ALOKASI BANK KAPASITOR UNTUK MENINGKATKAN PROFIL TEGANGAN PADA JARINGAN TEGANGAN MENENGAH 20 KV BERDASARKAN STANDAR SPLN T6.001:2013

Zainal Abidin[1]*
[1]Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik,
Universitas Tanjungpura, Indonesia

ABSTRAK

Profil tegangan merupakan salah satu indikator penting dalam operasi sistem distribusi tenaga listrik. SPLN T6.001:2013 menetapkan batasan tegangan sistem distribusi dalam rentang ±10% dari tegangan nominal. Jatuh tegangan yang melebihi batas toleransi berpotensi terjadi pada sistem distribusi. Penelitian ini melakukan studi peningkatan tegangan pada penyulang XYZ UP3 PLN Pontianak menggunakan kapasitor. Simulasi aliran daya dilakukan pada kondisi eksisting menggunakan metode *bacward-forward sweep* (BFS). Hasil simulasi kondisi eksisting terdapat 80 bus dengan jatuh tegangan melebihi 10% dan ditentukan 4 skenario pemasangan kapasitor pada bus 42, 70, 101, dan kombinasi bus 42-70-101. Hasil simulasi skenario 1 (bus 42) diperoleh jatuh tegangan 10,7% dan tegangan terendah 17,86 kV; Skenario 2 (bus 70) diperoleh jatuh tegangan 11,07% dengan tegangan terendah 17,79 kV; Skenario 3 (bus 101) diperoleh jatuh tegangan 9,71% dengan tegangan terendah 18,06 kV; Skenario 4 (bus 42-70-101) diperoleh jatuh tegangan 3,24% dengan tegangan terendah 19,25 kV.
Kata Kunci: SPLN; BFS, jatuh tegangan

ABSTRACT

Voltage profile is one of the important indicators in power distribution system operation. SPLN T6.001:2013 sets the voltage limit in the distribution system in the range of ± 10% of the nominal voltage. Voltage drops exceeding these operating limits have the potential to occur in the distribution system. This research conducts a voltage increase study on the XYZ UP3 PLN Pontianak extension using capacitors. Power flow simulation was performed on existing conditions using the bacward-forward sweep (BFS) method. The simulation results of existing conditions there are 80 buses with voltage drops exceeding 10% and determined 4 scenarios of installing capacitors on buses 42, 70, and 101. The results of scenario 1 (bus 42) obtained a voltage drop of 10.7% and the lowest voltage of 17.86 kV; Scenario 2 (bus 70) obtained a voltage drop of 11.07% with the lowest voltage of 17.79 kV; Scenario 3 (bu 101) obtained a voltage drop of 9.71% with the lowest voltage of 18.06 kV; Scenario 4 (bus 42-70-101 obtained a voltage drop of 3.24% with the lowest voltage of 19.25 kV.
***Keywords**: SPLN; BFS; voltage drop*

1. PENDAHULUAN

Profil tegangan yang stabil pada jaringan tegangan menengah 20 kV sangat penting untuk memastikan operasi sistem tenaga listrik handal dan efisien. Profil tegangan ini memengaruhi pengoperasian peralatan dan kenyamanan pelanggan. Menurut standar SPLN T6.001:2013, tegangan hanya dapat berubah dalam batas toleransi ±10% dari tegangan normal [1]. Tegangan yang berada diluar batas toleransi mengakibatkan kerusakan pada peralatan listrik dan elektronik, atau bahkan catu daya dapat dimatikan jika tegangan naik di luar batasan tertentu. Penambahan semakin banyak sistem pembangkit terdistribusi (DG) berbasis energi terbarukan juga dapat memperburuk stabilitas tegangan karena sistem ini menyebabkan osilasi daya [2]. Oleh karena itu, penyedia layanan listrik harus menjaga profil tegangan pada kondisi terbaiknya untuk memastikan daya yang andal dan berkualitas sangat baik.

Teknik umum untuk mengoptimalkan profil tegangan adalah dengan menggunakan bank kapasitor. Kapasitor dapat membantu menghentikan penurunan tegangan pada saluran distribusi yang terjadi saat daya reaktif mengalir melaluinya. Menurut sebuah penelitian oleh [3], penggunaan algoritma *Improved Binary Particle Swarm Optimization* (IBPSO) untuk menemukan lokasi ideal bagi kapasitor (OCP) dapat meningkatkan tegangan bus dan mengurangi kerugian daya aktif secara signifikan. Penelitian [4] juga menunjukkan bahwa kapasitor yang dapat menembus dengan benar dapat memberikan manfaat yang lebih teknis-ekonomis, seperti penurunan biaya pengoperasian.

Pemasangan bank kapasitor di tempat yang salah dapat memperburuk regulasi tegangan dengan menyebabkan kompensasi yang terlalu banyak atau terlalu sedikit. Kompensasi yang berlebihan dapat menyebabkan tegangan menjadi terlalu tinggi, tetapi kompensasi yang kurang tidak banyak membantu. Beberapa penelitian telah mengusulkan metodologi untuk mengatasi masalah ini, termasuk penerapan *Loss Sensitivity Factor* (LSF) dan *Voltage Stability Index* (VSI) untuk mengidentifikasi posisi kandidat yang optimal sebelum pengoptimalan [5], [6]. Namun, masih sulit untuk memilih solusi yang tepat, terutama jika menyangkut kepatuhan terhadap standar teknis seperti SPLN T6.001:2013.

Beberapa penelitian sebelumnya telah mengusulkan beberapa metodologi untuk alokasi bank kapasitor, termasuk teknik optimasi seperti algoritma genetika (NSGA-II), algoritma firefly (FA), dan multiverse optimizer (MVO) [7]–[9]. Pendekatan analitis dianggap lebih efisien secara komputasi karena menggunakan persamaan aliran daya dan

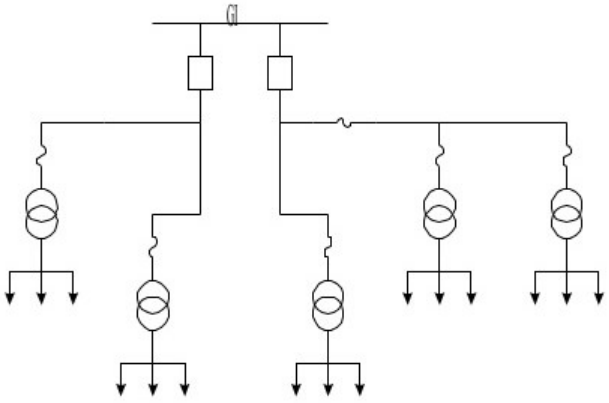
sensitivitas tegangan. Namun, masih kurangnya studi tentang cara memasukkan standar SPLN T6.001:2013 dalam kerangka analitis untuk memastikan bahwa aturan teknis dipatuhi. Studi ini bertujuan untuk mengembangkan teknik analitis yang mengintegrasikan standar untuk menentukan alokasi bank kapasitor yang tepat untuk meningkatkan profil tegangan jaringan 20 kV, sebagaimana dibuktikan oleh studi kasus empiris [9], [10]. Penelitian ini berupaya untuk memberikan solusi praktis bagi operator jaringan untuk meningkatkan jaringan distribusi listrik.

2. SISTEM DISTRIBUSI TENAGA LISTRIK

Sistem tenaga listrik merupakan sebuah proses berkesinambungan penyaluran tenaga lsitrik mulai dari pembangkit hingga dapat dimanfaatkan oleh pelanggan yang dialirkan melalui saluran transmisi dan distribusi. Sistem distribusi merupakan tahap akhir dari proses penyaluran tenaga listrik tersebut. Berdasarkan model konfigurasi jaringan, sistem distribusi dikelompokkan menjadi tiga jenis, yaitu sistem distribusi radial, ring, dan spindle. Sebagian besar sistem distribusi yang digunakan di Indonesia adalah sistem distribusi radial [11].

A. Sistem Dsitribusi Radial

Sistem distribusi radial memiliki konfigurasi sederhana yang berdampak pada kemudahan dan investasi relatif lebih murah. Gambar 1. menunjukkan analogi sistem distribusi radial dalam bentuk seperti cabang pohon dengan jalur utama yang terhubung ke jaringan yang lebih kecil menuju ke beban.



Gambar 1. Ilustrasi Sistem Distribusi Radial

Gambar 1. menunjukkan bahwa secara teknis sistem distribusi radial hanya disuplai oleh satu sumber listrik dalam melayani beban. Sementara itu, dalam satu sistem

distribusi dapat terdiri dari beberapa penyulang dan secara umum setiap penyulang dalam sistem distribusi melayani titik-titik beban dalam bentuk percabangan yang banyak. Hal ini menimbulkan potensi jatuh tegangan yang cukup signifikan seiring dengan bertambahnya jumlah titik (cabang) yang dilayani. Dengan pertimbangan teknis dan ekonomi luas penampang konduktor semakin kecil seiring dengan bertambahnya panjang saluran dari suatu jaringan pada sistem distribusi radial, hal ini disebabkan semakin jauh lokasi beban maka semakin kecil pula arus yang mengalir dari Gardu Induk. selain itu, dalam sistem radial, jika terjadi gangguan pada salah satu titik (cabang) maka saluran atau titik-titik setelah titik gangguan juga terdampak, paling ringan pemadaman. Dengan demikian, ini menjadi kelemahan dari sistem radial dalam kualitas pelayanan [12].

B. Analisis Aliran Daya Menggunakan *Metode Backward-Forward Sweep* (BFS)

Sistem distribusi radial memiliki perbandingan nilai R/X yang tinggi dengan nilai node yang relatif besar. Sehingga dibutuhkan metode tertentu yang dapat mengatasi karakteristik terserbut. Salah satu metode yang efektif dan efisien yaitu BFS [13]. Mekanisme perhitungan dalam metode BFS terdiri dari dua tahap, pertama, backward-sweep, menghitung besar arus yang mengalir pada saluran dari bus paling awal, dan kedua, forward-sweep, menghitung nilai jatuh tegangan pada setiap saluran sebagai hasil kali nilai arus hasil dari tahap pertama dengan nilai impedansi saluran.

Pada tahap backward-sweep, asumsikan bahwa tegangan pada titik sama dengan nilai tegangan sumber utama, dan arus injeksi kompensasi pada sumber tersebut bernilai nol.

$$I_{ldi} = \left[\frac{P_i + jQ_i}{V_i}\right]^* \quad (1)$$

Dengan:

I_{ldi} : arus beban pada titik i

P_i : kebutuhan daya aktif pada titik i

Q_i : kebutuhan daya reaktif pada titik i

V_i : tegangan pada titik i

Selanjutnya pada tahap forward-sweep, tegangan pada titik sumber utama telah diketahui, impedansi dan arus yang mengalir pada setiap saluran juga sudah diketahui, maka nilai tegangan pada setiap titip dapat dihitung menggunakan Persamaan (2).

$$V_i = V_{Ui} - Z_i I_{Li} \quad (2)$$

Dengan:

V_i : tegangan pada titik i

V_{Ui} : batas atas tegangan pada titik i

Z_i : impedansi saluran pada i

I_{Li} : arus yang mengalir pada saluran i

C. Standar Operasional Tegangan Distribusi SPLN T6.001:2013

Julat tegangan pemanfaatan, tidak hanya variasi tegangan pada terminal pasok, tetapi juga variasi tegangan pada instalasi konsumen. Untuk instalasi dengan tegangan rendah, jatuh tegangan ini dibatasi sampai dengan 5% (IEC 4%). Akibatnya, julat tegangan pemanfaatan adalah +10% hingga –15%. Sementara untuk sistem distribusi perbedaaan antara tegangan tertinggi dan tegangan terendah diatur sedemikian rupa tidak boleh lebih dari ± 10% dari tegangan nominal sistem [1].

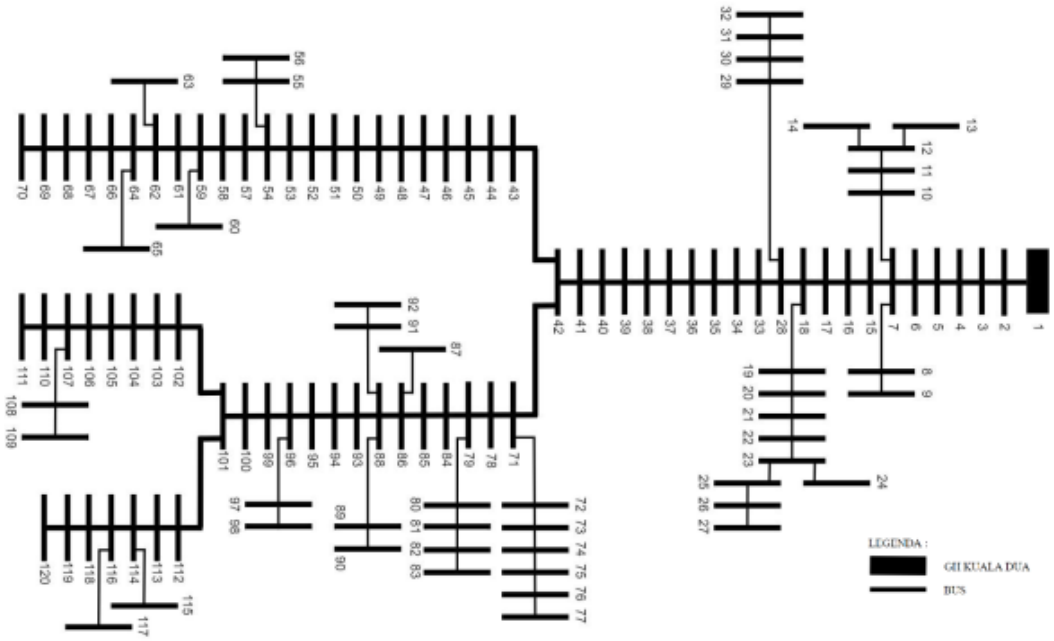
3. METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan data pada salah satu penyulang XYZ Jaringan Tegangan Menengah (JTM) 20 kV pada sistem distribusi PLN UP3 Pontianak. Penyulang XYZ terdiri dari 120 bus dengan total beban 6,22 MVA. Data pembebanan dari Penyulang XYZ ditunjukkan pada Tabel 1. Perhitungan aliran daya menggunakan metode BFS dilakukan dengan bantuan perangkat lunak Matlab.

Tabel 1. Data pembebanan penyulang XYZ

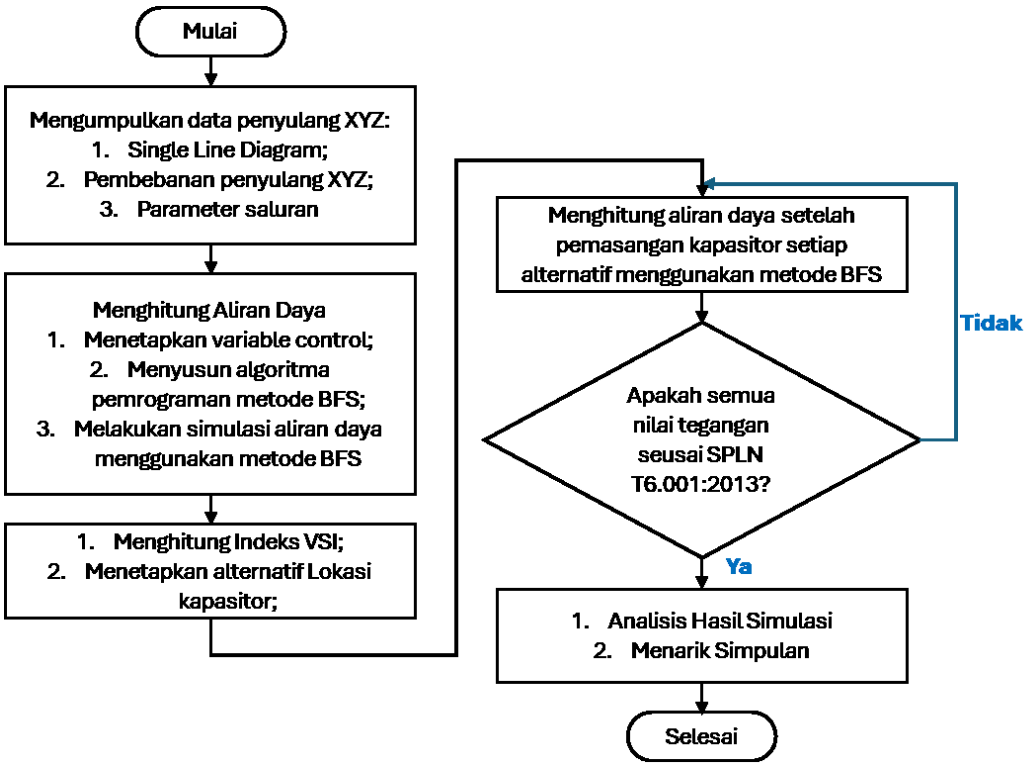
No. Bus	Kap (KVA)	Pemb. (%)	No. Bus	Kap (KVA)	Pemb. (%)	No. Bus	Kap (KVA)	Pemb. (%)	No. Bus	Kap (KVA)	Pemb. (%)
1	0	0	31	100	20,47	61	50	33,68	91	160	34,0125
2	25	8	32	25	55,56	62	0	0	92	50	65,12
3	160	37,51	33	50	8,68	63	25	110,6	93	25	23,56
4	160	46,9	34	25	21,56	64	25	56,64	94	50	13,66
5	160	46,06	35	100	23,3	65	25	53,52	95	160	54,05
6	160	60,64	36	100	18,32	66	25	63,6	96	0	0
7	0	0	37	25	50,24	67	25	85,12	97	25	103,56
8	100	55,98	38	25	52,16	68	25	99,44	98	25	96,32
9	50	67,48	39	100	23,16	69	50	39,9	99	25	21,12
10	100	35,88	40	25	46,04	70	50	57,68	100	50	100,68
11	25	109,12	41	25	14,6	71	0	0	101	0	0
12	0	0	42	0	0	72	50	44,52	102	25	47
13	50	45,54	43	50	64,78	73	50	41,96	103	25	56,76
14	25	79,28	44	25	42,96	74	50	62,7	104	25	59,32
15	100	70,2	45	50	27,58	75	25	62,48	105	25	12,2
16	200	6,72	46	50	45,22	76	50	68,68	106	50	76,02
17	25	10,36	47	50	44,06	77	50	122,36	107	0	0
18	0	0	48	25	0	78	160	51,4	108	50	11,24
19	100	25,84	49	100	38,53	79	100	26,37	109	50	75,78
20	25	46,56	50	50	18,92	80	25	67,2	110	25	48,32
21	25	65,4	51	50	78,08	81	160	17,55	111	50	20,98
22	100	47,24	52	100	12,69	82	25	58	112	100	32,86
23	100	44,92	53	25	113,52	83	25	40	113	100	21,08
24	100	42,02	54	0	0	84	100	43,19	114	0	0
25	50	32,36	55	16	20,75	85	100	35,97	115	100	19,19
26	25	63,92	56	16	81,06	86	0	0	116	0	0
27	50	37,36	57	25	25,04	87	160	36,28	117	50	79,14
28	0	0	58	25	25,44	88	0	0	118	50	109,62
29	25	35,64	59	25	69,64	89	50	42,04	119	25	76,04
30	50	73,14	60	50	35,26	90	50	77,4	120	50	32,52

Penyulang XYZ merupakan jaringan distribusi radial dengan topologi jaringan yang memiliki beberapa cabang radial sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 2. Percabangan tersebut antara lain pada bus 7, 18, 28, 42, 70, 101, 111, dan 120.



Gambar 2. Topologi Jaringan Distribusi Penyulang XYZ

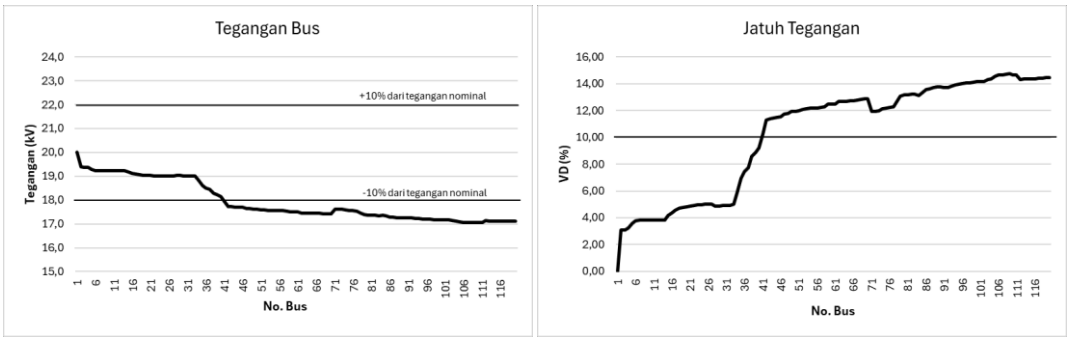
Berdasarkan data tersebut dilakukan simulasi dan analisis hasil simulasi mengikuti tahapan penelitian. Adapun tahapan dalam penelitian ini ditunjukkan melalui diagram alir pada Gambar 3.



Gambar 3. Diagram Alir Penelitian Dan Perhitungan

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Simulasi dimulai dengan melakukan analisis aliran daya pada jaringan distirbusi penyulang XYZ menggunakan metode BFS. Simulasi aliran daya dimulai pada kondisi eksisting jaringan tanpa pemasangan kapasitor. Hasil simulasi kondisi eksisting didapatkan bahwa tegangan terendah terjadi pada bus 109 dengan besar tegangan 17,00 kV dengan jatuh tegangan sebesar 14,75% dari tegangan nominal. Sementara tegangan tertinggi terjadi pada bus 1 dengan besar tegangan 20,00 kV. Jatuh tegangan melebihi batasan SPLN T6.001:2013 mulai terjadi pada bus 41 dengan nilai jatuh tegangan sebesar 10,25%. Secara keseluruhan terdapat 40 bus (bus 1 hingga 40) beroperasi dengan tegangan sesuai batas operasional tegangan nominal, sementara sisanya yaitu 80 bus (bus 41 hingga 120) beroperasi dengan tegangan lebih rendah dari tegangan nominal dengan nilai jatuh tegangan mulai dari 10,25% hingga 14,75%. Gambar 4. menunjukkan nilai tegangan dan jatuh tegangan hasil perhitungan aliran daya pada kondisi eksisting.



Gambar 4. Besar Tegangan (A) Dan Persentase Jatuh Tegangan (B) Kondisi Eksisting

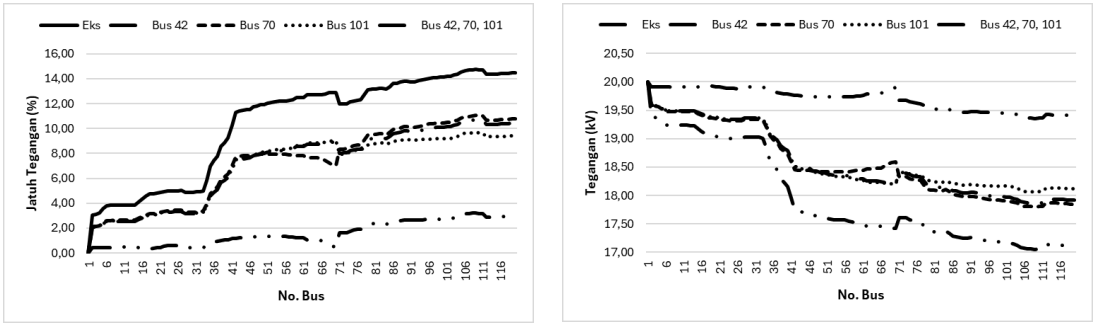
Selain nilai tegangan yang berada diluar batas operasional, jatuh tegangan juga berdampak pada munculnya rugi-rugi daya pada jairngan. Pada kondisi eksisting, muncul rugi-rugi daya aktif sebesar 252,20 kW dan rugi-rugi daya reaktif sebesar 256,93 kVAR.

Dengan memperhatikan hasil simulasi pada kondisi eksisting dan topologi jaringan penyulang XYZ, ditentukan kandidat lokasi kapasitor pada bus 42, 70, 101, 111, dan 120. Pertimbangannya bahwa bus 42 dan 101 merupakan percabangan utama, sedangkan bus 70, 111 dan 120 merupakan titik ujung dari sistem radial dalam kasus ini. Penelitian ini menggunakan kapasitor dengan kapasitas injeksi daya reaktif sebesar 900 kVAR untuk setiap kapasitor yang dipasang. Simulasi dilanjutkan dengan memasang kapasitor sesuai dengan lokasi yang telah ditentukan mengikuti skenario yang ditunjukkan pada Tabel 3.

Tabel 3. Skenario pemasangan kapasitor

Skenario	Lokasi	Injeksi Daya Reaktif (Q) - KVAR
1	Bus 42	900
2	Bus 70	900
3	Bus 101	900
4	Bus 42, 70, dan 101.	Masing-masing 900, total terpasang 2700

Gambar 5.(a) dan (b) masing-maisng menunjukkan perbandingan profil jatuh tegangan dan profil tegangan sebelum dan setelah pemasangan kapasitor. Gambar 5.(a) dan (b) terdiri dari lima garis yang mewakili profil jatuh tegangan untuk setiap kondisi mulai dari eksisting, pemasanga 1 buah kapasitor pada bus 42, 70, dan 101 secara bergantian pemasangan tiga buah kapasitor pada bus yang sama secara paralel. Pemasangan 1 buah kapasitor pada bus 42 mampu menurunkan persentase jatuh tegangan sebesar 4,05% sehingga jatuh tegangan tertinggi menjadi 10,7% yang terjadi pada bus 109 dengan nilai tegangan 17,86 kV. Sementara pemasangan 1 buah kapasitor pada bus 70 mampu menurunkan persentase jatuh tegangan sebesar 3,71% namun jatuh tegangan masih lebih dari ketentuan dari SPLN T6.001:2013 dengan persentase jatuh tegangan tertinggi pada bus 109 sebesar 11,04% yang mengakibatkan nilai tegangan pada bus tersebut sebesar 17,79 kV.



(a) (b)

Gambar 5. Profil Jatuh Tegangan (A) Dan Besar Tegangan (B) Sebelum Dan Setelah Pemasangan Kapasitor

Pemasangan kapasitor pada bus 101 memberikan hasil yang signifikan terhadap penurunan persentase jatuh tegangan sebesar 5,04% dari kondisi eksisting sehingga meningkatkan profil tegangan disetiap bus dengan nilai tegangan terendah pada bus 109 sebesar 18,06 kV dengan jatuh tegangan sebesar 9,71%. Selanjutnya pada simulasi dengan

pemasangan kapasitor pada bus 42, 70, dan 101 secara paralel dengan kapasitas total injeksi daya reaktif sebesar 2700 kVAR didapatkan bahwa persentase jatuh tegangan sebesar 3,24%, terjadi penurunan sebesar 11,51% dari kondisi eksisting dengan nilai tegangan terendah sebesar 19,35 kV pada bus 109.

5. KESIMPULAN

Penelitian ini melakukan simulasi dampak pemasangan kapasitor terhadap profil tegangan jaringan distribusi radial penyulang XYZ pada UP3 Pontianak melalui 4 skenario penempatan kapasitor di bus 42, 70, 101, dan kombinasi di bus 42-70-101. Skenario 1 dan 2 tidak memberikan dampak signifikan dimana masih terdapat tegangan melebihi batas toleransi. Sementara simulasi skenario 3 (bus 101) dan 4 (bus 42-70-101) mampu meningkatkan profil tegangan sesuai dengan batasan tegangan pada SPLN T6.001:2013.

DAFTAR PUSTAKA

[1] SPLN T6.001:2013, "Standar Penyediaan Tenaga Listrik," PT PLN (Persero), 2013.

[2] G. Tahiliani and A. Gupta, "Voltage profile improvement by optimal DG allocation using atom search optimisation in radial and mesh distribution system," Int. J. Eng., Sci. Technol., 2022.

[3] M. M. Yaqoob et al., "Power loss reduction and reliability improvement of radial distribution systems using optimal capacitor placement technique," J. Techn., 2024.

[4] S. A. Salimon et al., "Impact of shunt capacitor penetration level in radial distribution system considering techno-economic benefits," Niger. J. Technol. Develop., vol. 19, no. 2, 2022.

[5] M. J. Tahir, M. B. Rasheed, and M. K. Rahmat, "Optimal placement of capacitors in radial distribution grids via enhanced modified particle swarm optimization," Energies, vol. 15, no. 7, 2022.

[6] E. O. et al., "Optimal sitting and sizing of shunt capacitor for real power loss reduction on radial distribution system using firefly algorithm," Energy Sources, Part A, vol. 45, no. 2, 2019.

[7] M. A. E.-S. Mohamed El-Saeed et al., "Solving the capacitor placement problem in radial distribution networks," Results Eng., vol. 17, 2023.

[8] T. P. M. Mtonga, K. K. Kaberere, and G. K. Irungu, "Optimal shunt capacitors' placement and sizing in radial distribution systems using multiverse optimizer," IEEE Can. J. Elect. Comput. Eng., vol. 44, no. 1, 2021.

[9] H. Ariwata et al., "Optimalisasi penempatan kapasitor untuk meningkatkan profil tegangan pada jaringan distribusi 20 kV," SinarFe7, vol. 6, no. 1, 2024.

[10] Y. Simamora et al., "Implementation of placement and determination of capacitor capacity in Medan city medium voltage distribution network using the electrical transient analysis program," Electron. J. Ilmiah Tek. Elektro, vol. 4, no. 2, 2023.

[11] Turan Gonen, "Electric Power Distribution Engineering", 3rd Edition, CRC Press, Francis & Taylor Group, Boca Raton-Florida, 2014.

[12] T.A. Short, "Electric Power Distribution Handbook", 2nd Edition, CRC Press, Francis & Taylor Group, Boca Raton-Florida, 2014.

[13] U. Eminoglu, M. Hocaoglu, "Distribution Systems Forward/Backward Sweep-based Power Flow Algorithms: A Review and Comparison Study", Electric Power Components and Systems. 37. 91-110. 2009