



**OPTIMASI JARINGAN DISTRIBUSI UNTUK
MEMPERBAIKI PROFIL TEGANGAN DENGAN
PENEMPATAN KAPASITOR BANK MENGGUNAKAN
METODE *FAST VOLTAGE STABILITY INDEX (FVSI)***

SKRIPSI

OLEH:

**SIDQI AQDAM HIMAYA
221910101069**

**KEMENTERIAN PENDIDIKAN TINGGI, SAINS DAN TEKNOLOGI
UNIVERSITAS JEMBER
FAKULTAS TEKNIK
PROGRAM STUDI STRATA 1 TEKNIK ELEKTRO
JEMBER
2026**



**OPTIMASI JARINGAN DISTRIBUSI UNTUK
MEMPERBAIKI PROFIL TEGANGAN DENGAN
PENEMPATAN KAPASITOR BANK MENGGUNAKAN
METODE *FAST VOLTAGE STABILITY INDEX (FVSI)***

*diajukan untuk memenuhi sebagian persyaratan memperoleh gelar Sarjana pada
program studi Teknik Elektro.*

SKRIPSI

OLEH:

**SIDQI AQDAM HIMAYA
221910101069**

**KEMENTERIAN PENDIDIKAN TINGGI, SAINS DAN TEKNOLOGI
UNIVERSITAS JEMBER
FAKULTAS TEKNIK
PROGRAM STUDI STRATA 1 TEKNIK ELEKTRO
JEMBER
2026**

PERSEMBAHAN

Segala puji dan syukur kehadiran Allah SWT, tuhan Yang Maha Esa penguasa kehidupan dunia dan akhirat. Skripsi berjudul “Optimasi Jaringan Distribusi Untuk Memperbaiki Profil Tegangan Dengan Penempatan Kapasitor Bank Menggunakan Metode *Fast voltage stability index* (FVSI)” ini penulis persembahkan untuk:

1. Orang tua penulis, Bapak Basuki Hadiprayogo S.TP., M.Si. dan Ibu Rossy Alivia Rozana S.Pd., yang memberikan kasih sayang, usaha, doa, serta dukungan yang tiada henti. Tidak lupa, kepada Bapak Drs. H. M. Ali Syamsudin M.Si., dan Ibu Prof. Dr. Dra. Hj. Titiek Rohanah Hidayati M.Pd. yang sudah selalu memberikan dukungan penuh;
2. Saudara – saudara penulis, Kak Nadia Luitsa Layna S.Iikom., dan Nayla Salsa Ramdhana yang selalu menjadi pendukung serta memberi masukan dan membantu Saya disaat ada kesusahan.
3. Keluarga besar, yang oleh karenanya penulis mampu bertahan sejauh ini. Terimakasih selalu memohon kepada tuhan untuk memastikan jalan hidupku baik.
4. Sabrina Annisabella Wulanyanuar, S.T. sebagai partner, yang menemani penulis dari awal masuk kuliah hingga akhir perkuliahan ini dan selalu memberikan semangat kepada penulis.

MOTTO

”Allah tidak membebani seseorang melainkan sesuai dengan kesanggupannya.”

(Al – Baqarah : 286)

”Tiada kekayaan yang lebih utama daripada akal, tiada keadaan yang lebih menyedihkan daripada kebodohan, dan tiada warisan yang lebih baik daripada pendidikan.”

(Ali Bin Abi Thalib)

PERNYATAAN ORISINALITAS

Saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Sidqi Aqdam Himaya

NIM : 221910101069

Menyatakan dengan bersungguh - sungguh bahwa karya ilmiah yang berjudul “Optimasi Jaringan Distribusi Untuk Memperbaiki Profil Tegangan Dengan Penempatan Kapasitor Bank Menggunakan *Metode Fast voltage stability index* (FVSI)” adalah benar-benar hasil karya sendiri, kecuali kutipan yang sudah penulis sebutkan sumbernya, belum diajukan pada institusi mana pun, dan bukan karya plagiat. Penulis bertanggung jawab atas keabsahan dan kebenaran isinya sesuai dengan sikap ilmiah yang harus dijunjung tinggi. Demikian pernyataan ini penulis buat dengan sebenar-benarnya, tanpa ada tekanan dan paksaan dari pihak manapun serta bersedia mendapat sanksi akademik jika ternyata dikemudian hari pernyataan ini tidak benar.

Jember, 9 Juli 2026

Yang Menyatakan,

Sidqi Aqdam Himaya

NIM. 221910101069

HALAMAN PERSETUJUAN

Skripsi Analisis Optimasi Jaringan Distribusi Untuk Memperbaiki Profil Tegangan Dengan Penempatan Kapasitor Bank Menggunakan Metode *Fast voltage stability index* (FVSI) telah diuji dan disetujui oleh Fakultas Teknik Universitas Jember pada:

Hari : Senin

Tanggal : 20 Juli 2026

Tempat : Fakultas Teknik Universitas Jember

Pembimbing

TandaTangan

Nama : Ir. Supriyadi Prasetyono, S.T., M.T.

NIP : 197004041996011001

(.....)

Penguji Utama

Nama : Ir. H. RB. Moch. Gozali, S.T., M.T.

NIP : 196906081999031002

(.....)

Penguji Anggota

Nama : Guido Dias Kalandro, S.ST., M.Eng.

NIP : 198902072023211020

(.....)

ABSTRACT

Voltage profile degradation in distribution networks is one of the major issues that can affect the quality and reliability of electrical power delivery to consumers. One of the effective solutions to overcome this problem is the proper installation of capacitor banks to provide optimal reactive power compensation. This study aims to determine the optimal locations for capacitor bank installation using the Fast voltage stability index (FVSI) method and to analyze its impact on improving the voltage profile of the Pronojiwo Feeder. The study was conducted using ETAP 19.0.1 through load flow simulations to obtain the initial network condition, followed by FVSI calculations for each distribution line to determine the optimal capacitor bank placement. The optimization process was carried out iteratively by installing three capacitor banks, each with a capacity of 1 MVar, on the distribution lines with the highest FVSI values in each iteration, namely Bus 55–Bus 56, Bus 160–Bus 153, and Bus 66–Bus 67 toward Bus 222. The simulation results indicate that the proposed method successfully improved the voltage profile of the distribution network. The voltage at the most critical bus increased from 81.80% to 91.64%, thereby satisfying the minimum allowable voltage limit. Based on these findings, the Fast voltage stability index (FVSI) method can be effectively applied to determine the optimal locations for capacitor bank installation in order to improve the voltage profile of the Pronojiwo distribution feeder.

Keywords: Fast voltage stability index (FVSI), capacitor bank, voltage profile.

RINGKASAN

Penelitian ini membahas penentuan lokasi pemasangan kapasitor bank menggunakan metode *Fast voltage stability index* (FVSI) untuk meningkatkan profil tegangan pada Penyulang Pronojiwo. Permasalahan yang diangkat dalam penelitian ini adalah terjadinya penurunan tegangan pada beberapa *load bus* akibat panjang saluran distribusi dan kebutuhan daya reaktif yang cukup besar. Untuk mengatasi permasalahan tersebut, dilakukan simulasi *load flow* menggunakan perangkat lunak ETAP 19.0.1 guna memperoleh kondisi awal sistem, kemudian dilakukan perhitungan nilai FVSI sebagai dasar dalam menentukan lokasi pemasangan kapasitor bank. Proses optimasi dilakukan secara bertahap dengan memasang tiga unit kapasitor bank yang masing-masing berkapasitas 1 MVar pada saluran dengan nilai FVSI tertinggi pada setiap iterasi, yaitu Bus 55–Bus 56, Bus 160–Bus 153, dan Bus 66–Bus 67 menuju Bus 222. Setelah setiap pemasangan kapasitor bank, dilakukan simulasi ulang untuk mengevaluasi perubahan profil tegangan dan menentukan lokasi pemasangan berikutnya berdasarkan nilai FVSI terbaru. Hasil penelitian menunjukkan bahwa pemasangan kapasitor bank berdasarkan metode FVSI mampu meningkatkan profil tegangan pada Penyulang Pronojiwo. Tegangan pada bus dengan kondisi paling kritis meningkat dari 81,80% menjadi 91,64%, sehingga telah memenuhi batas minimum tegangan pelayanan. Selain itu, hasil perbandingan sebelum dan sesudah pemasangan kapasitor bank menunjukkan bahwa seluruh *load bus* yang diamati mengalami peningkatan tegangan. Berdasarkan hasil tersebut, dapat disimpulkan bahwa metode *Fast voltage stability index* (FVSI) efektif digunakan untuk menentukan lokasi pemasangan kapasitor bank dalam upaya meningkatkan profil tegangan pada jaringan distribusi radial, khususnya pada Penyulang Pronojiwo.

PRAKATA

Puji syukur kepada Allah SWT karena atas segala rahmat dan karunia – Nya penulis dapat menyelesaikan skripsi yang berjudul “Optimasi Jaringan Distribusi Untuk Memperbaiki Profil Tegangan Dengan Penempatan Kapasitor Bank Menggunakan Metode *Fast voltage stability index* (FVSI)”. Skripsi ini disusun untuk memenuhi salah satu syarat menyelesaikan pendidikan strata satu (S1) pada Program Studi Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Jember.

Penulisan skripsi ini tidak akan berhasil tanpa bantuan dari berbagai pihak. Oleh karena itu, penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada :

1. Tuhan yang maha esa, Allah SWT, Sang Maha Pemilik Arah. Terimakasih telah menjadi satu – satunya rumah tempatku pulang saat dunia terasa begitu kabur dan bising. Terimakasih telah menjaga waras dan langkahku, bahkan di saat aku hampir lupa alasan untuk tetap hidup.
2. Bapak Ir. Supriyadi Prasetyono, S.T., M.T. selaku dosen pembimbing yang telah berkenan membantu dan membimbing dalam penelitian skripsi ini;
3. Bapak Ir. RB. Moch. Gozali, S.T., M.T. dan Bapak Guido Dias Kalandro, S.ST., M.Eng. yang berkenan memberikan kritik dan saran pada skripsi ini;
4. Dosen Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Jember yang telah membimbing dan memberikan ilmu yang bermanfaat;
5. Semua pihak yang telah membantu selama pengerjaan skripsi yang tidak dapat disebutkan satu – persatu.
6. Almamater Fakultas Teknik Universitas Jember;

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
PERSEMBAHAN	ii
MOTTO	iii
PERNYATAAN ORISINILITAS	iv
HALAMAN PERSETUJUAN	v
ABSTRACT	vi
RINGKASAN	vii
PRAKATA.....	viii
DAFTAR ISI.....	ix
DAFTAR GAMBAR	xi
DAFTAR TABEL	xii
BAB 1 PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah	3
1.3 Tujuan Penelitian	3
1.4 Manfaat Penelitian	3
1.5 Batasan Masalah	3
BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1 Penelitian Terdahulu	5
2.2 Sistem Tenaga Listrik	7
2.3 Penyulang Pronojiwo	8
2.4 Sistem Jaringan Distribusi	8
2.4.1 Sistem Jaringan Primer <i>Distribusi Radial</i>	8
2.4.2 Sistem Jaringan Primer <i>Distribusi Loop/Ring</i>	9
2.5 Kapasitor Bank	9
2.6 Daya Listrik	9
2.6.1 Daya Aktif (P)	9
2.6.2 Daya Reaktif (Q).....	10
2.6.3 Daya Semu (S)	10

2.7	Rugi Rugi Daya Listrik.....	11
2.8	Jatuh Tegangan (<i>Drop Voltage</i>)	11
2.9	Metode <i>Fast voltage stability index</i>	12
BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN.....		13
3.1	Waktu dan Tempat Penelitain.....	13
3.2	Alat dan Bahan	14
3.3	Tahapan Penelitian	14
3.4	Metodologi Penelitian	14
3.5	Variabel Penelitian.....	16
3.5.1	Variabel Bebas.....	16
3.5.2	Variabel Terikat	17
3.5.3	Variabel Kontrol	17
3.6	Gambar <i>Single line diagram</i>	17
BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN.....		19
4.1	Data Penyulang.....	20
4.2	Analisa Kondisi Awal Jaringan.....	22
4.3	Analisa Iterasi Pertama Jaringan	28
4.4	Analisa Iterasi Kedua Jaringan.....	34
4.5	Analisa Hasil Akhir Tegangan <i>Load bus</i>	40
4.6	Analisa Perbandingan Hasil Tegangan Sebelum Dan Sesudah Penempatan Kapasitor Bank.....	42
BAB 5 PENUTUP		45
5.1	Kesimpulan.....	45
5.2	Saran	46
DAFTAR PUSTAKA.....		47
LAMPIRAN		

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Sistem Distribusi Tenaga Listrik (Sumber: PDKB.id).....	7
Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian	14
Gambar 3.2 Diagram Alir Metode <i>Fast voltage stability index</i>	14
Gambar 3.3 <i>Single line diagram</i> Penyulang Pronojiwo.....	18
Gambar 4.1 <i>Single line diagram</i> ETAP	22
Gambar 4.2 Data Tegangan <i>Load bus</i> Sebelum Dipasangi Kapasitor Bank.....	23
Gambar 4.3 Data FVSI Sebelum Dipasangi Kapasitor Bank (10 tertinggi)	24
Gambar 4.4 Lokasi Penempatan Kapasitor Bank Pada Bus 55 to 56	26
Gambar 4.5 Kondisi Penyulang Saat Penempatan Kapasitor Bank Pada Bus 55 to 56	26
Gambar 4.6 Data Tegangan <i>Load bus</i> Iterasi Pertama.....	29
Gambar 4.7 Data FVSI pada iterasi pertama (10 tertinggi)	30
Gambar 4.8 Lokasi Penempatan Kapasitor Bank Pada Bus 160 to 153	32
Gambar 4.9 Kondisi Penyulang Saat Penempatan Kapasitor Bank Pada Bus 160 to 153	33
Gambar 4.10 Data Tegangan <i>Load bus</i> Iterasi Kedua	35
Gambar 4.11 Data FVSI Iterasi Kedua (10 tertinggi).....	36
Gambar 4.12 Lokasi Penempatan Kapasitor Bank Pada Bus 66-67 to 222	38
Gambar 4.13 Kondisi Penyulang Saat Penempatan Kapasitor Bank Pada Bus 66- 67 to 222.....	39
Gambar 4.14 Data Tegangan Akhir	41
Gambar 4.15 Grafik Perbandingan Tegangan Pada <i>Load bus</i>	42

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Penelitian Terdahulu.....	5
Tabel 4.1 Data Penghantar per <i>section</i> Jaringan Distribusi Pronojiwo	20

BAB 1. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Seiring perkembangan zaman, penggunaan listrik menjadi sangat penting untuk kehidupan Manusia. Hal tersebut menyebabkan konsumsi beban listrik pada sistem distribusi semakin meningkat. Dalam proses penyaluran tenaga listrik dari sumber hingga ke konsumen yang berada jauh di ujung jaringan akan mengalami rugi daya (*power loss*) dan jatuh tegangan (*voltage drop*). Kondisi ini merupakan permasalahan umum pada sistem distribusi tenaga listrik. Jatuh tegangan dapat disebabkan oleh berbagai faktor, antara lain jenis dan panjang saluran penghantar, konfigurasi jaringan distribusi, karakteristik beban, nilai faktor daya, serta besarnya daya terpasang pada sistem tersebut (Hisyam et al., 2022).

Sebagai upaya untuk mendapatkan sistem distribusi tenaga listrik yang andal, salah satu metode yang banyak digunakan adalah pemasangan kapasitor bank pada jaringan distribusi. Kapasitor bank merupakan komponen listrik yang berfungsi menghasilkan daya reaktif dan menyeimbangkan kebutuhan daya reaktif beban pada sistem. Metode penempatan kapasitor bank memiliki keunggulan dalam meningkatkan efisiensi dan kualitas tegangan di suatu wilayah distribusi. Dengan memberikan suplai daya reaktif secara lokal, kapasitor bank dapat mengurangi penyerapan daya reaktif dari sistem utama, sehingga arus yang mengalir pada saluran menjadi lebih kecil. Akibatnya, rugi daya (*power loss*) dan jatuh tegangan (*voltage drop*) dapat diminimalkan, serta tegangan pada bus-bus beban dapat dipertahankan mendekati nilai nominalnya, terutama saat kondisi beban maksimum (Buton et al., 2023).

Penentuan lokasi pemasangan kapasitor bank pada jaringan distribusi diperlukan perhitungan yang akurat agar penempatan kapasitor dapat dilakukan secara efisien dan tepat. Pemilihan lokasi yang tidak tepat dapat menyebabkan kurangnya efektivitas profil tegangan dan penurunan rugi daya yang kurang optimal. Salah satu metode yang dapat digunakan untuk menentukan lokasi optimal kapasitor bank adalah metode *Fast voltage stability index* (FVSI). Metode

ini digunakan untuk mengidentifikasi saluran atau bus yang berada pada kondisi kritis sehingga dapat dijadikan dasar dalam menentukan tindakan perbaikan sistem, seperti pemasangan bank kapasitor. Setelah dilakukan kompensasi daya reaktif menggunakan bank kapasitor, profil tegangan mengalami peningkatan dan kondisi sistem menjadi lebih stabil. (Amadi et al., 2026).

Pada sistem distribusi yang dikelola oleh PLN UP3 Jember, terdapat lokasi yang berpotensi untuk dipasang kapasitor bank yaitu Penyulang Pronojiwo. Berdasarkan data yang diperoleh dari PLN, penyulang Pronojiwo untuk diberikan kapasitor bank karena memiliki konfigurasi jaringan *radial*, panjang saluran yang cukup panjang, serta lokasi beban yang jauh dari sumber (GI Lumajang). Kondisi tersebut menyebabkan Penyulang Pronojiwo memiliki kecenderungan mengalami jatuh tegangan dan rugi daya yang cukup signifikan, terutama pada beban ujung.

Sugayandevi et al., (2022) melakukan penelitian mengenai perbandingan berbagai metode *Voltage stability index* (VSI) untuk mengestimasi batas kemampuan pembebanan serta mengidentifikasi saluran dan bus yang paling kritis terhadap terjadinya penurunan tegangan. Penelitian dilakukan menggunakan sistem uji IEEE 14 bus dengan beberapa skenario peningkatan beban dan dianalisis menggunakan perangkat lunak PSAT. Hasil penelitian menunjukkan bahwa nilai indeks yang mendekati satu menandakan kondisi sistem semakin mendekati batas kestabilan tegangan, sehingga dapat digunakan untuk mengidentifikasi saluran maupun bus yang kritis. Penelitian ini juga menyimpulkan bahwa penggunaan beberapa indeks kestabilan tegangan secara bersamaan memberikan informasi yang lebih baik dalam mengevaluasi kondisi sistem dibandingkan hanya menggunakan satu indeks saja. Temuan tersebut mendukung penggunaan FVSI sebagai parameter evaluasi kestabilan tegangan setelah dilakukan optimasi sistem, seperti pemasangan bank kapasitor, karena FVSI mampu menunjukkan tingkat kedekatan sistem terhadap kondisi penurunan tegangan.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang diatas dapat ditarik rumusan masalah pada penelitian ini sebagai berikut :

1. Bagaimana kondisi profil tegangan pada Penyulang Pronojiwo sebelum dilakukan pemasangan kapasitor bank?
2. Bagaimana nilai *Fast voltage stability index* (FVSI) pada setiap bus Penyulang Pronojiwo sehingga dapat ditentukan bus kandidat terbaik untuk pemasangan kapasitor bank?
3. Berapa kapasitas kapasitor bank yang diperlukan pada lokasi terpilih berdasarkan kebutuhan daya reaktif pada penyulang?

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Menganalisis kondisi awal rugi daya dan profil tegangan pada Penyulang Pronojiwo menggunakan simulasi aliran daya.
2. Menghitung nilai *Fast voltage stability index* (FVSI) untuk menentukan bus kandidat terbaik untuk pemasangan kapasitor bank.
3. Menentukan kapasitas kapasitor bank yang dibutuhkan berdasarkan kebutuhan daya reaktif pada bus kandidat terpilih.

1.4 Manfaat Penelitian

Manfaat dari penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Memberikan referensi ilmiah mengenai penggunaan metode FVSI dalam analisis penempatan kapasitor bank.
2. Memberikan informasi lokasi bus terbaik untuk pemasangan kapasitor bank pada Penyulang Pronojiwo.
3. Memberikan kapasitas kapasitor bank yang efektif untuk mengurangi rugi daya dan memperbaiki profil tegangan.

1.5 Batasan Masalah

Batasan masalah pada penelitian ini sebagai berikut :

1. Penelitian ini hanya membahas saat sistem dalam kondisi steady-state (beban

tetap).

2. Penelitian ini hanya dilakukan pada jaringan distribusi 20 kV berkonfigurasi radial.
3. Penelitian ini tidak membahas mengenai perbaikan faktor daya.

BAB 2. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penelitian Terdahulu

Penelitian sebelumnya yang berkaitan dengan topik ini disajikan pada Tabel 2.1 sebagai berikut:

Tabel 2.2 Penelitian Terdahulu

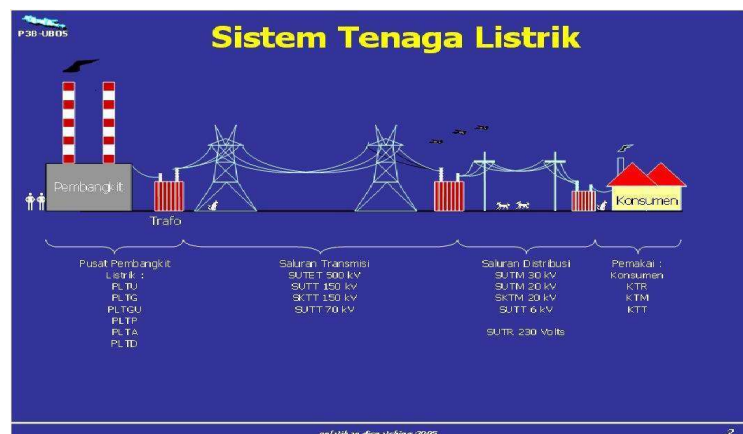
Nama dan Tahun Penelitian	Judul Penelitian	Metode Penelitian	Hasil Penelitian
Werkie et al., (2025)	<i>Voltage Stability Assessment Based on Modified Line Voltage stability index in the Presence of Renewable Energy Integration and Credible Contingencies</i>	MLVSI	Penelitian membandingkan beberapa metode <i>Voltage stability index</i> pada sistem IEEE 57 Bus untuk mengidentifikasi saluran kritis akibat peningkatan beban, penetrasi energi terbarukan, dan kondisi kontingensi. Hasil penelitian menunjukkan bahwa MLVSI efektif dalam mendeteksi kondisi sistem yang mendekati <i>voltage collapse</i>. Penelitian hanya berfokus pada evaluasi kestabilan tegangan dan perbandingan indeks VSI. Penelitian ini belum melakukan optimasi penempatan kapasitor bank maupun menentukan kapasitas kapasitor bank untuk meningkatkan profil tegangan pada jaringan distribusi nyata seperti yang dilakukan pada skripsi ini.

Nama dan Tahun Penelitian	Judul Penelitian	Metode Penelitian	Hasil Penelitian
Amadi et al., (2026)	<i>Fast Voltage Stability Indices Model for Voltage Collapse Prediction in Distribution Networks: A Nigerian 33/11 kV Feeder Study</i>	FVSI, LVSI, LVSF	Penelitian menganalisis kestabilan tegangan jaringan distribusi 33/11 kV menggunakan tiga metode VSI. Setelah pemasangan kapasitor bank sebesar 18 kVAr, profil tegangan meningkat dari 8,4 kV menjadi 10,85 kV. Selain itu, metode LVSF memiliki sensitivitas yang lebih baik dibandingkan FVSI dan LVSI. Penelitian menggunakan kapasitas kapasitor bank yang telah ditentukan dan hanya membandingkan performa beberapa indeks VSI. Penelitian ini belum melakukan proses optimasi lokasi dan kapasitas kapasitor bank berdasarkan hasil analisis FVSI secara bertahap seperti yang dilakukan pada penelitian ini.

2.2 Sistem Tenaga Listrik

Sistem tenaga listrik merupakan suatu kesatuan yang terdiri dari berbagai komponen atau peralatan listrik yang saling terhubung dan bekerja secara terpadu untuk membentuk sebuah sistem. Peralatan listrik yang termasuk di dalam sistem ini antara lain generator sebagai sumber pembangkit energi listrik, transformator, bus-bar, saluran transmisi, saluran distribusi, serta beban sebagai pengguna energi listrik. Selama sistem tenaga listrik beroperasi, kestabilan sistem harus senantiasa dijaga agar penyaluran energi listrik dapat berlangsung secara berkelanjutan dan mampu memberikan pelayanan yang andal dan terus-menerus kepada beban. Oleh karena itu, pengelolaan dan pengendalian sistem tenaga listrik yang baik sangat diperlukan untuk menjamin keandalan, keamanan, dan efisiensi penyaluran energi listrik (Wibowo et al., 2023)

Berdasarkan jenis arus sendiri, arus dibagi menjadi dua yaitu AC (*Alternating Current*) dan DC (*Direct Current*). Dalam sistem tenaga listrik AC sendiri digunakan transformator untuk menaikkan dan menurunkan tegangan. Pada sistem AC sendiri terdapat dua jenis yaitu satu fasa dan tiga fasa, akan tetapi sistem tiga fasa lebih sering digunakan karena daya yang disalurkan bisa lebih besar, harga sesaatnya (*instantaneous value*) konstan, dan magnet putarnya mudah diadakan (Cekdin et al., 2013).



Gambar 2.1 Sistem Distribusi Tenaga Listrik (Sumber: PDKB.id)

2.3 Penyulang Pronojiwo

Penyulang Pronojiwo merupakan salah satu penyulang distribusi tenaga listrik yang dikelola oleh PLN UP3 Jember dan disuplai dari Gardu Induk (GI) Lumajang. Penyulang ini memiliki konfigurasi jaringan distribusi radial, yang berbeda dengan sebagian penyulang lain di wilayah Jember dan Lumajang yang telah memiliki alternatif suplai. Penggunaan sistem distribusi radial pada Penyulang Pronojiwo disebabkan oleh kondisi geografis wilayah layanan yang didominasi daerah pegunungan, sehingga memiliki bentang jaringan yang relatif panjang, yaitu 103,79 KM. Panjang jaringan serta keterbatasan kemungkinan interkoneksi dengan penyulang lain menyebabkan sistem radial menjadi konfigurasi yang paling memungkinkan untuk diterapkan pada wilayah tersebut. Kondisi jaringan yang panjang dengan sistem radial ini mengakibatkan jarak antara sumber suplai dan beban ujung menjadi cukup jauh. Akibatnya, Penyulang Pronojiwo memiliki kecenderungan mengalami penurunan profil tegangan (*voltage drop*) yang cukup signifikan, terutama pada bus-bus yang berada di ujung jaringan. Oleh karena itu, diperlukan upaya perbaikan profil tegangan guna menjaga kualitas pelayanan tenaga listrik pada penyulang tersebut.

2.4 Sistem Jaringan Distribusi

Sistem distribusi adalah semua bagian dari peralatan dari sistem tenaga listrik antara sumber daya besar (*bulk power source*) dan jaringan pelayanan konsumen. Pada jaringan distribusi primer dapat dibedakan menjadi empat bagian yaitu *radial*, *loop/ring*, *grid/network*, dan *spindle*. Namun jaringan distribusi primer yang paling umum digunakan adalah sebagai berikut :

2.4.1 Sistem Jaringan Primer Bentuk *Radial*

Jaringan Distribusi ini paling umum digunakan karena sederhana dan murah. Sistem ini biasa digunakan di daerah yang bebannya rendah. Jaringan ini berpangkal dari gardu induk atau langsung dari pembangkit, kemudian menyebar ke gardu-gardu distribusi atau langsung ke konsumen berdaya besar. Tetapi sistem ini memiliki kekurangan yaitu keandalan sistem yang buruk dan tegangan jatuh yang besar pada ujung jaringan. (Cekdin, C. 2021).

2.4.2 Sistem Jaringan Primer Bentuk *Loop/Ring*

Sistem jaringan distribusi *loop/ring* dimulai dari gardu induk atau sumber daya, lalu ke daerah beban, kemudian kembali lagi ke gardu induk atau sumber daya yang sama. Dalam kata lain jaringan ini terdiri dari dua buah jaringan distribusi primer berbentuk *radial* yang ujung-ujungnya saling dihubungkan. Peralatan yang digunakan untuk menghubungkan kedua sistem *radial* tersebut adalah *load breaker switch* yang membagi dua saluran utama. Keandalan sistem ini lebih tinggi dari sistem *radial*. (Cekdin, C. 2021).

2.5 Kapasitor Bank

Kapasitor Bank merupakan kumpulan dari beberapa kapasitor yang dihubungkan secara paralel yang digunakan untuk memberikan kapasitas kapasitif tertentu. Kapasitor Bank memiliki karakteristik kapasitif (*leading*) yang bersifat mengurangi atau menghilangkan. Kapasitor bank sangat cocok untuk digunakan dalam sistem distribusi dikarenakan memiliki kelebihan untuk meningkatkan profil tegangan, meningkatkan $\cos \theta$, dan mengurangi rugi daya. (Fahlevi et al., 2023). Untuk meningkatkan keandalan, penggunaan kapasitor bank pada sistem distribusi sangat cocok untuk menaikkan profil tegangan, terutama pada pelanggan di ujung jaringan.

2.6 Daya Listrik

Pada konteks sistem distribusi, daya listrik memiliki tiga macam bentuk yang paling umum diantaranya :

2.6.1 Daya Aktif (P)

Daya aktif adalah komponen daya listrik yang benar-benar berubah menjadi energi berguna, seperti energi panas, cahaya, putaran motor, pemanasan, dan lain sebagainya. Daya ini merupakan daya nyata yang dikonsumsi oleh peralatan listrik. Daya aktif dilambangkan dengan huruf P dan memiliki satuan *Watt* (W) (Esye & Lesmana, 2021). Persamaan untuk mendapatkan nilai daya aktif dalam sistem tiga fasa adalah sebagai berikut:

$$P = \sqrt{3} \times V \times I \times \cos \theta \dots\dots\dots(2.1)$$

Dimana :

P = Daya Aktif (W),

V = Tegangan (V),

I = Arus (A)

$\cos \theta$ = Faktor Daya

2.6.2 Daya Reaktif (Q)

Daya reaktif merupakan bagian dari daya listrik yang digunakan untuk membentuk dan mempertahankan medan magnet pada peralatan listrik berbeban induktif. Ketika medan magnet tersebut terbentuk, timbul aliran fluks magnet yang memungkinkan peralatan bekerja sebagaimana mestinya. Besaran daya reaktif dinyatakan dalam satuan *volt-ampere* reaktif (VAR) (Esye & Lesmana, 2021). Persamaan untuk mendapatkan nilai daya reaktif dalam sistem tiga fasa adalah:

$$Q = \sqrt{3 \times V \times I \times \sin \theta} \dots \dots \dots (2.2)$$

Dimana :

Q = Daya reaktif(VAR),

V = Tegangan (V)

I = Arus (A)

2.6.3 Daya Semu (S)

Daya semu adalah keseluruhan daya yang mengalir pada suatu sistem listrik AC, yaitu gabungan antara daya aktif dan daya reaktif. Daya semu dilambangkan dengan huruf S dan dinyatakan dalam satuan volt-ampere (VA). (Esye & Lesmana, 2021). Secara umum, hubungan antara daya aktif, daya reaktif, dan daya semu digambarkan melalui segitiga daya, dengan persamaan di tiga fasa sebagai berikut:

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} \dots \dots \dots (2.3)$$

$$Q = \sqrt{3 \times V \times I} \dots \dots \dots (2.4)$$

Dimana :

S = Daya Semu (VA),

P = Daya Aktif (W),

Q = Daya reaktif (VAR),

V = Tegangan (V)

I = Arus (A)

2.7 Rugi-Rugi Daya Listrik

Rugi-rugi daya merupakan daya listrik yang hilang selama proses penyaluran energi listrik dari sumber ke beban. Kehilangan daya ini terjadi karena adanya hambatan pada penghantar atau kabel yang digunakan. Oleh karena itu, kondisi rugi-rugi daya perlu diperhatikan pada setiap jalur distribusi tenaga listrik karena dapat digunakan sebagai indikator baik atau buruknya kualitas penyaluran daya. Ketika suatu penghantar dialiri arus listrik secara terus-menerus, penghantar tersebut akan mengalami kenaikan suhu akibat energi listrik yang mengalir di dalamnya, sehingga sebagian daya listrik berubah menjadi panas dan terbuang. Semakin lama dan semakin besar arus yang mengalir, maka suhu penghantar akan semakin meningkat dan jumlah daya yang hilang pun semakin besar. (Irsyam et al., 2023)

Rugi-rugi daya yang hilang disebabkan karena adanya daya yang hilang pada jaringan yaitu daya aktif dan reaktif. Semakin panjang saluran distribusi maka rugi-rugi daya aktif dan reaktifnya juga semakin besar. Rugi daya pada sistem distribusi listrik juga dapat disebabkan oleh adanya tahanan pengantar, induktansi dan kapasitansi. Berdasarkan SPLN No.72 tahun 1987 besarnya nilai rugi daya diperlukan untuk menentukan keandalan pada sistem, yaitu nilai rugi daya tidak boleh melebihi standar yang di iijinkan sebesar 10%. Apabila melebihi standar yang di iijinkan akan menyebabkan kerugian terhadap penyalur tenaga listrik. (Manalu et al., 2023)

2.8 Jatuh Tegangan (*Drop Voltage*)

Jatuh tegangan atau *drop voltage* merupakan kondisi berkurangnya nilai tegangan listrik pada suatu penghantar yang terjadi karena adanya arus listrik yang mengalir melalui kabel yang memiliki hambatan. Besar kecilnya jatuh tegangan ini terutama dipengaruhi oleh arus yang mengalir dan impedansi kabel. Semakin besar arus yang melewati kabel, maka semakin besar pula penurunan tegangan yang

terjadi. Selain itu, impedansi kabel yang merupakan gabungan dari resistansi dan reaktansi juga sangat berpengaruh. Nilai impedansi ini ditentukan oleh ukuran penampang kabel dan panjang kabel, di mana kabel yang lebih panjang dan berpenampang lebih kecil cenderung mengalami jatuh tegangan yang lebih besar. (Bagus & Irawan, 2023)

Pelanggan yang berada jauh dari sumber cenderung menerima tegangan yang lebih kecil dibandingkan dengan pelanggan yang dekat dengan sumber. Hal tersebut dapat menyebabkan peralatan listrik pelanggan yang jauh dari sumber mengalami gangguan. Sesuai SPLN 1 : 1995, toleransi tegangan pelayanan adalah +5% dari tegangan standar tegangan rendah pada sisi pangkal dan -10 % pada sisi ujung (Tharo et al., 2020).

2.9 Metode *Fast voltage stability index*

Fast voltage stability index (FVSI) merupakan salah satu metode *Voltage stability index* (VSI) yang digunakan untuk mengevaluasi tingkat kestabilan tegangan pada sistem tenaga listrik. FVSI bekerja dengan menghitung indeks kestabilan setiap saluran berdasarkan parameter impedansi saluran, reaktansi, daya reaktif pada sisi penerima, dan tegangan pada sisi pengirim. Metode ini banyak digunakan karena memiliki proses perhitungan yang sederhana, cepat, serta mampu mengidentifikasi saluran yang berada pada kondisi kritis terhadap terjadinya *drop voltage*. Nilai FVSI yang semakin mendekati 1 menunjukkan bahwa sistem semakin mendekati batas ketidakstabilan tegangan, sedangkan nilai $FVSI < 1$ menunjukkan bahwa sistem masih berada pada kondisi operasi yang aman. Oleh karena itu, FVSI banyak dimanfaatkan sebagai parameter evaluasi dalam analisis kestabilan tegangan sebelum maupun sesudah dilakukan tindakan kompensasi daya reaktif, seperti pemasangan bank kapasitor. (Putra et al., 2022) Adapun rumus dari FVSI adalah :

$$FVSI_{ij} = \frac{4Z^2 Q_j}{V_i^2 X} \dots\dots\dots (2.6)$$

Dimana :

Z = Impedansi Saluran (Ohm/Km)

Q_j = Daya Reaktif Sisi Penerima (kVAR)

V_i = Tegangan Pada Sisi Pengirim (kV)

X = Reaktansi Saluran (Ohm/km)

BAB 3. METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Waktu dan Tempat Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan di PLN UP3 Jember yang terletak di Jl. Gajah Mada No.198, Kec. Kaliwates, Kabupaten Jember, Jawa Timur 68131. Penelitian ini dilaksanakan selama 4 bulan dari bulan November 2025 sampai Maret 2026.

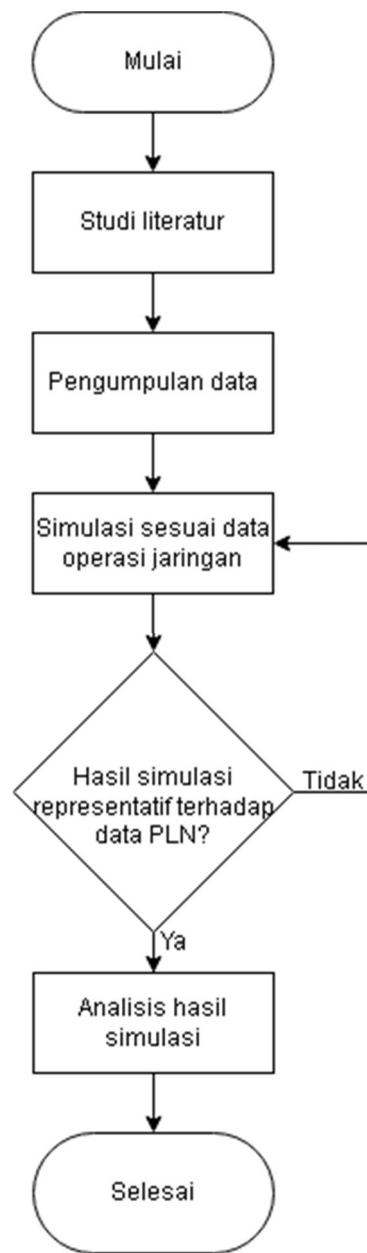
3.2 Alat dan Bahan

Adapun alat dan bahan yang akan digunakan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Laptop/PC
2. *Software* ETAP 19.0.1
3. Data dari PT. PLN (Persero) UP3 Jember, Jawa Timur.

3.3 Tahapan Penelitian

Tahap-tahap penelitian ‘Optimasi Jaringan Distribusi Untuk Memperbaiki Profil Tegangan dengan Penempatan Kapasitor Bank Menggunakan Metode *Fast voltage stability index* Pada *Software* ETAP 19.0.1” Diuraikan dalam diagram alir berikut:



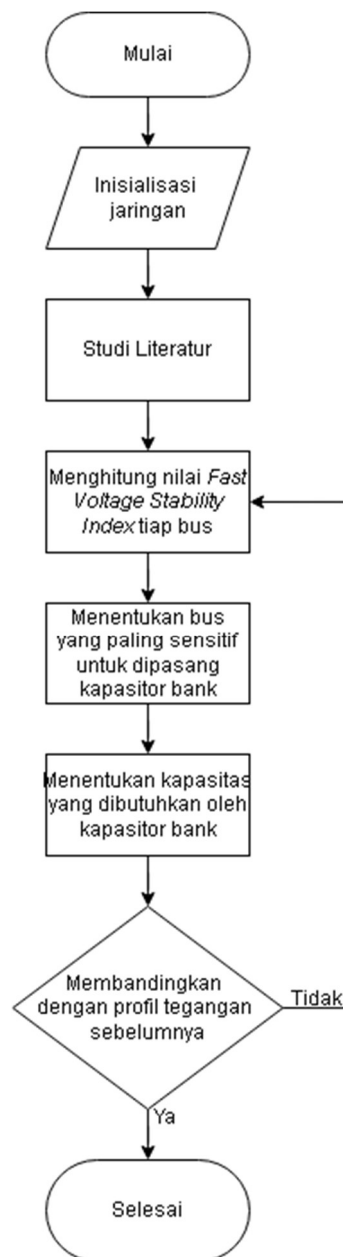
Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian

Studi Literatur, pada tahap ini dilakukan pendalaman materi yang diperoleh dari artikel maupun buku untuk menunjang pengerjaan penelitiain ini.

- a. Pengumpulan data, pada tahap ini dilakukan di PLN UP3 Jember untuk wawancara dan observasi. Data yang diperoleh berupa *single line diagram* dan data tiap beban di daerah Pronojiwo.
- b. Simulasi sesuai data operasi jaringan, pada tahap ini dijalankan simulasi jaringan menggunakan *software* ETAP 19.0.1.
- c. Membandingkan hasil dari nilai profil tegangan awal sebelum dipasang kapasitor bank dan nilai profil setelah dipasang kapasitor bank di bus tertentu hingga profil tegangan meningkat dan efisien.
- d. Analisis hasil simulasi, pada tahap ini dilakukan proses analisis dan pembahasan terhadap data yang diperoleh dan hasil simulasi yang dikerjakan serta memberikan kesimpulan sehingga menjadi laporan penelitian yang utuh.

3.4 Metodologi Penelitian

Pada metode penelitian “Optimasi Jaringan Distribusi Untuk Memperbaiki Profil Tegangan dengan Penempatan Kapasitor Bank Menggunakan Metode *Fast voltage stability index*” dapat diuraikan dalam diagram alir berikut ini :



Gambar 3.2 Diagram alir metode *Fast voltage stability index*

3.5 Variabel Penelitian

Variabel penelitian merupakan segala sesuatu yang menjadi objek pengamatan dalam penelitian untuk mengetahui hubungan antara faktor yang memengaruhi dan faktor yang dipengaruhi. Pada penelitian ini, variabel penelitian terdiri atas variabel bebas, variabel terikat, dan variabel kontrol.

3.5.1 Variabel Bebas

Variabel bebas adalah variabel yang memengaruhi atau menjadi penyebab perubahan terhadap variabel terikat. Pada penelitian ini, variabel bebas yang digunakan

yaitu Metode *Fast voltage stability index* (FVSI) sebagai metode penentuan lokasi optimal pemasangan kapasitor bank, Lokasi pemasangan kapasitor bank berdasarkan nilai FVSI tertinggi, Kapasitas kapasitor bank yang ditentukan melalui proses *trial and error* pada simulasi ETAP sebesar 1 MVar pada setiap lokasi pemasangan.

3.5.2 Variabel Terikat

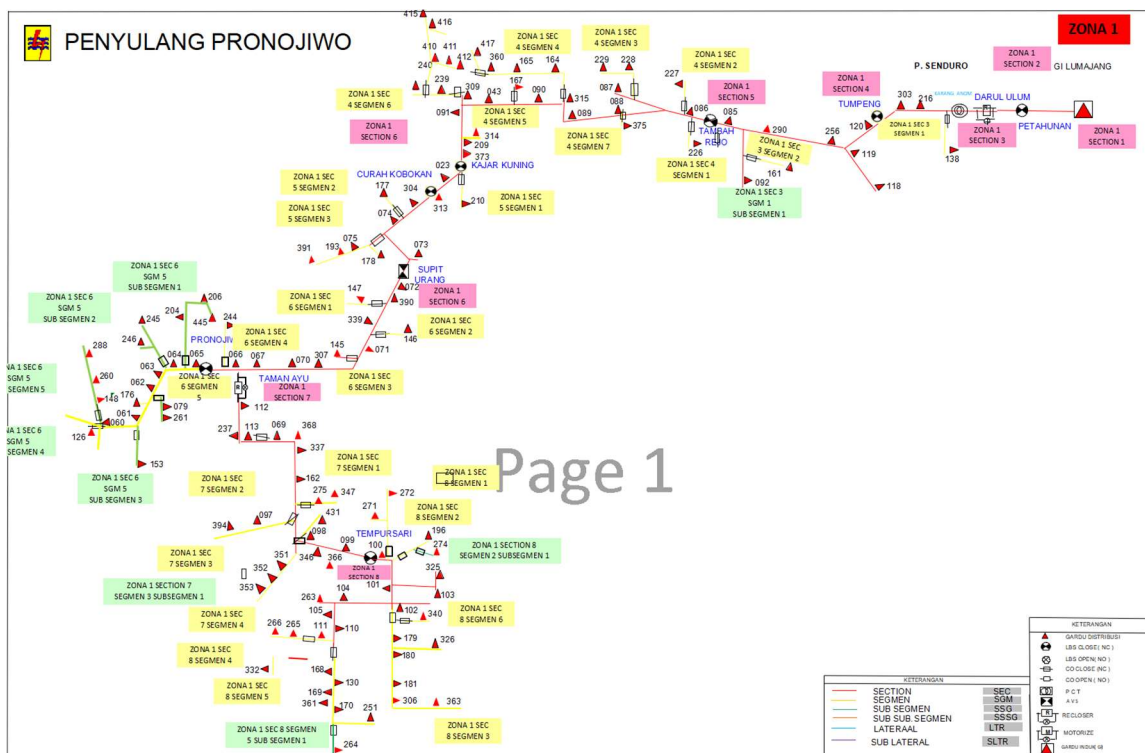
Variabel terikat adalah variabel yang dipengaruhi oleh perubahan variabel bebas. Pada penelitian ini, variabel terikat adalah profil tegangan jaringan distribusi, yang dimana perubahan nilai tegangan pada setiap *load bus* setelah dilakukan pemasangan kapasitor bank berdasarkan metode FVSI. Peningkatan profil tegangan digunakan sebagai indikator keberhasilan optimasi jaringan distribusi.

3.5.3 Variabel Kontrol

Variabel kontrol merupakan variabel yang dijaga tetap selama penelitian agar tidak memengaruhi hasil analisis. Variabel kontrol pada penelitian ini adalah jaringan distribusi yang digunakan adalah Penyulang Pronojiwo dengan konfigurasi radial 20 kV. Data jaringan, data beban, dan parameter penghantar diperoleh dari PT PLN (Persero) UP3 Jember. Kondisi sistem dianalisis pada keadaan *steady-state* dengan data beban yang sama pada setiap simulasi. Parameter jaringan seperti konfigurasi penyulang, panjang saluran, jenis konduktor, resistansi, reaktansi, dan induktansi tidak diubah selama proses penelitian.

3.6 Gambar *Single line diagram*

Single line diagram diperlukan untuk dapat mensimulasikan dan menganalisis pada *software* ETAP 19.0.1 dibawah ini:



Gambar 3.3 Single line diagram Penyulang Pronojiwo

BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN

Bab hasil dan pembahasan membahas mengenai peningkatan profil tegangan dengan metode *Fast voltage stability index* (FVSI) untuk mengetahui lokasi penempatan kapasitor bank di jaringan 20kV yang optimal pada penyulang Pronojiwo, Lumajang. Pengujian ini dilakukan pada perangkat lunak ETAP 19.0.1 untuk mengaplikasikan kapasitor bank guna memperbaiki profil tegangan.

Hasil penelitian terdiri dari kondisi jaringan distribusi sebelum dipasang kapasitor bank dan dibandingkan dengan setelah dipasang kapasitor bank terhadap tegangan pada setiap bus. Kondisi beban yang digunakan merupakan kondisi beban *real-time* yang diperoleh dari PLN UP3 Jember.

4.1 Data Penyulang

Sebelum dilakukan analisis menggunakan metode *Fast voltage stability index* (FVSI) dan pemasangan kapasitor bank, terlebih dahulu dilakukan identifikasi terhadap kondisi jaringan distribusi Penyulang Pronojiwo. Data jaringan yang digunakan pada penelitian ini merupakan data operasi yang diperoleh dari PT PLN (Persero) UP3 Jember. Data tersebut meliputi konfigurasi jaringan, data beban, serta parameter penghantar pada setiap *section* penyulang. Berdasarkan hasil simulasi aliran daya (*load flow*) kondisi awal, Penyulang Pronojiwo mengalami penurunan tegangan pada bus ujung hingga mencapai 81,8% dari tegangan nominal. Nilai tersebut berada di bawah batas toleransi tegangan yang ditetapkan dalam SPLN 1:1995, yaitu tegangan pada ujung jaringan tidak boleh mengalami penurunan melebihi 10% dari tegangan nominal. Dengan demikian, kondisi tersebut menunjukkan bahwa Penyulang Pronojiwo mengalami *voltage drop* sebesar 18,2%, sehingga diperlukan upaya perbaikan profil tegangan melalui pemasangan kapasitor bank.

Salah satu data yang diperlukan dalam proses analisis adalah data parameter penghantar pada setiap *section* jaringan distribusi. Parameter tersebut meliputi panjang penghantar, nilai resistansi (R), induktansi (L), reaktansi (X), serta jenis konduktor yang digunakan. Parameter-parameter tersebut digunakan

sebagai dasar dalam analisis aliran daya (*load flow*) serta perhitungan metode *Fast voltage stability index* (FVSI).

Tabel 4.1 Data Penghantar per *section* Jaringan Distribusi Pronojiwo

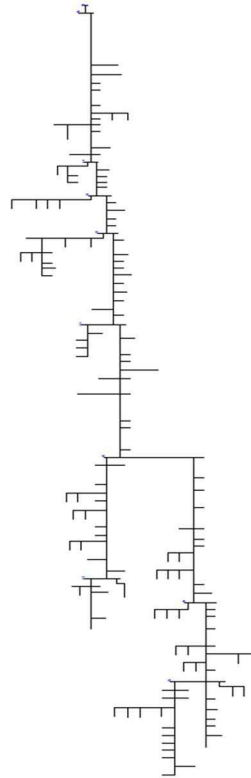
<i>Section</i>	Lokasi Beban Gardu (dari- sampai)	Panjang (km)	<i>R</i> (ohm/km)	<i>L</i> (mH/km)	<i>X</i> (ohm/km)	Jenis Konduktor
1	GI - LBS PETAHUNAN	2.698	0.225	1.003	0.31497	A3C 150mm
2	LBS PETAHUNAN - REC. TUMPENG	3.699	0.225	1.003	0.31497	A3CS 150mm
3	REC. TUMPENG - LBS TUMPENG	7.793	0.225	1.003	0.31497	A3C 150mm
		255	0.293	1.13	0.3026	A3C 120mm
4	LBS TUMPENG - LBS.TAMBAHREJO	11.700	0.225	1.003	0.31497	A3C 150mm
		1.307	0.438	1.003	0.31497	A3C 70mm
5	LBS.TAMBAHREJO - LBS SUMBERMUJUR	19.149	0.225	1.003	0.31497	A3COC 150mm
		5.196	0.438	1.003	0.31497	A3C 70mm
		10.128	0.225	1.003	0.31497	A3CS 150mm
6	LBS SUMBERMUJUR - REC. SUPITURANG	1.685	0.438	1.003	0.31497	A3C 70mm
		1.746	0.958	0.986	0.30972	A3C 35mm
7	REC. SUPITURANG - LBS PRONOJIWO	9.443	0.225	1.003	0.31497	A3CS 150mm
		3.832	0.438	1.003	0.31497	A3C 70mm
		8.413	0.225	1.003	0.31497	A3CS 150mm
8	LBS PRONOJIWO - UJUNG	7.328	0.438	1.003	0.31497	A3C 70mm
		152	0.293	1.13	0.3026	A3C 120mm
		20.614	0.225	1.003	0.31497	A3CS 150mm
9	REC.TAMANAYU - LBS TEMPURSARI	6.294	0.438	1.003	0.31497	A3C 70mm
		39	0.567	0.930	0.29228	A3C 55mm
		88	0.958	0.986	0.30972	A3C 35mm
		8.105	0.225	1.003	0.31497	A3CS 150mm
10	LBS TEMPURSARI - UJUNG	21.217	0.438	1.003	0.31497	A3C 70mm
		533	0.958	0.986	0.30972	A3C 35mm

Setiap *section* pada Penyulang Pronojiwo memiliki karakteristik penghantar yang berbeda, meliputi panjang saluran, jenis konduktor, nilai resistansi (R), induktansi (L), dan reaktansi (X). Perbedaan karakteristik tersebut disebabkan oleh penggunaan jenis dan ukuran konduktor yang disesuaikan dengan kondisi jaringan serta kebutuhan penyaluran daya pada masing-masing *section*. Parameter penghantar tersebut merupakan data yang digunakan dalam pemodelan jaringan pada perangkat lunak ETAP 19.0.1 sekaligus menjadi parameter penting dalam analisis aliran daya (*load flow*) dan perhitungan *Fast voltage stability index* (FVSI). Nilai resistansi dan reaktansi saluran akan membentuk impedansi penghantar yang memengaruhi besarnya rugi-rugi daya serta jatuh tegangan sepanjang jaringan distribusi.

Berdasarkan data tersebut terlihat bahwa konduktor A3C/A3CS berukuran 150 mm² memiliki nilai resistansi sebesar 0,225 Ω /km, sedangkan konduktor 70 mm² memiliki nilai resistansi sebesar 0,438 Ω /km dan konduktor 35 mm² memiliki nilai resistansi sebesar 0,958 Ω /km. Hal ini menunjukkan bahwa semakin kecil luas penampang konduktor, maka nilai resistansinya semakin besar. Sebaliknya, konduktor dengan luas penampang yang lebih besar memiliki hambatan yang lebih kecil sehingga mampu menyalurkan arus dengan rugi-rugi daya yang lebih rendah. Selain dipengaruhi oleh ukuran penampang konduktor, kondisi jaringan juga dipengaruhi oleh panjang saluran pada setiap *section*. Semakin panjang penghantar yang digunakan, maka impedansi total saluran akan semakin besar sehingga menyebabkan penurunan tegangan dan rugi-rugi daya menjadi lebih tinggi, terutama pada jaringan distribusi dengan konfigurasi radial seperti Penyulang Pronojiwo. Kondisi tersebut menyebabkan bus yang berada semakin jauh dari Gardu Induk Lumajang cenderung memiliki nilai tegangan yang lebih rendah dibandingkan bus yang berada di dekat sumber.

Oleh karena itu, data parameter penghantar pada Tabel 4.1 digunakan sebagai dasar dalam proses simulasi aliran daya untuk mengetahui kondisi awal jaringan serta sebagai parameter perhitungan metode *Fast voltage stability index* (FVSI) dalam menentukan lokasi pemasangan kapasitor bank yang paling efektif

untuk memperbaiki profil tegangan pada Penyulang Pronojiwo.



Gambar 4.1 *Single line diagram Software ETAP*

4.2 Analisa Kondisi Awal Jaringan

Analisis kondisi awal jaringan dilakukan untuk mengetahui performa sistem distribusi Penyulang Pronojiwo sebelum dilakukan pemasangan kapasitor bank. Tahap ini bertujuan untuk mengevaluasi profil tegangan pada setiap *load bus* sebagai kondisi awal (*base case*) yang nantinya digunakan sebagai acuan dalam menilai efektivitas pemasangan kapasitor bank. Analisis dilakukan menggunakan simulasi *load flow* pada perangkat lunak ETAP 19.0.1 dengan memanfaatkan data jaringan dan data beban aktual yang diperoleh dari PT PLN (Persero) UP3 Jember.

Hasil simulasi *load flow* memberikan informasi mengenai besar tegangan pada setiap *load bus* di sepanjang penyulang. Berdasarkan hasil tersebut dapat diketahui bus-bus yang mengalami penurunan tegangan paling signifikan serta

tingkat penyebaran *drop* tegangan pada jaringan distribusi. Informasi ini menjadi dasar dalam menentukan lokasi yang memerlukan kompensasi daya reaktif sebelum dilakukan analisis lebih lanjut menggunakan metode *Fast voltage stability index* (FVSI).

	Bus ID	Nominal kV	Voltage(%)
► 1	Bus42	20	89.11
2	Bus70	20	87.74
3	Bus95	20	86.79
4	Bus153	20	84.92
5	Bus195	20	99.2
6	Bus219	20	82.43
7	Bus286	20	82.02
8	Bus355	20	81.91
9	Bus413	20	81.8

Gambar 4.2 Data Tegangan *Load bus* Sebelum Dipasangi Kapasitor Bank

Berdasarkan data tersebut dapat dilihat bahwa profil tegangan pada Penyulang Pronojiwo sebelum dilakukan pemasangan kapasitor bank masih belum memenuhi standar tegangan pelayanan. Semakin jauh lokasi *load bus* dari Gardu Induk Lumajang, nilai tegangan yang diterima cenderung semakin menurun. Kondisi ini menunjukkan adanya penurunan tegangan (*voltage drop*) yang cukup signifikan sepanjang penyulang.

Hasil simulasi *load flow* menunjukkan bahwa terdapat *load bus* yang memiliki nilai tegangan di bawah 90% dari tegangan nominal. Bahkan pada bus yang berada di ujung penyulang yaitu bus413, tegangan hanya mencapai 81,8%, sehingga mengalami penurunan tegangan sebesar 18,2%. Nilai tersebut telah melewati batas toleransi. Kondisi ini menunjukkan bahwa kualitas tegangan pada Penyulang Pronojiwo masih belum memenuhi standar pelayanan yang ditetapkan. Penurunan tegangan tersebut dipengaruhi oleh karakteristik Penyulang Pronojiwo yang memiliki konfigurasi jaringan radial dengan panjang saluran yang relatif besar. Selain itu, akumulasi beban yang tersebar di sepanjang penyulang

menyebabkan aliran daya reaktif semakin meningkat sehingga mengakibatkan rugi-rugi daya dan penurunan tegangan pada sisi hilir jaringan. Akibatnya, bus yang berada semakin jauh dari sumber menerima tegangan yang lebih rendah dibandingkan bus yang berada di dekat Gardu Induk.

Berdasarkan kondisi tersebut, diperlukan upaya kompensasi daya reaktif untuk memperbaiki profil tegangan pada jaringan distribusi. Namun, sebelum dilakukan pemasangan kapasitor bank, perlu ditentukan terlebih dahulu lokasi yang paling efektif untuk pemasangan kapasitor. Oleh karena itu, dilakukan analisis menggunakan metode *Fast voltage stability index* (FVSI) untuk mengidentifikasi saluran atau bus yang memiliki tingkat sensitivitas tertinggi terhadap penurunan kestabilan tegangan.

Bus 1	Bus 2	Type	MW Flow	Mvar Load	Mvar Flow	Amp Flow	panjang (m)	panjang (km)	R/km	R total	X (ohm/km)	X Total	Z Total	V bus (kV)	%Voltage	Nilai FVSI
Bus55	Bus56	Line	0.0206	1.74	0.0129	0.788	54	0.054	0.225	0.01215	0.31497	0.017	0.315204	17.805	89.025	0.128247
Bus151	Bus153	Line	1.8	1.076	1.076	71.28	43	0.043	0.225	0.009675	0.31497	0.0135	0.315119	16.984	84.92	0.109396
Bus142	Bus143	Line	0.0094	1.132	0.0058	0.373	50	0.05	0.225	0.01125	0.31497	0.0157	0.315171	17.068	85.34	0.098038
Bus34	Bus28	Line	3.066	1.985	1.914	115.8	80	0.08	0.225	0.018	0.31497	0.0252	0.315484	18.025	90.125	0.096531
Bus148	Bus146	Line	1.846	1.122	1.104	72.99	58	0.058	0.438	0.025404	0.31497	0.0183	0.315993	17.021	85.105	0.084672
Bus40	Bus37	Line	2.927	1.87	1.817	111.3	93	0.093	0.225	0.020925	0.31497	0.0293	0.315664	17.874	89.37	0.079645
Bus18	Bus20	Line	3.488	2.222	2.22	129	115	0.115	0.225	0.025875	0.31497	0.0362	0.316031	18.509	92.545	0.071537
Bus262	Bus251	Line	0.595	0.453	0.407	25.29	31	0.031	0.225	0.006975	0.31497	0.0098	0.315047	16.447	82.235	0.068093
Bus216	Bus218	Line	1.279	0.749	0.749	51.89	66	0.066	0.225	0.01485	0.31497	0.0208	0.31532	16.493	82.465	0.052678
Bus69	Bus64	Line	2.632	1.638	1.616	101.4	129	0.129	0.225	0.029025	0.31497	0.0406	0.316305	17.59	87.95	0.052143

Gambar 4.3 Data FVSI Sebelum Dipasangi Kapasitor Bank (10 tertinggi)

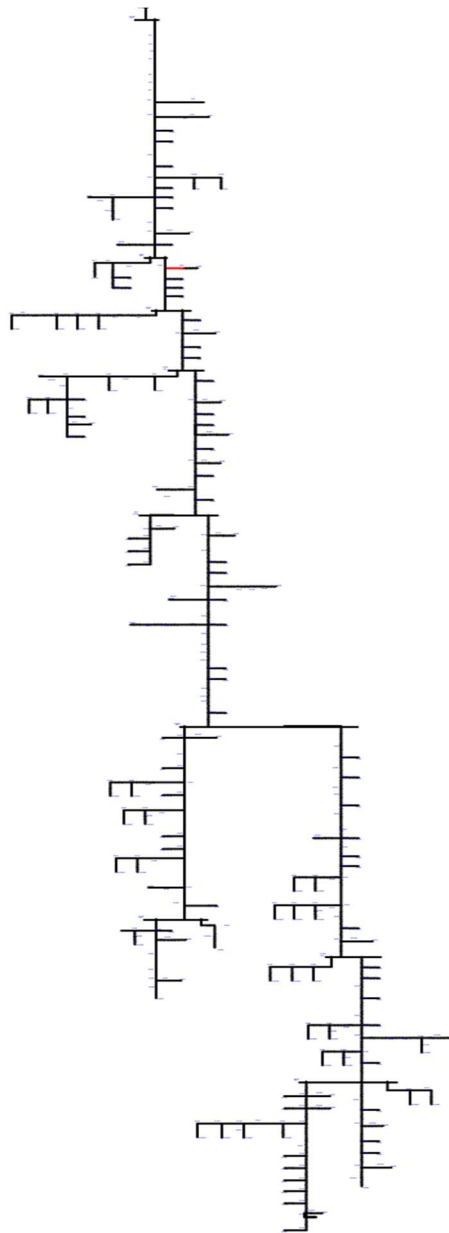
Berdasarkan hasil perhitungan *Fast voltage stability index* (FVSI), diperoleh sepuluh saluran dengan nilai FVSI tertinggi sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 4.2. Nilai FVSI digunakan untuk mengidentifikasi saluran yang memiliki tingkat sensitivitas paling tinggi terhadap ketidakstabilan tegangan. Semakin besar nilai FVSI atau semakin mendekati nilai 1, maka saluran tersebut semakin mendekati kondisi kritis dan menjadi prioritas untuk dilakukan kompensasi daya reaktif.

Saluran Bus 55 – Bus 56 memiliki nilai FVSI tertinggi yaitu sebesar 0.128247 dibandingkan saluran lainnya. Nilai tersebut menunjukkan bahwa saluran tersebut merupakan lokasi yang paling sensitif terhadap penurunan

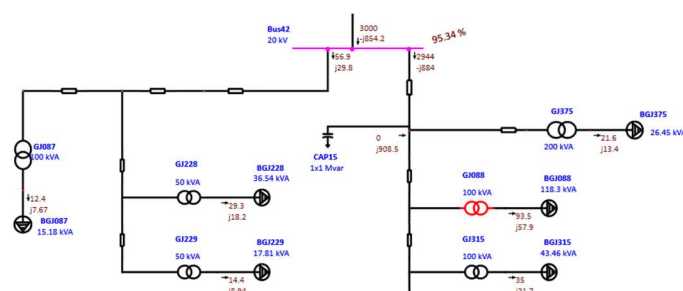
kestabilan tegangan pada kondisi awal sistem. Tingginya nilai FVSI mengindikasikan bahwa saluran tersebut memiliki kebutuhan kompensasi daya reaktif yang lebih besar dibandingkan lokasi lainnya, sehingga dipilih sebagai kandidat utama untuk pemasangan kapasitor bank.

Pemilihan lokasi pemasangan kapasitor bank pada saluran Bus 55 – Bus 56 dilakukan berdasarkan hasil analisis FVSI, dan tidak berdasarkan nilai tegangan terendah. Hal ini dikarenakan metode FVSI mempertimbangkan karakteristik sistem secara keseluruhan, seperti parameter saluran, daya reaktif beban, dan kondisi tegangan, sehingga mampu mengidentifikasi lokasi yang paling efektif untuk meningkatkan kestabilan tegangan apabila diberikan kompensasi daya reaktif. Selain saluran Bus 55 – Bus 56, terdapat beberapa saluran lain yang juga memiliki nilai FVSI relatif tinggi. Namun, karena nilai FVSI pada saluran tersebut masih lebih rendah dibandingkan Bus 55 – Bus 56, maka pemasangan kapasitor bank diprioritaskan terlebih dahulu pada saluran dengan nilai FVSI tertinggi. Setelah pemasangan kapasitor bank dan dilakukan simulasi ulang, analisis FVSI akan dihitung kembali untuk mengetahui apakah masih terdapat saluran lain yang memerlukan kompensasi daya reaktif.

Berdasarkan hasil tersebut, lokasi pemasangan kapasitor bank pertama ditentukan pada saluran Bus 55 – Bus 56, yang selanjutnya dimodelkan pada jaringan ETAP 19.0.1 untuk mengetahui pengaruhnya terhadap peningkatan profil tegangan pada seluruh Penyulang Pronojiwo.



Gambar 4.4 Lokasi Penempatan Kapasitor Bank Pada Bus 55 to 56



Gambar 4.5 Kondisi Penyulang Saat Penempatan Kapasitor Bank Pada Bus 55 to 56

Gambar tersebut menunjukkan lokasi pemasangan kapasitor bank hasil analisis *Fast voltage stability index* (FVSI) pada kondisi awal jaringan. Berdasarkan hasil perhitungan FVSI, saluran Bus 55 – Bus 56 memiliki nilai indeks tertinggi sehingga dipilih sebagai lokasi pertama untuk pemasangan kapasitor bank. *Line* tersebut merupakan saluran yang paling sensitif terhadap penurunan kestabilan tegangan dibandingkan *line* lainnya pada Penyulang Pronojiwo. Pemasangan kapasitor bank dilakukan pada saluran Bus 55 – Bus 56 dengan tujuan memberikan kompensasi daya reaktif secara lokal pada area yang memiliki kebutuhan daya reaktif paling besar. Dengan adanya suplai daya reaktif dari kapasitor bank, kebutuhan daya reaktif yang sebelumnya dipasok dari Gardu Induk dapat dikurangi sehingga arus yang mengalir pada saluran distribusi menjadi lebih kecil. Kondisi tersebut diharapkan mampu mengurangi rugi-rugi daya serta meningkatkan profil tegangan pada bus-bus di sekitar lokasi pemasangan maupun pada bus yang berada di sisi hilir jaringan.

Pada penelitian ini, kapasitas kapasitor bank ditentukan menggunakan pendekatan *trial and error* pada simulasi. Proses ini dilakukan dengan melakukan beberapa kali simulasi hingga diperoleh kapasitas yang mampu memberikan peningkatan profil tegangan tanpa menyebabkan kondisi *overvoltage* pada jaringan distribusi. Berdasarkan hasil simulasi, kapasitas kapasitor bank yang digunakan pada lokasi saluran Bus 55 – Bus 56 adalah sebesar 1 mVAr melalui proses *trial and error* dengan melihat tingkat efektivitas dari kapasitas kapasitor bank yang dibutuhkan hal tersebut didasari dikarenakan nilai tersebut menghasilkan kenaikan tegangan yang cukup berpengaruh dan tidak menyebabkan *overvoltage*. Pendekatan ini sejalan dengan penelitian yang dilakukan oleh Risjayanto & Wrahatnolo, (2018) menunjukkan bahwa kapasitas kapasitor bank tidak ditentukan secara tetap, melainkan diperoleh melalui proses simulasi hingga menghasilkan kondisi operasi sistem yang optimal. Dalam penelitian tersebut, hasil optimasi menunjukkan bahwa kebutuhan kapasitas kapasitor bank sebesar 790 kVAr mampu meningkatkan profil tegangan dan memperbaiki kinerja jaringan distribusi. Oleh karena itu, pada penelitian ini

kapasitas awal sebesar 1 MVAr digunakan sebagai nilai asumsi awal dalam proses simulasi, kemudian dievaluasi melalui *trial and error* hingga diperoleh peningkatan profil tegangan yang paling optimal sesuai karakteristik Penyulang Pronojiwo. Setelah kapasitor bank dipasang pada lokasi tersebut, dilakukan simulasi *load flow* kembali untuk mengevaluasi perubahan profil tegangan pada seluruh jaringan distribusi. Hasil simulasi setelah pemasangan kapasitor bank pada iterasi pertama selanjutnya digunakan sebagai dasar untuk menghitung kembali nilai FVSI, sehingga dapat diketahui apakah masih terdapat saluran lain yang memerlukan kompensasi daya reaktif pada iterasi berikutnya.

4.3 Analisa Iterasi Pertama Jaringan

Setelah pemasangan kapasitor bank pertama pada saluran Bus 55 – Bus 56, dilakukan simulasi *load flow* kembali menggunakan perangkat lunak ETAP 19.0.1 untuk mengetahui pengaruh kompensasi daya reaktif terhadap kondisi jaringan distribusi. Simulasi ini bertujuan untuk mengevaluasi perubahan profil tegangan pada setiap *load bus* setelah pemasangan kapasitor bank serta mengetahui apakah masih terdapat bus yang mengalami penurunan tegangan di bawah batas standar yang ditetapkan. Hasil simulasi pada iterasi pertama digunakan sebagai dasar untuk mengevaluasi efektivitas pemasangan kapasitor bank pada lokasi awal. Selain itu, hasil tersebut juga menjadi acuan dalam menghitung kembali nilai *Fast voltage stability index* (FVSI) guna mengidentifikasi saluran lain yang masih berada pada kondisi kritis dan memerlukan kompensasi daya reaktif. Dengan demikian, proses optimasi dilakukan secara bertahap hingga diperoleh kondisi jaringan dengan profil tegangan yang lebih baik.

	Bus ID	Nominal kV	Voltage (%)
► 1	Bus42	20	91.19
2	Bus70	20	89.86
3	Bus95	20	88.93
4	Bus153	20	87.09
5	Bus195	20	99.39
6	Bus219	20	84.64
7	Bus286	20	84.24
8	Bus355	20	84.13
9	Bus413	20	84.01

Gambar 4.6 Data Tegangan *Load bus* Iterasi Pertama

Profil tegangan pada Penyulang Pronojiwo mengalami peningkatan setelah dilakukan pemasangan kapasitor bank sebesar 1 MVar pada saluran Bus 55–Bus 56. Peningkatan tegangan terjadi pada sebagian besar *load bus* karena adanya kompensasi daya reaktif yang disuplai oleh kapasitor bank. Dengan berkurangnya kebutuhan daya reaktif yang harus dipasok dari Gardu Induk Lumajang, arus yang mengalir pada jaringan menjadi lebih kecil sehingga penurunan tegangan pada saluran distribusi dapat dikurangi. Meskipun demikian, hasil simulasi menunjukkan bahwa peningkatan profil tegangan belum sepenuhnya memenuhi standar tegangan pelayanan pada seluruh *load bus*. Masih terdapat beberapa bus yang memiliki nilai tegangan di bawah batas minimum yang dipersyaratkan. Kondisi ini menunjukkan bahwa pemasangan satu unit kapasitor bank belum mampu memberikan kompensasi daya reaktif secara optimal pada seluruh jaringan distribusi Penyulang Pronojiwo yang memiliki panjang saluran cukup besar dan konfigurasi jaringan radial.

Selain itu, peningkatan tegangan yang terjadi lebih dominan pada bus-bus yang berada di sekitar lokasi pemasangan kapasitor bank. Sementara itu, bus yang berada lebih jauh dari lokasi pemasangan masih mengalami penurunan tegangan akibat besarnya impedansi saluran dan jarak penyaluran daya dari sumber. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa pengaruh kompensasi daya reaktif

cenderung berkurang seiring bertambahnya jarak dari lokasi pemasangan kapasitor bank. Berdasarkan hasil tersebut, diperlukan evaluasi kembali terhadap kondisi jaringan menggunakan metode *Fast voltage stability index* (FVSI). Perhitungan FVSI pada iterasi pertama dilakukan untuk mengidentifikasi saluran yang masih memiliki tingkat sensitivitas tinggi terhadap ketidakstabilan tegangan sehingga dapat ditentukan lokasi pemasangan kapasitor bank berikutnya yang paling efektif.

Bus 1	Bus 2	Type	MW Flow	Mvar load	Mvar Flow	Amp Flow	panjang (m)	panjang (k)	R/km	R total	X (ohm/km)	X total	Z total	V bus	%Voltage	FVSI
Bus160	Bus153	Line	0.163	1.08	0.0981	6.318	890	0.89	0.958	0.85262	0.30972	0.275651	0.896072	17.417	0.87085	0.041482
Bus28	Bus24	Line	3.217	1.249	1.156	107.3	3813	3.813	0.225	0.857925	0.31497	1.200981	1.475937	18.669	0.93345	0.026
Bus195	Bus1	Line	3.746	1.593	1.593	119.6	2698	2.698	0.225	0.60705	0.31497	0.849789	1.044342	19.656	0.9828	0.021167
Bus64	Bus59	Line	2.703	1.727	1.647	101.4	1960	1.96	0.225	0.441	0.31497	0.617341	0.758677	18.161	0.90805	0.019528
Bus67-4	Bus37	Line	0.0845	1.046	0.0572	3.225	2705	2.705	0.225	0.608625	0.31497	0.851994	1.047052	18.279	0.91395	0.016113
Bus67-13	Bus148	Line	0.0235	1.109	0.0148	0.918	1193	1.193	0.438	0.522534	0.31497	0.375759	0.643612	17.449	0.87245	0.016062
Bus8	Bus10	Line	3.659	1.487	1.487	119.8	1970	1.97	0.225	0.44325	0.31497	0.620491	0.762548	19.042	0.9521	0.015373
Bus15	Bus20	Line	3.516	1.376	1.376	116	2053	2.053	0.225	0.461925	0.31497	0.646633	0.794676	18.785	0.93925	0.015233
Bus1	Bus2	Line	3.727	1.569	1.569	119.6	1695	1.695	0.225	0.381375	0.31497	0.533874	0.656101	19.517	0.97585	0.013285
Bus67-19	Bus222	Line	0.0516	0.566	0.0326	2.084	1720	1.72	0.438	0.75336	0.31497	0.541748	0.927924	16.916	0.8458	0.012575

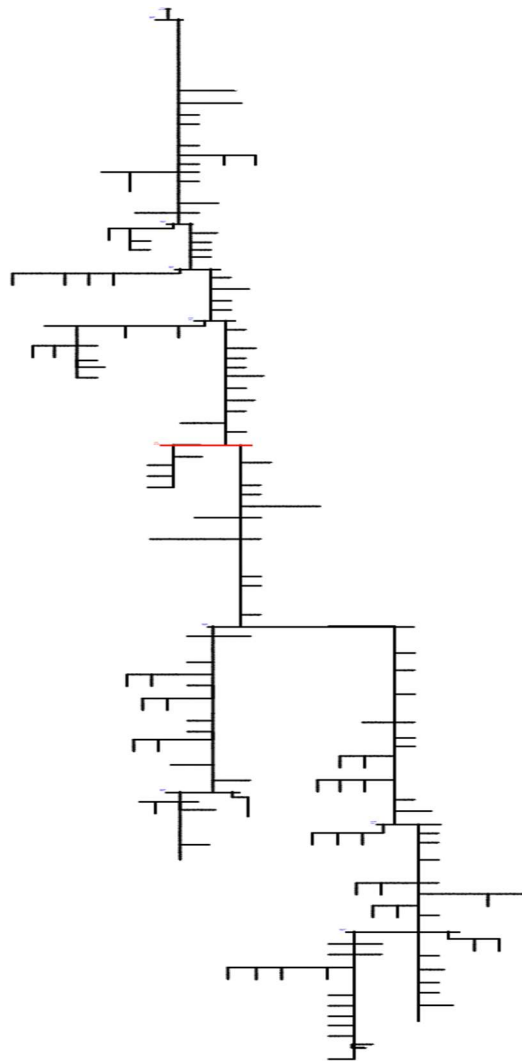
Gambar 4.7 Data FVSI pada iterasi pertama (10 tertinggi)

Setelah dilakukan pemasangan kapasitor bank pada saluran Bus 55–Bus 56, perhitungan *Fast voltage stability index* (FVSI) kembali dilakukan untuk mengetahui perubahan tingkat kestabilan tegangan pada setiap saluran. Hasil perhitungan FVSI pada iterasi pertama yang menampilkan sepuluh saluran dengan nilai FVSI tertinggi setelah sistem memperoleh kompensasi daya reaktif. Berdasarkan hasil nilai FVSI pada saluran Bus 55–Bus 56 yang sudah tidak memasuki 10 bus dengan nilai FVSI tertinggi terbukti mengalami penurunan dibandingkan kondisi awal. Hal ini menunjukkan bahwa pemasangan kapasitor bank pada saluran tersebut berhasil meningkatkan kestabilan tegangan sehingga saluran tersebut tidak lagi menjadi lokasi yang paling kritis pada jaringan distribusi.

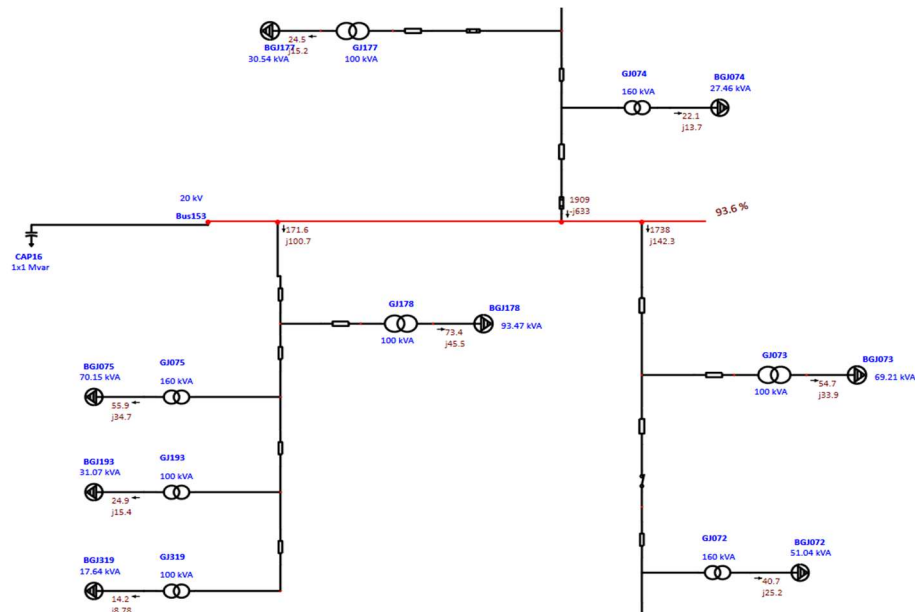
Setelah dilakukan evaluasi terhadap seluruh saluran, diperoleh bahwa saluran Bus 160–Bus 153 dengan nilai 0.041482 memiliki nilai FVSI tertinggi pada kondisi iterasi pertama. Nilai tersebut menunjukkan bahwa saluran tersebut menjadi lokasi yang paling sensitif terhadap ketidakstabilan tegangan setelah

dilakukan pemasangan kapasitor bank pada iterasi sebelumnya. Oleh karena itu, saluran Bus 160–Bus 153 dipilih sebagai kandidat berikutnya untuk pemasangan kapasitor bank. Perubahan lokasi saluran dengan nilai FVSI tertinggi menunjukkan bahwa distribusi daya reaktif pada jaringan telah mengalami perubahan setelah dilakukan kompensasi daya reaktif. Dengan berkurangnya kebutuhan daya reaktif pada saluran Bus 55–Bus 56, kondisi kritis sistem berpindah ke saluran lain yang masih memiliki kebutuhan kompensasi daya reaktif lebih besar. Oleh sebab itu, proses optimasi menggunakan metode FVSI dilakukan secara bertahap hingga diperoleh kondisi jaringan dengan profil tegangan yang memenuhi standar pelayanan.

Berdasarkan hasil analisis tersebut, pemasangan kapasitor bank pada iterasi kedua dilakukan pada saluran Bus 160–Bus 153, yang selanjutnya dimodelkan pada hasil simulasi untuk mengevaluasi peningkatan profil tegangan pada iterasi berikutnya.



Gambar 4.8 Lokasi Penempatan Kapasitor Bank Pada Bus 160 to 153



Gambar 4.9 Kondisi Penyulang Saat Penempatan Kapasitor Bank Pada Bus 160 to 153

Hasil tersebut menunjukkan lokasi pemasangan kapasitor bank pada iterasi pertama berdasarkan hasil perhitungan *Fast voltage stability index* (FVSI). Lokasi pemasangan ditandai dengan garis berwarna merah yang menunjukkan saluran Bus 160–Bus 153 sebagai saluran dengan tingkat sensitivitas tertinggi terhadap ketidakstabilan tegangan setelah dilakukan pemasangan kapasitor bank pada iterasi sebelumnya.

Pemasangan kapasitor bank pada saluran tersebut bertujuan untuk memberikan kompensasi daya reaktif pada daerah jaringan yang masih mengalami penurunan tegangan. Dengan adanya suplai daya reaktif yang lebih dekat dengan pusat beban, kebutuhan daya reaktif yang sebelumnya disuplai dari Gardu Induk dapat dikurangi sehingga aliran arus pada saluran distribusi menjadi lebih kecil. Kondisi tersebut diharapkan mampu meningkatkan profil tegangan pada jaringan distribusi. Berdasarkan proses *trial and error* yang dilakukan pada perangkat lunak ETAP 19.0.1, kapasitas kapasitor bank yang dipasang pada saluran Bus 160–Bus 153 adalah sebesar 1 MVar. Kapasitas tersebut dipilih karena memberikan peningkatan profil tegangan yang paling optimal tanpa menyebabkan tegangan pada bus lain melebihi batas tegangan yang diizinkan.

Setelah pemasangan kapasitor bank pada saluran Bus 160–Bus 153, simulasi *load flow* kembali dilakukan untuk mengevaluasi perubahan profil tegangan pada seluruh jaringan distribusi. Hasil simulasi tersebut selanjutnya digunakan sebagai dasar dalam menentukan apakah masih diperlukan pemasangan kapasitor bank pada lokasi lain untuk memperoleh kondisi jaringan yang lebih optimal.

4.4 Analisa Iterasi Kedua Jaringan

Berdasarkan hasil simulasi pada iterasi pertama, pemasangan kapasitor bank pada saluran Bus 55–Bus 56 dan Bus 160–Bus 153 telah memberikan peningkatan terhadap profil tegangan pada Penyulang Pronojiwo. Meskipun demikian, hasil simulasi menunjukkan bahwa masih terdapat beberapa *load bus* yang memiliki nilai tegangan di bawah batas pelayanan yang dipersyaratkan. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa kompensasi daya reaktif yang telah diberikan belum sepenuhnya mampu memperbaiki profil tegangan pada seluruh jaringan distribusi.

Untuk memperoleh kondisi jaringan yang lebih optimal, dilakukan iterasi kedua dengan menjalankan kembali simulasi *load flow* pada simulasi. Hasil simulasi ini digunakan untuk mengevaluasi perubahan profil tegangan setelah pemasangan dua unit kapasitor bank serta menghitung kembali nilai *Fast voltage stability index* (FVSI) pada setiap saluran. Perhitungan FVSI dilakukan untuk mengidentifikasi saluran yang masih memiliki tingkat sensitivitas tinggi terhadap ketidakstabilan tegangan sehingga dapat ditentukan lokasi pemasangan kapasitor bank berikutnya.

	Bus ID	Nominal kV	Voltage(%)
► 1	Bus42	20	93.25
2	Bus70	20	92.24
3	Bus95	20	91.56
4	Bus153	20	90.31
5	Bus195	20	99.58
6	Bus219	20	87.91
7	Bus286	20	87.53
8	Bus355	20	87.42
9	Bus413	20	87.31

Gambar 4.10 Data Tegangan *Load bus* Iterasi Kedua

Berdasarkan hasil simulasi pada iterasi kedua menunjukkan bahwa profil tegangan Penyulang Pronojiwo kembali mengalami peningkatan setelah dilakukan pemasangan kapasitor bank pada saluran Bus 160–Bus 153. Dibandingkan dengan hasil simulasi pada iterasi pertama, nilai tegangan pada sebagian besar *load bus* mengalami kenaikan sehingga jumlah bus yang berada di bawah batas tegangan pelayanan semakin berkurang dibuktikan dengan nilai Bus yang paling ujung yaitu Bus 413 tegangannya bernilai 87.31%.

Peningkatan profil tegangan tersebut menunjukkan bahwa kompensasi daya reaktif yang diberikan pada dua lokasi pemasangan kapasitor bank mampu memperbaiki kondisi operasi sistem distribusi. Suplai daya reaktif yang berasal dari kapasitor bank menyebabkan kebutuhan daya reaktif dari Gardu Induk berkurang sehingga arus yang mengalir pada saluran distribusi menjadi lebih kecil. Akibatnya, rugi-rugi daya dan penurunan tegangan pada jaringan juga mengalami penurunan. Meskipun demikian, hasil simulasi masih menunjukkan bahwa terdapat beberapa *load bus* yang memiliki nilai tegangan relatif rendah dibandingkan bus lainnya. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa distribusi daya reaktif pada jaringan masih belum sepenuhnya optimal, terutama pada bus yang berada jauh dari lokasi pemasangan kapasitor bank. Oleh karena itu, diperlukan evaluasi kembali menggunakan metode *Fast voltage stability index* (FVSI) untuk menentukan saluran berikutnya yang masih memerlukan kompensasi daya reaktif.

Berdasarkan hasil tersebut, perhitungan FVSI kembali dilakukan untuk mengidentifikasi saluran dengan tingkat sensitivitas tertinggi terhadap ketidakstabilan tegangan. Hasil perhitungan tersebut selanjutnya digunakan sebagai dasar dalam menentukan lokasi pemasangan kapasitor bank pada iterasi berikutnya.

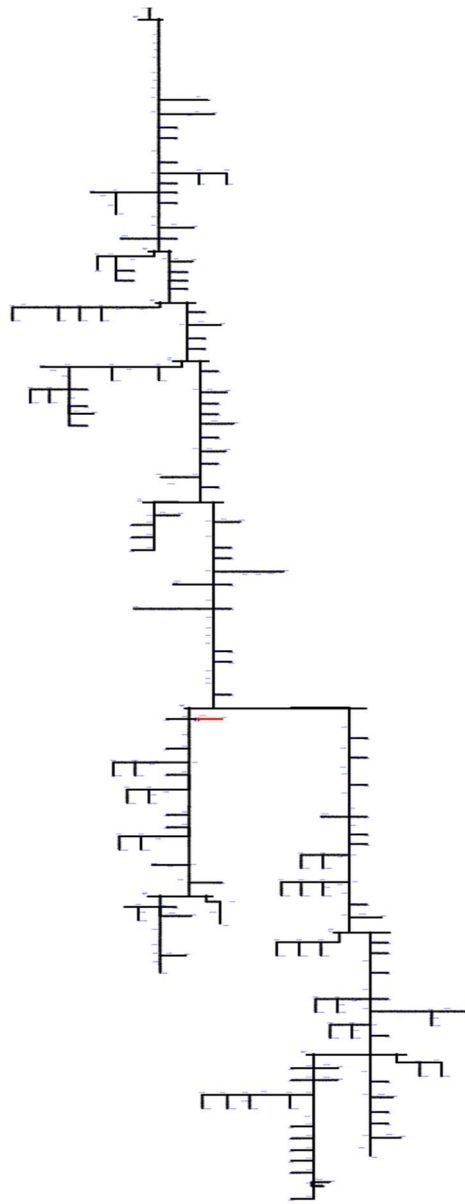
Bus 1	Bus 2	Type	MW Flow	Mvar load	Mvar Flow	Amp Flow	panjang (r)	panjang (k)	R/km	R total	X (ohm/km)	X total	Z total	V bus	%Voltage	FVSI
Bus160	Bus153	Line	0.167	1.089	0.1	6.233	890	0.89	0.958	0.85262	0.30972	0.275651	0.896072	18.062	0.9031	0.038894
Bus67-19	Bus222	Line	0.0529	0.572	0.0334	2.055	1720	1.72	0.438	0.75336	0.31497	0.541748	0.927924	17.572	0.8786	0.011777
Bus64	Bus59	Line	2.745	0.905	0.829	89.58	1960	1.96	0.225	0.441	0.31497	0.617341	0.758677	18.592	0.9296	0.009764
Bus195	Bus1	Line	3.77	0.7	0.7	112.2	2698	2.698	0.225	0.60705	0.31497	0.849789	1.044342	19.74	0.987	0.009222
Bus213	Bus212	Line	1.326	0.758	0.757	50.08	918	0.918	0.438	0.402084	0.31497	0.289142	0.495252	17.65	0.8825	0.008256
Bus211	Bus212	Line	1.329	0.758	0.758	50.06	1778	1.778	0.225	0.40005	0.31497	0.560017	0.688229	17.65	0.8825	0.008232
Bus153	Bus173	Line	1.692	0.987	0.987	62.83	1359	1.359	0.225	0.305775	0.31497	0.428044	0.526042	18	0.9	0.007877
Bus28	Bus24	Line	3.258	0.379	0.292	100.6	3813	3.813	0.225	0.857925	0.31497	1.200981	1.475937	18.968	0.9484	0.007643
Bus8	Bus10	Line	3.693	0.609	0.609	112.2	1970	1.97	0.225	0.44325	0.31497	0.620491	0.762548	19.256	0.9628	0.006157
Bus1	Bus2	Line	3.753	0.679	0.679	112.2	1695	1.695	0.225	0.381375	0.31497	0.533874	0.656101	19.63	0.9815	0.005683

Gambar 4.11 Data FVSI Iterasi Kedua (10 tertinggi)

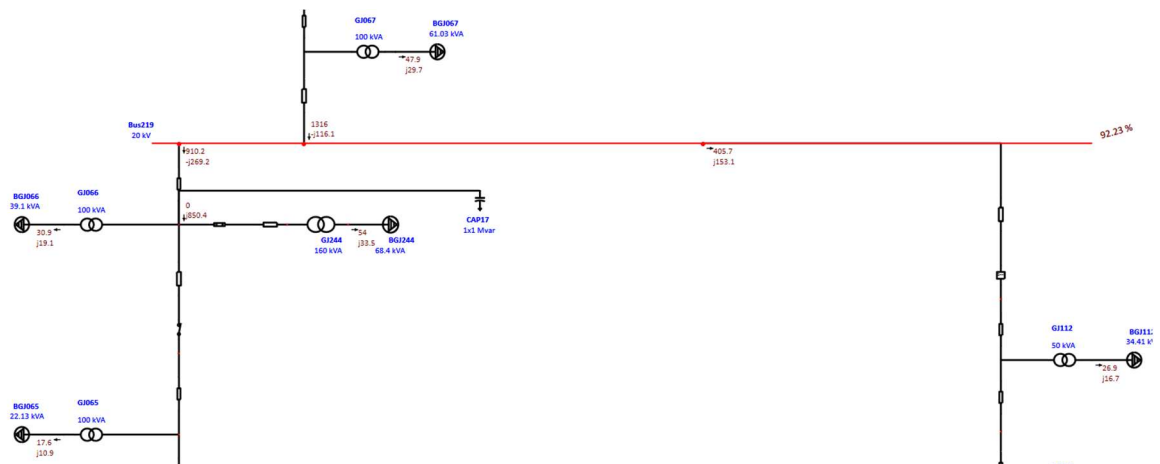
Setelah dilakukan pemasangan kapasitor bank pada saluran Bus 160–Bus 153, nilai *Fast voltage stability index* (FVSI) dihitung kembali untuk mengevaluasi tingkat kestabilan tegangan pada setiap saluran. Hasil perhitungan FVSI pada iterasi kedua ditunjukkan pada hasil perhitungan yang menampilkan sepuluh saluran dengan nilai FVSI tertinggi setelah sistem memperoleh kompensasi daya reaktif pada dua lokasi sebelumnya. Berdasarkan hasil perhitungan tersebut, nilai FVSI pada saluran Bus 160–Bus 153 mengalami penurunan tetapi masih menjadi Bus dengan nilai FVSI tertinggi, akan tetapi perlu dilakukan pengecekan kembali apakah nominal tegangan jatuh pada Busnya masih diatas 10% atau tidak, pada bus 160–153 tegangan jatuhnya sudah di nominal 90.31% sehingga Bus 160–153 sudah tidak menjadi bus prioritas untuk dipasang kapasitor bank. Penurunan nilai FVSI menunjukkan bahwa pemasangan kapasitor bank pada saluran tersebut berhasil meningkatkan kondisi operasi sistem dan mengurangi tingkat kekritisn saluran.

Setelah dilakukan evaluasi terhadap seluruh saluran, diperoleh bahwa saluran Bus 66–67 menuju Bus 222 memiliki nilai FVSI tertinggi kedua dan memiliki *drop* tegangan yang lebih dari 10% dimana tegangannya sebesar 87.86% yang dimana bus tersebut menjadi Bus prioritas pada kondisi iterasi kedua. Oleh

karena itu, saluran tersebut dipilih sebagai lokasi pemasangan kapasitor bank berikutnya karena masih memerlukan kompensasi daya reaktif untuk meningkatkan kestabilan tegangan. Perubahan saluran dengan nilai FVSI tertinggi pada setiap iterasi menunjukkan bahwa distribusi daya reaktif pada jaringan mengalami perubahan setelah dilakukan pemasangan kapasitor bank. Saluran yang sebelumnya memiliki nilai FVSI tinggi mengalami penurunan setelah memperoleh kompensasi daya reaktif, sedangkan saluran lain yang masih memiliki kondisi operasi relatif kritis akan menjadi prioritas pada iterasi berikutnya. Proses ini menunjukkan bahwa metode *Fast voltage stability index* (FVSI) mampu digunakan sebagai acuan dalam menentukan lokasi pemasangan kapasitor bank secara bertahap hingga diperoleh kondisi jaringan yang lebih optimal.



Gambar 4.12 Lokasi Penempatan Kapasitor Bank Pada Bus 66-67 to 222



Gambar 4.13 Kondisi Penyulang Saat Penempatan Kapasitor Bank Pada Bus 66-67 to 222

Data tersebut memperlihatkan lokasi pemasangan kapasitor bank pada iterasi kedua berdasarkan hasil evaluasi menggunakan metode *Fast voltage stability index* (FVSI). Setelah dilakukan pemasangan kapasitor bank pada dua lokasi sebelumnya, hasil perhitungan FVSI menunjukkan bahwa saluran Bus 66–67 menuju Bus 222 menjadi saluran dengan tingkat sensitivitas tertinggi terhadap ketidakstabilan tegangan. Oleh karena itu, saluran tersebut dipilih sebagai lokasi pemasangan kapasitor bank berikutnya.

Lokasi ini berada pada bagian penyulang yang relatif lebih jauh dari sumber dibandingkan lokasi pemasangan sebelumnya. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa meskipun kompensasi daya reaktif telah diberikan pada dua saluran sebelumnya, masih terdapat daerah pada bagian hilir penyulang yang memerlukan suplai daya reaktif tambahan untuk memperbaiki profil tegangan. Penempatan kapasitor bank pada saluran ini diharapkan mampu memberikan kompensasi daya reaktif yang lebih merata sehingga peningkatan tegangan dapat dirasakan hingga ke bus-bus yang berada di ujung jaringan.

Kapasitas kapasitor bank yang dipasang pada saluran Bus 66–67 menuju Bus 222 ditetapkan sebesar 1 MVar berdasarkan hasil *trial and error* pada perangkat lunak ETAP 19.0.1. Kapasitas tersebut dipilih karena memberikan peningkatan profil tegangan yang optimal tanpa menimbulkan kondisi *overvoltage* pada sistem distribusi.

Dengan selesainya pemasangan kapasitor bank pada lokasi ini, proses optimasi penempatan kapasitor bank yang dilakukan dalam penelitian telah mencakup tiga titik pemasangan berdasarkan urutan prioritas nilai FVSI. Hasil simulasi setelah pemasangan kapasitor bank pada ketiga lokasi tersebut selanjutnya dianalisis untuk mengetahui kondisi akhir profil tegangan Penyulang Pronojiwo serta mengevaluasi efektivitas metode FVSI dalam menentukan lokasi pemasangan kapasitor bank.

4.5 Analisa Hasil Akhir Tegangan *Load bus*

Setelah dilakukan proses optimasi melalui tiga tahap pemasangan kapasitor bank berdasarkan hasil analisis *Fast voltage stability index* (FVSI), diperoleh kondisi akhir profil tegangan pada Penyulang Pronojiwo. Hasil simulasi ini merupakan kondisi akhir jaringan setelah seluruh lokasi pemasangan kapasitor bank yang telah ditentukan diimplementasikan ke dalam model sistem distribusi.

Analisis pada tahap ini bertujuan untuk mengevaluasi perubahan profil tegangan pada seluruh *load bus* setelah dilakukan pemasangan kapasitor bank pada ketiga saluran yang telah dipilih. Evaluasi dilakukan untuk mengetahui sejauh mana metode *Fast voltage stability index* (FVSI) mampu menentukan lokasi pemasangan kapasitor bank yang efektif dalam meningkatkan kualitas tegangan pada jaringan distribusi.

Selain mengevaluasi peningkatan tegangan pada setiap *load bus*, analisis hasil akhir juga digunakan untuk memastikan bahwa kondisi operasi jaringan telah memenuhi batas tegangan pelayanan sesuai standar yang berlaku.

	Bus ID	Nominal kV	Voltage(%)
► 1	Bus42	20	95.34
2	Bus70	20	94.66
3	Bus95	20	94.24
4	Bus153	20	93.6
5	Bus195	20	99.77
6	Bus219	20	92.23
7	Bus286	20	91.89
8	Bus355	20	91.75
9	Bus413	20	91.64

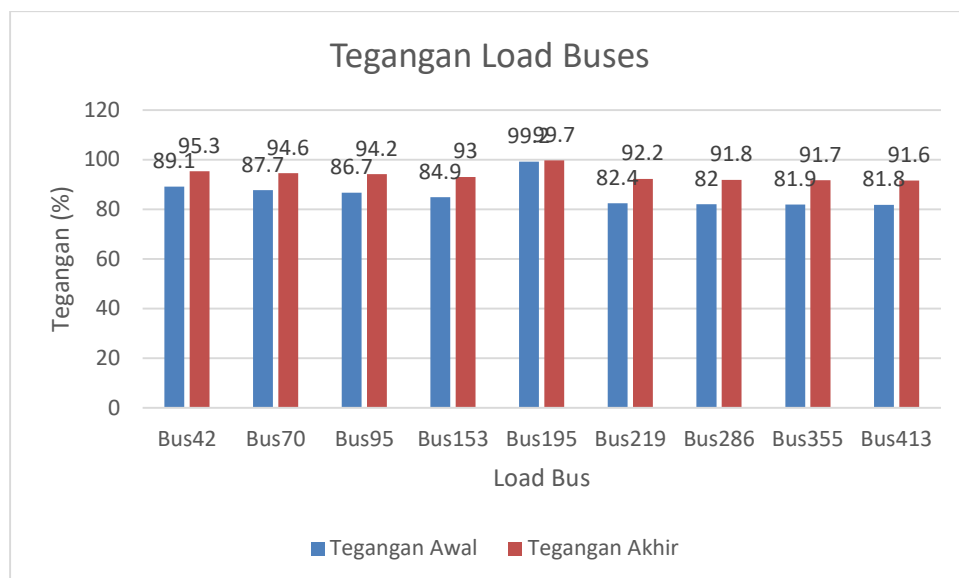
Gambar 4.14 Data Tegangan *Load Bus* Akhir

Hasil simulasi menunjukkan bahwa profil tegangan Penyulang Pronojiwo mengalami peningkatan setelah dilakukan pemasangan tiga unit kapasitor bank masing-masing berkapasitas 1 MVar pada saluran yang ditentukan berdasarkan metode *Fast voltage stability index* (FVSI). Dibandingkan dengan kondisi awal jaringan, nilai tegangan pada seluruh *load bus* mengalami perbaikan sehingga distribusi tegangan menjadi lebih merata di sepanjang penyulang. Peningkatan profil tegangan tersebut menunjukkan bahwa kompensasi daya reaktif yang diberikan mampu mengurangi penurunan tegangan pada jaringan distribusi. Penempatan kapasitor bank pada saluran yang memiliki tingkat sensitivitas tinggi terhadap ketidakstabilan tegangan terbukti memberikan pengaruh yang signifikan terhadap kondisi operasi sistem. Selain meningkatkan tegangan pada bus yang berada di sekitar lokasi pemasangan, perbaikan tegangan juga terjadi pada bus-bus lain yang berada di sepanjang penyulang akibat membaiknya distribusi daya reaktif dalam sistem.

Hasil simulasi juga menunjukkan bahwa kondisi tegangan pada jaringan telah memenuhi batas tegangan pelayanan yang dipersyaratkan yang dimana tegangan pada ujung jaringan yaitu sebesar 91.69% dari yang awalnya 81.8%. Dengan demikian, pemasangan kapasitor bank berdasarkan hasil analisis FVSI mampu memperbaiki kualitas tegangan pada Penyulang Pronojiwo sekaligus meningkatkan keandalan sistem distribusi dalam menyalurkan energi listrik

kepada konsumen. Secara keseluruhan, proses optimasi yang dilakukan melalui tiga tahap pemasangan kapasitor bank berhasil meningkatkan profil tegangan pada jaringan distribusi. Hal ini menunjukkan bahwa metode *Fast voltage stability index* (FVSI) dapat digunakan sebagai metode yang efektif dalam menentukan lokasi pemasangan kapasitor bank sehingga perbaikan tegangan dapat dicapai secara bertahap dan tepat sasaran.

4.6 Analisa Perbandingan Hasil Tegangan Sebelum Dan Sesudah Penempatan Kapasitor Bank



Gambar 4.15 Grafik Perbandingan Tegangan Pada *Load bus*

Untuk mengetahui efektivitas metode *Fast voltage stability index* (FVSI) dalam menentukan lokasi pemasangan kapasitor bank, dilakukan perbandingan antara kondisi profil tegangan sebelum dan sesudah proses optimasi. Perbandingan dilakukan pada beberapa *load bus* yang memiliki nilai tegangan terendah pada kondisi awal sistem. Pemilihan bus tersebut bertujuan untuk menunjukkan pengaruh pemasangan kapasitor bank terhadap bus yang mengalami penurunan tegangan paling signifikan.

Grafik tersebut memperlihatkan bahwa seluruh *load bus* mengalami peningkatan tegangan setelah dilakukan optimasi menggunakan metode FVSI. Hal

ini menunjukkan bahwa kompensasi daya reaktif yang diberikan mampu memperbaiki profil tegangan pada jaringan distribusi secara menyeluruh. Peningkatan tegangan terbesar terjadi pada bus-bus yang sebelumnya memiliki nilai tegangan paling rendah. Sebagai contoh, tegangan pada paling ujung yaitu Bus413 meningkat dari 81,80% menjadi 91,64%, sehingga mengalami kenaikan sebesar 9,84%. Peningkatan juga terjadi pada Bus355 dari 81,91% menjadi 91,75%, Bus286 dari 82,02% menjadi 91,89%, serta Bus219 dari 82,43% menjadi 92,23%. Hasil tersebut menunjukkan bahwa pemasangan kapasitor bank memberikan dampak yang lebih besar pada bus yang berada di bagian hilir penyulang, yaitu daerah yang sebelumnya mengalami penurunan tegangan paling besar.

Sementara itu, bus yang sejak awal telah memiliki nilai tegangan relatif tinggi juga mengalami peningkatan meskipun tidak sebesar bus dengan tegangan rendah. Sebagai contoh, tegangan pada Bus195 meningkat dari 99,20% menjadi 99,77%. Hal tersebut menunjukkan bahwa kompensasi daya reaktif tidak hanya memperbaiki kondisi bus tertentu, tetapi juga meningkatkan distribusi tegangan secara lebih merata pada seluruh jaringan distribusi.

Secara keseluruhan, hasil perbandingan menunjukkan bahwa metode *Fast voltage stability index* (FVSI) mampu menentukan lokasi pemasangan kapasitor bank secara efektif sehingga profil tegangan pada Penyulang Pronojiwo mengalami peningkatan yang signifikan. Setelah dilakukan optimasi, seluruh bus yang diamati telah berada di atas batas minimum tegangan pelayanan, sehingga kondisi operasi jaringan menjadi lebih baik dibandingkan sebelum pemasangan kapasitor bank.

Berdasarkan hasil perbandingan profil tegangan sebelum dan sesudah pemasangan kapasitor bank, dapat disimpulkan bahwa penerapan metode *Fast voltage stability index* (FVSI) berhasil meningkatkan kualitas profil tegangan pada Penyulang Pronojiwo. Pemasangan tiga unit kapasitor bank masing-masing berkapasitas 1 MVAR pada lokasi yang telah ditentukan mampu meningkatkan nilai tegangan pada seluruh *load bus* yang diamati. Selain meningkatkan profil

tegangan, pemasangan kapasitor bank juga membantu mendistribusikan daya reaktif secara lebih efektif sehingga kondisi operasi jaringan distribusi menjadi lebih stabil. Dengan demikian, hasil simulasi menunjukkan bahwa metode FVSI dapat digunakan sebagai metode yang efektif dalam menentukan lokasi pemasangan kapasitor bank untuk memperbaiki profil tegangan distribusi tenaga listrik.

BAB. 5 PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil simulasi dan analisis mengenai penentuan lokasi pemasangan kapasitor bank menggunakan metode *Fast voltage stability index* (FVSI) pada Penyulang Pronojiwo, maka dapat diperoleh beberapa kesimpulan sebagai berikut.

1. Metode *Fast voltage stability index* (FVSI) dapat digunakan untuk menentukan lokasi pemasangan kapasitor bank pada jaringan distribusi radial berdasarkan tingkat sensitivitas setiap saluran terhadap ketidakstabilan tegangan. Melalui proses evaluasi secara bertahap, diperoleh tiga lokasi pemasangan kapasitor bank, yaitu pada saluran Bus 55–Bus 56, Bus 160–Bus 153, dan Bus 66–Bus 67 menuju Bus 222, yang memiliki nilai FVSI tertinggi pada setiap iterasi.
2. Pemasangan tiga unit kapasitor bank dengan kapasitas masing-masing sebesar 1 MVar pada lokasi hasil analisis FVSI berhasil meningkatkan profil tegangan pada Penyulang Pronojiwo. Hasil simulasi menunjukkan bahwa tegangan pada bus dengan kondisi paling kritis mengalami peningkatan dari 81,80% menjadi 91,64%, sehingga telah memenuhi batas minimum tegangan pelayanan yang ditetapkan.
3. Proses optimasi yang dilakukan secara bertahap menunjukkan bahwa setiap pemasangan kapasitor bank memberikan kontribusi terhadap peningkatan profil tegangan jaringan. Selain meningkatkan tegangan pada bus yang berada di sekitar lokasi pemasangan, kompensasi daya reaktif juga memperbaiki distribusi tegangan pada bus-bus lain di sepanjang penyulang sehingga kondisi operasi sistem menjadi lebih baik. Pada penelitian ini penentuan kapasitas kapasitor bank ditentukan menggunakan proses *trial and error* melihat tingkat efektivitas dari kapasitas kapasitor bank yang dibutuhkan, pada penelitian ini menggunakan 1 mVar dikarenakan nilai tersebut tidak menimbulkan *overvoltage* dan mampu menaikkan nilai tegangan dengan baik

5.2 Saran

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, beberapa saran yang dapat diberikan untuk pengembangan penelitian selanjutnya adalah sebagai berikut.

1. Penelitian selanjutnya dapat mengembangkan metode *Fast voltage stability index* (FVSI) dengan membandingkannya terhadap metode optimasi lain, seperti *Loss Sensitivity Factor* (LSF), *Particle Swarm Optimization* (PSO), atau *Genetic Algorithm* (GA), sehingga dapat diketahui metode yang memberikan hasil paling optimal dalam menentukan lokasi pemasangan kapasitor bank.
2. Penelitian ini menggunakan kapasitor bank dengan kapasitas tetap sebesar 1 MVAR pada setiap lokasi pemasangan. Oleh karena itu, penelitian selanjutnya dapat mempertimbangkan optimasi kapasitas kapasitor bank pada setiap lokasi agar diperoleh kombinasi lokasi dan kapasitas yang lebih optimal dalam meningkatkan profil tegangan.
3. Penelitian selanjutnya dapat mengembangkan hasil dari pemasangan kapasitor bank pada penyulang pronojiwo dengan memperhitungkan biaya pemasangannya pada jaringan distribusi.
4. Penelitian selanjutnya dapat memperluas parameter evaluasi dengan menganalisis pengaruh pemasangan kapasitor bank terhadap rugi-rugi daya (*power losses*), faktor daya (*power factor*), maupun efisiensi sistem distribusi sehingga manfaat pemasangan kapasitor bank dapat dievaluasi secara lebih komprehensif.

DAFTAR PUSTAKA

- Amadi, H. N., Nwafor, P. U., & Uwho, K. O. (2026). *Fast Voltage Stability Indices Model for Voltage Collapse Prediction in Distribution Networks: A Nigerian 33/11 kV Feeder Study*. Journal of Electrical and Power System Engineering.
- Bagus, R. T., & Irawan, D. (2023). *Analisis Perbaikan Jatuh Tegangan Pada Gardu Induk Cerme Sistem Transmisi 150kV Menggunakan Aplikasi Digsilent Analysis of Voltage Drop Improvements in the Cerme Substation 150kV Transmission System Using the Digsilent Application*. 8(01), 10–21.
- Barlian, T., Apriani, Y., Savitri, N., & Hurairah, M. (2020). Analisis kapasitor bank untuk memperbaiki tegangan. Jurnal Surya Energy, 4(2), 391–396\
- Buton, S., Krismanto, A. U., Elektro, T., Itn, S., & Indonesia, M. (2023). *MENINGKATKAN PROFIL TEGANGAN DI JARINGAN DISTRIBUSI PT. PLN (PERSERO)*. 07, 7–17.
- Cekmas, C. (2021). *Distribusi daya listrik: Teori dan praktik*. Penerbit Andi.
- Cekmas, C., & Barlian, T. (2013). *Transmisi daya listrik*. Penerbit Andi.
- Esye, Y. (2021). Analisa perbaikan faktor daya sistem kelistrikan. Jurnal Teknik Elektro, 7(2), 108–112.
- Fahlevi, R. A., Studi, P., Industri, T., Menanggal, D., & Surabaya, K. (2023). *Peningkatan produktivitas pabrik kertas dengan mempertimbangkan power faktor dan menggunakan kapasitor bank di pt dayasa aria prima*. 8(2), 51–59.
- Faraby, M. D., Ushrha, I. M., Satrio, M. G., Basyith, M., & Sultan, A. R. (2023). *Analisis Penempatan Kapasitor Bank Pada IEEE 69-Bus Sistem Distribusi Radial*. 1–7.
- Hisyam, A., Purwoharjono, P., & Abidin, Z. (2022). Peningkatan profil tegangan menggunakan kapasitor bank pada jaringan tegangan menengah (JTM) 20 kV Penyulang Sei Deras. Jurnal Teknik Elektro, 1–17.
- Irsyam, M., Algusri, M., & Marpaung, L. P. (2023). Analisa rugi-rugi daya (*losses power*) pada jaringan tegangan rendah PT. Musimmas Batam. *Sigma Teknika*, 6(1), 109–119.
- Manalu, J. T., Panggabean, S. M., Napitupulu, J., Sinaga, J., & Jumari. (2021). *Analisa*

- rugi-rugi daya pada saluran distribusi tegangan menengah 20 kV di PT. PLN (Persero) UP3 Sibolga. Jurnal Teknik Elektro, 9(1), 45–54.*
- Putra, D. F. U., Firdaus, A. A., Putra, N. U., & Penangsang, O. (2022). *Prediksi Voltage stability index (VSI) metode Artificial Neural Network (ANN) untuk mendeteksi tegangan jatuh. Jurnal Sistim Informasi dan Teknologi, 4(4), 192–197.*
- Risjayanto, B. F., & Wrahatnolo, T. (2018). *Optimal Capacitor Placement (OCP) pada Sistem Jaringan Distribusi 20 kV Menggunakan ETAP. Jurnal Teknik Elektro, 8(1).*
- Saputra, A. U., Arsyad, M. I., Abidin, Z., Elektro, M. T., Teknik, F., & Tanjungpura, U. (1985). *ANALISA PERBAIKAN FAKTOR DAYA MENGGUNAKAN KAPASITOR BANK PADA PENYULANG SURUK PT PLN (Persero) ULP PUTUSSIBAU Dosen Teknik Elektro , Fakultas Teknik , Universitas Tanjungpura Program Studi Teknik Elektro , Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik , Universitas Tanjungpura.*
- Suganyadevi, M. V., & Babulal, C. K. (2009). *Estimating of Loadability Margin of a Power System by Comparing Voltage Stability Indices. International Journal of Electrical and Computer Engineering, 3(4), 385–392.*
- Tharo, Z., Tarigan, A., Anisah, S., Yuda, K. T., Sains, F., & Pancabudi, U. P. (2020). *PENGUNAAN KAPASITOR BANK SEBAGAI SOLUSI DROP TEGANGAN PADA JARINGAN 20 KV.*
- Werkie, Y. G., Nyakoe, G. N., & Wekesa, C. W. (2026). *Voltage Stability Assessment Based on Modified Line Voltage stability index in the Presence of Renewable Energy Integration and Credible Contingencies. Engineering Reports, 8(1), e70578.*
- Wibowo, S. H., B, P., Saifulah, & Watoni, M. A. (2023). *Analisa stabilitas generator serempak menghadapi gangguan hubung singkat pada sistem tenaga listrik. Jurnal INTEKNA, 23(1), 69–76.*

LAMPIRAN

