5	1,66

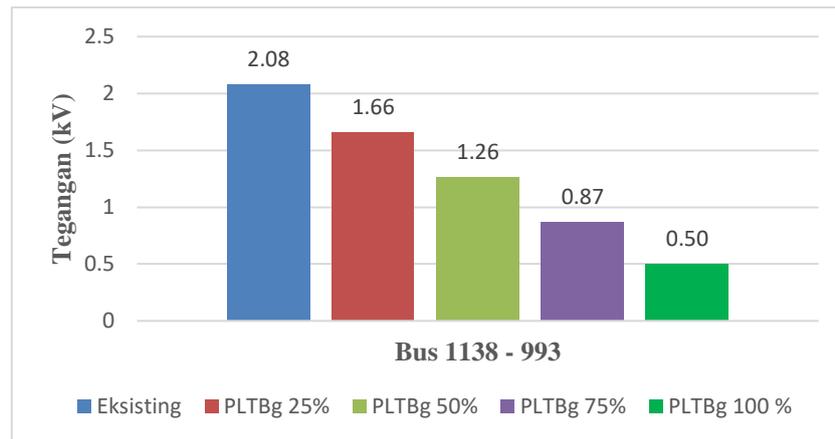
Tabel 3.3 Peningkatan Tegangan

Bus ID	Peningkatan Tegangan (kV)				
	PLTBg 25%	PLTBg 50%	PLTBg 75%	PLTBg 100 %	
Bus 1138-993	0,42	0,82	1,2	1,57	

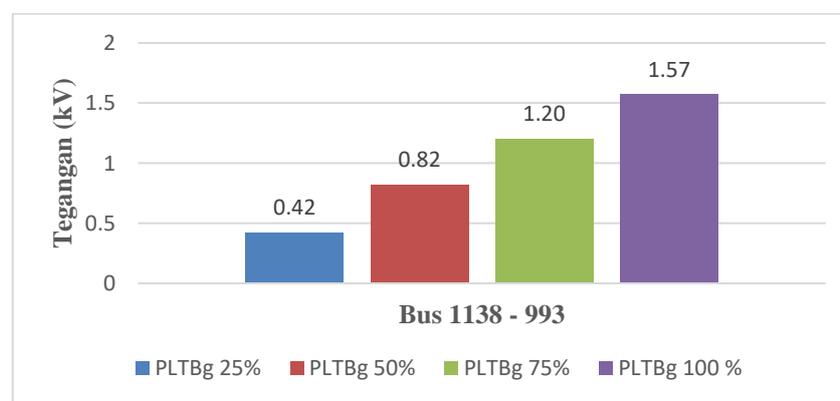
Perbandingan profil tegangan, jatuh tegangan dan peningkatan tegangan dari data yang di peroleh sebelum dan sesudah penetrasi PLTBg juga di muat dalam grafik terlihat pada Gambar berikut.



Gambar 3.1 Grafik perbandingan profil tegangan



Gambar 3.2 Grafik perbandingan jatuh tegangan



Gambar 3.3 Grafik perbandingan peningkatan tegangan

Gambar 3.1 dan 3.3 menampilkan grafik perbandingan profil tegangan sebelum dan setelah integrasi bertahap Pembangkit Listrik Tenaga Biogas (PLTBg). Pada bus kritis, seperti bus 1138 hingga bus 993, terjadi peningkatan tegangan seiring kenaikan penetrasi PLTBg. Dari kondisi awal 17,92 kV, tegangan meningkat menjadi 18,34 kV (25%), 18,74 kV (50%), 19,13 kV (75%), dan mencapai 19,49 kV (100%), dengan total kenaikan 1,57 kV.

Gambar 3.2 menunjukkan grafik penurunan tegangan sebelum dan setelah integrasi PLTBg. Sebelum integrasi, penurunan tegangan tercatat 2,08 kV dari tegangan nominal 20 kV. Setelah penetrasi bertahap, nilai ini berkurang menjadi 1,66 kV (25%), 1,26 kV (50%), 0,87 kV (75%), dan mencapai 0,50 kV pada penetrasi penuh, menunjukkan perbaikan signifikan dalam stabilitas tegangan jaringan. Semakin besar daya yang diintegrasikan oleh PLTBg, semakin kecil nilai penurunan tegangan pada sistem. Hal ini menunjukkan bahwa integrasi pembangkit energi terbarukan, seperti PLTBg, memberikan dampak positif terhadap performa jaringan distribusi ULP Tanjung Pura. Berikut ini analisis keseluruhan profil tegangan sebelum dan setelah penetrasi PLTBg pada sistem distribusi:

- Tegangan pada semua bus mengalami peningkatan seiring setelah penetrasi PLTBg, menunjukkan kontribusi positif dari PLTBg terhadap profil tegangan.
- Jatuh tegangan pada setiap bus berkurang seiring dengan peningkatan tingkat penetrasi PLTBg, menunjukkan efek positif dari integrasi PLTBg terhadap mitigasi jatuh tegangan atau stabilitas tegangan membaik.
- Setelah penetrasi PLTBg pada bus TP-1 mengalami peningkatan tegangan paling sedikit dibanding bus yang lain. Hal ini dikarenakan bus TP-1 merupakan bus awal atau paling jauh dari lokasi bus penetrasi PLTBg.
- Bus TP-3 dan bus TP-4 mengalami peningkatan tegangan paling signifikan, menunjukkan dampak positif dari penetrasi PLTBg.

Nilai daya reaktif meningkat seiring dengan bertambahnya tingkat integrasi PLTBg. Hal ini menunjukkan bahwa pembangkit listrik tenaga biogas memberikan kontribusi daya reaktif yang signifikan terhadap jaringan.

Analisa perbandingan rugi-rugi daya dalam evaluasi performa sistem tenaga listrik dapat dilihat pada Tabel 3.4 berikut.

Tabel 3.4 Perbandingan Rugi-Rugi Daya Aktif

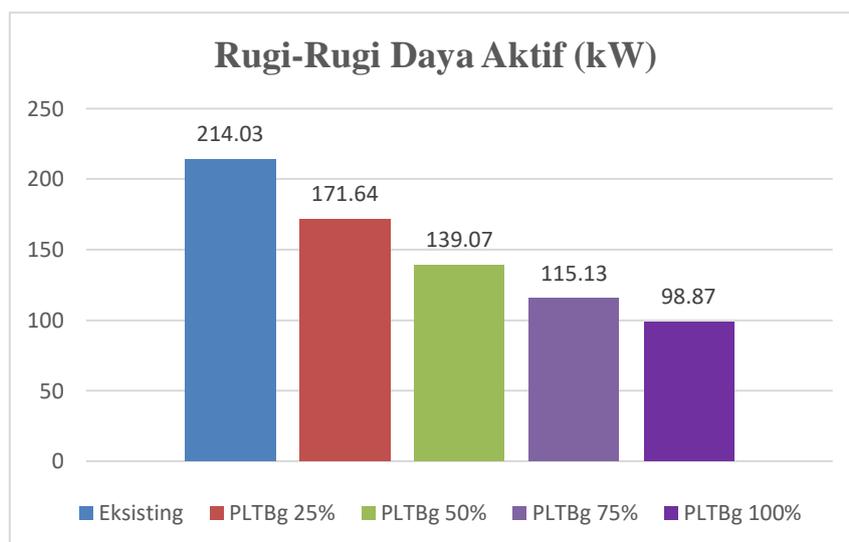
Rugi-Rugi Daya Aktif (kW)				
Eksisting	PLTBg 25%	PLTBg 50%	PLTBg 75%	PLTBg 100%
214,03	171,64	139,07	115,13	98,87

Tabel 3.5 Perbandingan Rugi-Rugi Daya Reaktif

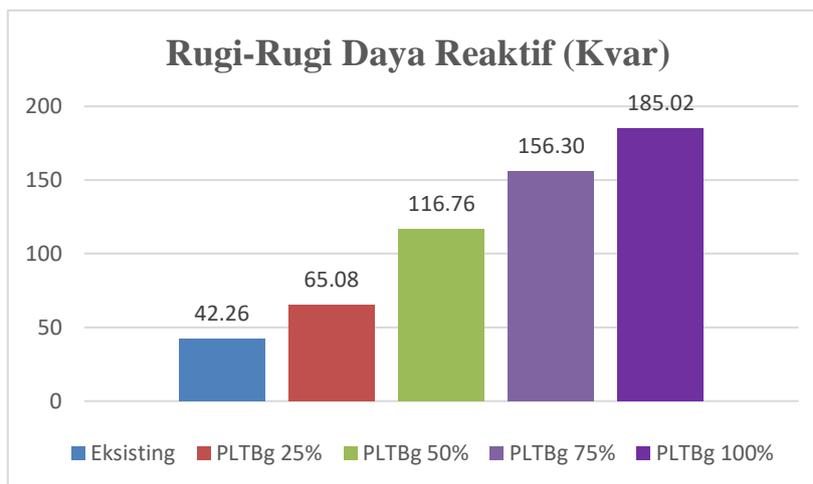
Rugi-Rugi Daya Reaktif (kVar)				
Eksisting	PLTBg 25%	PLTBg 50%	PLTBg 75%	PLTBg 100%
42,26	65,08	116,76	156,3	185,02

Tabel 3.4 menunjukkan bahwa integrasi bertahap Pembangkit Listrik Tenaga Biogas (PLTBg) secara signifikan mengurangi rugi daya aktif, meningkatkan efisiensi jaringan. Pada kondisi eksisting, rugi daya aktif sebesar 214,03 kW menurun menjadi 171,64 kW pada penetrasi 25%, lalu 139,07 kW (50%), 115,13 kW (75%), dan mencapai nilai terendah 98,87 kW pada penetrasi 100%. Tabel 3.5 menunjukkan tren sebaliknya pada rugi daya reaktif, yang meningkat seiring penetrasi PLTBg. Dari -42,26 kVar pada kondisi awal, rugi daya reaktif naik menjadi -65,08 kVar (25%), -116,76 kVar (50%), -156,30 kVar (75%), dan -185,02 kVar pada penetrasi penuh. Peningkatan ini menunjukkan kontribusi daya reaktif dari PLTBg, yang dapat memengaruhi stabilitas tegangan jaringan, sehingga memerlukan strategi kompensasi seperti pemasangan kapasitor.

Perbandingan nilai rugi-rugi daya aktif (kW) serta daya reaktif (kVar) juga dimuat dalam bentuk grafik, lihat Gambar 3.4 dan 3.5 berikut.



Gambar 3.4 Perbandingan Rugi-Rugi Daya Aktif



Gambar 3.5 Perbandingan Rugi-Rugi Daya Reaktif

Berikut adalah beberapa aspek analisis rugi-rugi daya aktif serta juga daya reaktif berdasarkan tabel dan grafik tersebut:

- Penetrasi PLTBg memberikan pengaruh positif dengan mengurangi rugi-rugi daya aktif secara signifikan. Efisiensi jaringan meningkat seiring penetrasi yang lebih tinggi.
- Penambahan daya reaktif menunjukkan kebutuhan untuk penanganan lebih lanjut agar tidak memengaruhi stabilitas sistem, seperti penggunaan perangkat kompensasi daya reaktif atau pengaturan ulang jaringan.
- Pengelolaan daya reaktif perlu ditingkatkan pada skenario penetrasi PLTBg yang lebih tinggi untuk menjaga stabilitas sistem sekaligus memanfaatkan manfaat dari pengurangan rugi daya aktif.

3.2 Perbandingan Analisa dan Hasil Pengaruh Penambahan Beban

Pada sub bab ini, akan dibahas hasil simulasi yang dilakukan untuk menganalisis pengaruh penambahan pembebanan terhadap performa Pembangkit Listrik Tenaga Biogas (PLTBg). Analisis ini bertujuan untuk memahami bagaimana perubahan beban memengaruhi parameter kinerja utama, seperti efisiensi pembangkitan, stabilitas tegangan, dan keandalan sistem secara keseluruhan. Perbandingan profil tegangan meliputi jatuh tegangan, dan peningkatan tegangan dari data yang diperoleh sebelum dan setelah penetrasi PLTBg diberikan pada Tabel 3.6

Tabel 3.6 Perbandingan nilai profil tegangan

	Profil Tegangan (kV)				
	Tanpa Penetrasi	Penetrasi 25%	Penetrasi 50%	Penetrasi 75%	Penetrasi 100%
Beban Awal	17,92	18,34	18,74	19,13	19,49
Beban +25%	17,56	17,99	18,39	18,78	19,15
Beban +50%	17,38	17,63	18,04	18,43	18,8
Beban +75%	17,34	17,48	17,82	18,14	18,45

Tabel 3.7 Perbandingan Drop Tegangan (kV)

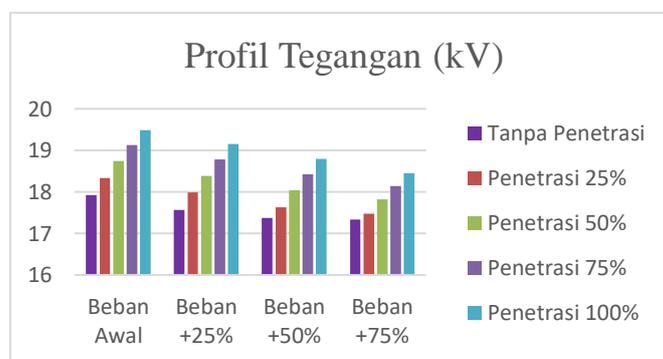
	Jatuh Tegangan (kV)				
	Tanpa Penetrasi	Penetrasi 25%	Penetrasi 50%	Penetrasi 75%	Penetrasi 100%

Beban Awal	2,08	1,66	1,26	0,87	0,51
Beban +25%	2,44	2,01	1,61	1,22	0,85
Beban +50%	2,62	2,37	1,96	1,57	1,2
Beban +75%	2,66	2,52	2,18	1,86	1,55

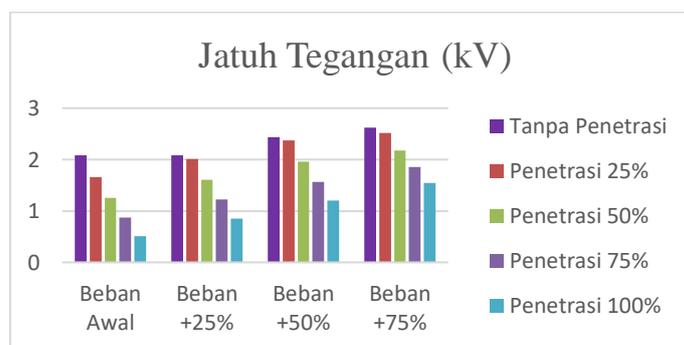
Tabel 3.8 Perbandingan Peningkatan Tegangan (kV)

	Peningkatan Tegangan (kV)			
	Penetrasi 25%	Penetrasi 50%	Penetrasi 75%	Penetrasi 100%
Beban Awal	0,42	0,40	0,39	0,36
Beban +25%	0,43	0,40	0,39	0,37
Beban +50%	0,25	0,41	0,39	0,37
Beban +75%	0,14	0,34	0,32	0,31

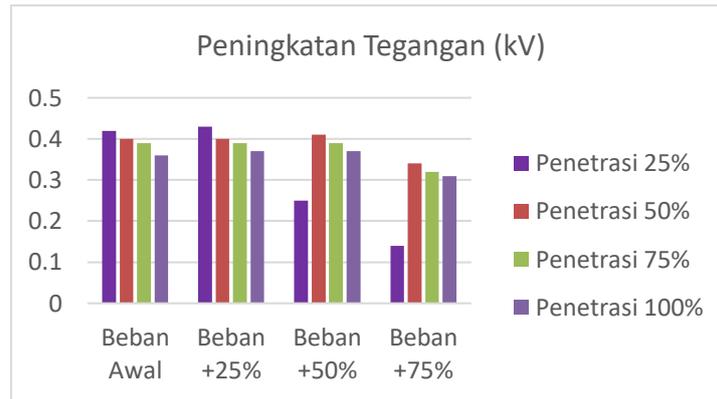
Perbandingan profil tegangan, jatuh tegangan dan peningkatan tegangan dari data yang di peroleh sebelum dan sesudah penetrasi PLTBg juga di muat dalam grafik terlihat pada Gambar berikut.



Gambar 3.6 Grafik perbandingan profil tegangan



Gambar 3.7 Grafik jerbandingan jatuh tegangan



Gambar 3.8 Grafik peningkatan tegangan (voltage increase)

Gambar 3.6 dan 3.8 menampilkan grafik perbandingan profil tegangan sebelum dan setelah integrasi bertahap Pembangkit Listrik Tenaga Biogas (PLTBg). Pada bus kritis, seperti bus 1138 hingga bus 993, tegangan meningkat seiring kenaikan penetrasi PLTBg. Pada beban awal hingga penambahan beban 75% tanpa penetrasi, tegangan tercatat 17,92 kV dan 17,34 kV. Setelah penetrasi PLTBg 25% hingga 100%, tegangan meningkat menjadi 18,34 kV (beban awal) dan 18,45 kV (penetrasi 100% pada beban 75%). Kenaikan tegangan terendah tercatat 0,14 kV (beban 75%), sedangkan tertinggi 0,43 kV (beban awal). Gambar 3.7 menunjukkan grafik penurunan tegangan sebelum dan setelah integrasi PLTBg. Sebelum integrasi, penurunan tegangan mencapai 2,08 kV dari tegangan nominal 20 kV. Setelah penetrasi bertahap, nilai ini menurun menjadi 1,66 kV (25%), 1,26 kV (50%), 0,87 kV (75%), dan mencapai 0,50 kV (100%). Hasil ini menunjukkan bahwa semakin besar daya yang diintegrasikan oleh PLTBg, semakin kecil nilai penurunan tegangan, sehingga PLTBg berkontribusi positif terhadap stabilitas jaringan distribusi ULP Tanjung Pura. Hasil analisis keseluruhan profil tegangan sebelum dan setelah penetrasi pembangkit biogas (PLTBg) pada sistem distribusi berdasarkan tabel yang diberikan:

- Tegangan pada semua kondisi beban (beban awal, beban +25%, beban +50%, dan beban +75%) mengalami peningkatan seiring bertambahnya tingkat penetrasi PLTBg. Sebagai contoh, pada beban awal, tegangan tanpa penetrasi adalah 17,92 kV, sedangkan pada penetrasi 100% meningkat menjadi 19,49 kV. Pada beban +75%, tegangan tanpa penetrasi adalah 17,34 kV, dan pada penetrasi 100% meningkat menjadi 18,45 kV.
- Jatuh tegangan pada sistem berkurang secara signifikan dengan peningkatan penetrasi PLTBg, baik pada beban awal maupun beban yang lebih tinggi. Sebagai contoh, pada beban awal, jatuh tegangan tanpa penetrasi adalah 2,08 kV, sedangkan pada penetrasi 100% menurun menjadi 0,51 kV. Pada beban +75%, jatuh tegangan tanpa penetrasi adalah 2,66 kV, dan pada penetrasi 100% menurun menjadi 1,55 kV. Hal ini menunjukkan bahwa penetrasi PLTBg membantu mengurangi jatuh tegangan secara konsisten.
- Peningkatan tegangan pada semua beban cenderung menurun ketika penetrasi PLTBg mendekati kapasitas penuh (100%). Sebagai contoh, pada beban awal, peningkatan tegangan akibat penetrasi 25% adalah 0,42 kV, sedangkan pada penetrasi 100% hanya mencapai 0,36 kV. Pola serupa terlihat pada beban +75%, di mana peningkatan tegangan pada penetrasi 25% adalah 0,14 kV, dan pada penetrasi 100% menurun menjadi 0,31 kV.
- Pada beban +25%, tegangan profil tanpa penetrasi adalah 17,56 kV, dan dengan penetrasi 100% meningkat menjadi 19,15 kV. Untuk beban +50%, tegangan tanpa penetrasi adalah 17,38 kV, dan pada penetrasi 100% meningkat menjadi 18,80 kV. Peningkatan tegangan tetap signifikan di semua tingkat beban, tetapi menurun pada beban yang lebih tinggi.
- Penetrasi PLTBg memberikan kontribusi yang signifikan terhadap stabilisasi tegangan meskipun beban bertambah, tetapi efektivitasnya cenderung berkurang pada beban yang lebih besar. Misalnya, pada beban +75%, tegangan profil tanpa penetrasi adalah 17,34 kV,

dan pada penetrasi 100% meningkat menjadi 18,45 kV, dengan peningkatan tegangan yang lebih kecil dibandingkan beban awal.

Perbandingan nilai rugi-rugi daya aktif (kW) serta daya reaktif (kVar) juga dimuat dalam Tabel 3.9 berikut.

Tabel 3.9 Perbandingan nilai rugi-rugi daya aktif

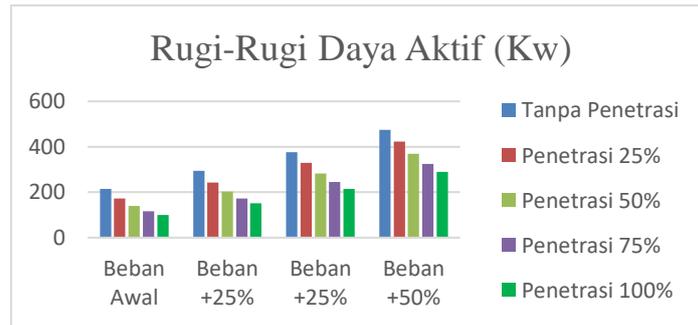
	Rugi-Rugi Daya Aktif (kW)				
	Tanpa Penetrasi	Penetrasi 25%	Penetrasi 50%	Penetrasi 75%	Penetrasi 100%
Beban Awal	214,03	171,64	139,07	115,13	98,87
Beban +25%	293,97	243,82	203,97	173,15	150,34
Beban +50%	375,08	329,41	282,16	244,37	214,94
Beban 75%	475,28	424,18	369,81	325,33	289,56

Tabel 3.10 Perbandingan nilai rugi-rugi daya Reaktif

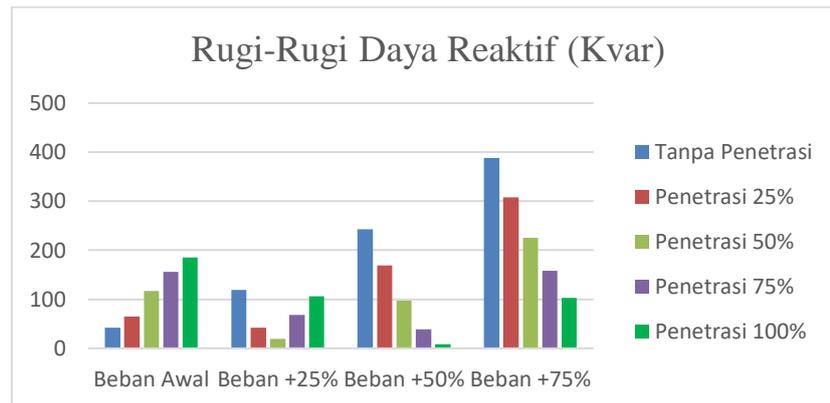
	Rugi-Rugi Daya Reaktif (Kvar)				
	Tanpa Penetrasi	Penetrasi 25%	Penetrasi 50%	Penetrasi 75%	Penetrasi 100%
Beban Awal	42,26	65,08	116,76	156,3	185,02
Beban +25%	118,85	42,63	19,09	68,11	105,87
Beban +50%	242,6	168,97	97,03	38,4	8,49
Beban +75%	388,41	307,72	225,94	158,07	102,45

Tabel 3.9 dan 3.10 menyajikan data rugi daya aktif dan reaktif pada kondisi eksisting serta setelah integrasi bertahap Pembangkit Listrik Tenaga Biogas (PLTBg). Hasil simulasi menunjukkan bahwa penetrasi PLTBg secara signifikan mengurangi rugi daya aktif, meningkatkan efisiensi jaringan. Pada beban awal tanpa penetrasi, rugi daya aktif sebesar 214,03 kW, berkurang menjadi 98,87 kW pada penetrasi 100%. Pada beban 50% tanpa penetrasi, rugi daya aktif mencapai 375,08 kW, menurun menjadi 214,94 kW (100% penetrasi). Sedangkan pada beban 75% tanpa penetrasi, rugi daya aktif sebesar 475,28 kW, turun menjadi 289,56 kW pada penetrasi penuh. Sebaliknya, rugi daya reaktif meningkat seiring integrasi PLTBg. Pada beban awal tanpa penetrasi, rugi daya reaktif sebesar 42,26 kVar, naik menjadi 185,02 kVar (100% penetrasi). Pada beban 75% tanpa penetrasi, rugi daya reaktif sebesar 388,41 kVar, namun berkurang menjadi 102,45 kVar pada penetrasi penuh.

Perbandingan nilai rugi-rugi daya aktif (kW) serta daya reaktif (kVar) juga dimuat dalam bentuk grafik, lihat Gambar berikut.



Gambar 3.9 Grafik perbandingan rugi-rugi daya aktif



Gambar 3.10 Grafik perbandingan rugi-rugi daya Reaktif

Berikut adalah beberapa aspek analisis rugi-rugi daya aktif serta juga daya reaktif berdasarkan tabel dan grafik tersebut:

a. Penurunan Rugi Daya Aktif

Penetrasi PLTBg secara signifikan mengurangi rugi daya aktif. Pada beban awal, rugi daya aktif turun dari 214,03 kW (tanpa penetrasi) menjadi 98,87 kW (100% penetrasi). Pada beban +75%, berkurang dari 475,28 kW menjadi 289,56 kW, menunjukkan peningkatan efisiensi sistem distribusi.

b. Pengaruh Peningkatan Beban

Meskipun PLTBg mengurangi rugi daya aktif, peningkatan beban tetap meningkatkan rugi-rugi daya. Pada penetrasi 50%, rugi daya aktif naik dari 139,07 kW (beban awal) menjadi 369,81 kW (beban +75%), menegaskan bahwa beban menjadi faktor utama dalam efisiensi sistem.

c. Efisiensi Tertinggi pada Penetrasi 25%

Efisiensi terbesar terjadi pada penetrasi awal. Pada beban awal, selisih rugi daya aktif tanpa penetrasi dan dengan penetrasi 25% adalah 42,39 kW. Namun, pada penetrasi 75% dan 100%, dampaknya menurun, menunjukkan adanya batas efektivitas penetrasi PLTBg.

d. Peningkatan Rugi Daya Reaktif pada Beban Rendah

Berbeda dengan daya aktif, rugi daya reaktif meningkat pada penetrasi tinggi, terutama pada beban rendah. Misalnya, rugi daya reaktif tanpa penetrasi pada beban awal adalah 42,26 kVAR, meningkat menjadi 185,02 kVAR pada penetrasi 100%.

e. Pengaruh Beban terhadap Rugi Daya Reaktif

Peningkatan beban cenderung meningkatkan rugi daya reaktif, meskipun penetrasi PLTBg membantu mengendalikannya. Pada penetrasi 50%, rugi daya reaktif naik dari 116,76 kVAR (beban awal) menjadi 225,94 kVAR (beban +75%), menyoroti pentingnya manajemen daya reaktif.

f. Efektivitas PLTBg pada Beban Tinggi

Pada beban +75%, PLTBg secara signifikan mengurangi rugi daya reaktif dari 388,41 kVAR (tanpa penetrasi) menjadi 102,45 kVAR (100% penetrasi), menunjukkan kontribusinya dalam menjaga stabilitas daya reaktif pada beban tinggi.

g. Dampak Penetrasi 100% pada Rugi Daya Reaktif

Pada beban tinggi, penetrasi 100% menghasilkan rugi daya reaktif lebih rendah (102,45 kVAR) dibandingkan penetrasi 75% (158,07 kVAR). Namun, pada beban rendah, penetrasi 100% dapat meningkatkan rugi daya reaktif dan berpotensi mengganggu stabilitas sistem.

h. Penetrasi Optimal untuk Stabilitas Tegangan

Penetrasi 75% memberikan tegangan yang lebih stabil di semua kondisi beban. Misalnya, pada beban +75%, tegangan sistem 18,14 kV pada penetrasi 75% lebih stabil dibandingkan 18,45 kV pada penetrasi 100%, yang berisiko menyebabkan over voltage.

4. CONCLUSION

Penetrasi Pembangkit Listrik Tenaga Biogas (PLTBg) berkapasitas 1×1,1 MW memberikan dampak signifikan terhadap stabilitas jaringan distribusi 20 kV di ULP Tanjung Pura. Hasil simulasi dan analisis menunjukkan bahwa penetrasi PLTBg meningkatkan tegangan jaringan secara bertahap. Pada kondisi eksisting, tegangan bus kritis sebesar 17,92 kV (89,63% dari tegangan nominal). Dengan penetrasi 25%, tegangan meningkat menjadi 18,34 kV (91,73%), dan pada penetrasi 100%, mencapai 19,50 kV (97,50%). Namun, penetrasi tinggi juga meningkatkan rugi daya reaktif, yang dapat memengaruhi stabilitas jaringan dan berpotensi menyebabkan blackout jika tidak dikelola dengan baik.

PLTBg mampu mempertahankan tegangan dalam batas normal meskipun terjadi penambahan beban. Tanpa penetrasi, tegangan operasi pada penambahan beban 25% sebesar 17,56 kV (87,80%), dan pada 75% sebesar 17,05 kV (85,30%). Dengan penetrasi bertahap, tegangan meningkat secara signifikan. Pada penetrasi 25%, tegangan berkisar antara 17,99 kV (90%) hingga 17,28 kV (86,40%), sementara pada penetrasi 100%, tegangan berada pada rentang 19,15 kV (95,40%) hingga 18,47 kV (92,30%). Selain itu, optimalisasi daya reaktif dari PLTBg membantu menurunkan rugi daya reaktif akibat beban variatif.

a. Rekomendasi Optimal

Kombinasi penambahan beban 50% dan penetrasi 75% direkomendasikan sebagai kondisi optimal, karena memberikan keseimbangan terbaik antara profil tegangan serta minimisasi rugi daya aktif dan reaktif dibandingkan skenario lainnya.

REFERENCES

- [1] P. Siagian *et al.*, *Energi Baru Terbarukan Sebagai Energi Alternatif*. 2023. [Online]. Available: <https://medium.com/@arifwicaksanaa/pengertian-use-case-a7e576e1b6bf>
- [2] R. Kurniawan, "Dampak Penetrasi Pembangkit Energi Terbarukan Intermiten Terhadap Harmonisa dan Stabilitas Sistem Tenaga Listrik Pada Jaringan Distribusi." Universitas Malikussaleh, 2024.
- [3] R. Rizki, "Analisis Keandalan Sistem Distribusi 20 kV PT. PLN (Persero) UP3 Metro dengan Metode Failure Mode and Effect Analysis (FMEA)," 2023.
- [4] R. X. K. Sitorus, "Studi Tentang Pergantian Trafo Distribusi BR079 Akibat Beban Lebih Di PT. PLN (PERSERO) ULP Medan Baru," *J. Ilm. Tenaga List.*, vol. 3, no. 2, pp. 79–84, 2024.
- [5] I. B. Sulistiawati, I. M. Wartana, and C. Setiawan, "Analisis Performa Interkoneksi PLTS Pada Sistem Kelistrikan 20 kV Lombok Nusa Tenggara Barat," *J. FORTECH*, vol. 4, no. 2, pp. 64–73, 2023.
- [6] F. Abidin, M. Pujiantara, and D. F. U. Putra, "Optimasi Total Operating Time Rele Arus Lebih dengan Pertimbangan Konfigurasi Mesh, Open-mesh, dan Radial Menggunakan Firefly Algorithm," *J. Tek. ITS*, vol. 9, no. 2, pp. B53–B58, 2021.
- [7] D. Dasweptia and H. Hamimi, "Perencanaan Sistem Loop Jaringan 20 kV Menggunakan Load Breaking Switch Motorized di Penyulang Sawit, Jati dan Pala," *Electr. J. Rekayasa dan Teknol. Elektro*, vol. 17, no. 1, pp. 8–19, 2023.
- [8] S. Rachman, S. Sarifudin, I. Maududy, S. H. Wibowo, and B. Suriansyah, "Simulasi Media

- Pembelajaran Scada Monitoring Kendali Jaringan Spindel Distribusi 20 KV," *POROS Tek.*, vol. 13, no. 2, pp. 84–90, 2021.
- [9] B. Halik, I. M. Wartana, and W. P. Muljanto, "Rekonfigurasi jaringan distribusi untuk reduksi rugi daya dan meningkatkan profil tegangan di pt. Pln (persero) ulp larantuka flores timur," *magn. J. Mhs. Tek. Elektro*, vol. 7, no. 2, pp. 328–336, 2023.
- [10] Z. Zain and M. H. Pranata, "Pola Permukiman Kampung Tradisional Studi Kasus: Kampung Kamboja Kelurahan Benua Melayu Laut Kota Pontianak," *Nalars*, vol. 24, no. 1, 2025.
- [11] A. Nuzulia, "Pemanfaatan Limbah Singkong Menjadi Biogas," *Angew. Chemie Int. Ed.* 6(11), 951–952., pp. 5–24, 1967.
- [12] R. Desmiarti, M. Y. Rosadi, A. Hazmi, M. M. Rahman, N. Naldi, and J. A. Fajri, "Biogas Production from Palm Oil Mill Effluent Using Dielectric Barrier Discharge Integrated with the Aerated Condition," *Water (Switzerland)*, vol. 14, no. 22, pp. 1–15, 2022, doi: 10.3390/w14223774.
- [13] M. F. Nur, I. C. Gunadin, and Z. Muslimin, "Studi Optimalisasi Kinerja PLTB Melalui Pemilihan Type Generator Terhadap Stabilitas Sistem Tenaga Listrik (Stabilitas Frekuensi dan Tegangan) Sulbagsel," *J. Eksitasi*, vol. 1, no. 1, pp. 7–13, 2022.
- [14] I. S. Tauladan, H. N. Syamsir, M. Sahar, and B. Ihsan, "Pelatihan Electrical Transient Analysis Program Software (ETAP) Mendukung Program Teaching Factory (TEFA) pada Tingkat Sekolah Menengah Kejuruan (SMK)," *BATOBOJ. Pengabd. Kpd. Masy.*, vol. 2, no. 2, pp. 111–118.