
Validasi Simulasi Kapasitor Bank untuk Perbaikan Drop Tegangan pada Sistem Distribusi 20 kV

Rivaldo Panggabean¹, Ahmad Burhanudin Fahmi^{2*}

^{1,2}Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Malang, Indonesia

*Penulis korespondensi, email: 180532531016@students.um.ac.id

Abstrak— Penurunan tegangan pada sistem distribusi tenaga listrik dapat menurunkan kualitas daya dan efisiensi penyaluran energi, terutama pada jaringan dengan beban induktif tinggi. Salah satu metode yang umum digunakan untuk memperbaiki kondisi tersebut adalah pemasangan kapasitor bank sebagai kompensasi daya reaktif. Penelitian ini bertujuan untuk memvalidasi dan membandingkan hasil simulasi pemasangan kapasitor bank pada transformator distribusi 20 kV. Metode penelitian menggunakan simulasi komparatif kuantitatif dengan membandingkan hasil simulasi independen terhadap jurnal acuan pada sistem distribusi 5 bus. Tahapan penelitian meliputi pengumpulan data, pemodelan single line diagram, simulasi aliran daya sebelum dan sesudah pemasangan kapasitor bank, perhitungan manual kebutuhan kapasitor, serta analisis perbandingan hasil simulasi. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kebutuhan kapasitor bank teoritis untuk meningkatkan faktor daya dari 0,85 menjadi 0,99 adalah sebesar 3.245,36 kVAr. Pemasangan kapasitor mampu menurunkan drop tegangan dari 6,8% menjadi 2,37% pada kondisi optimal. Namun, simulasi independen menghasilkan kapasitor aktif sebesar 6.490,72 kVAr yang menyebabkan over-compensation dengan faktor daya 0,948 leading dan drop tegangan 2,89%. Penelitian ini menyimpulkan bahwa akurasi simulasi sangat dipengaruhi oleh ketelitian pemodelan sistem. Oleh karena itu, validasi konfigurasi kapasitor dan parameter jaringan sangat direkomendasikan sebelum implementasi teknis dilakukan pada sistem distribusi nyata.

Kata kunci: ETAP 19.0.1, kapasitor bank, drop tegangan, faktor daya, sistem distribusi 20 kV, validasi simulasi.

This article is licensed under the [CC-BY-SA](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/) license.

1. Pendahuluan

Energi listrik merupakan kebutuhan utama dalam mendukung aktivitas masyarakat pada sektor rumah tangga, pendidikan, perdagangan, maupun industri. Seiring meningkatnya pertumbuhan penduduk, perkembangan teknologi, dan aktivitas ekonomi, kebutuhan energi listrik juga mengalami peningkatan yang signifikan. Kondisi tersebut menuntut sistem tenaga listrik untuk bekerja secara andal, efisien, dan mampu menjaga kualitas daya agar tetap stabil [1], [2]. Salah satu parameter penting dalam kualitas daya listrik adalah kestabilan tegangan pada jaringan distribusi. Tegangan yang mengalami penurunan melebihi batas standar dapat menyebabkan gangguan operasi peralatan listrik, menurunkan efisiensi sistem, serta meningkatkan kerugian energi pada jaringan distribusi [3], [4].

Permasalahan drop tegangan pada sistem distribusi tenaga listrik umumnya disebabkan oleh panjang saluran distribusi, impedansi penghantar, besarnya arus beban, serta tingginya kebutuhan daya reaktif akibat penggunaan beban induktif [5]. Beban induktif seperti motor listrik, transformator, dan peralatan industri membutuhkan suplai daya reaktif yang besar sehingga menyebabkan faktor daya menjadi rendah.

Kondisi ini mengakibatkan arus sistem meningkat dan memicu rugi-rugi daya serta penurunan tegangan pada sisi beban [2], [3]. Selain itu, kondisi tegangan jatuh yang tidak terkendali juga dapat mempercepat penurunan kualitas sistem distribusi dan mempengaruhi kontinuitas pelayanan tenaga listrik kepada konsumen [4], [5].

Salah satu metode yang umum digunakan untuk mengatasi permasalahan drop tegangan adalah pemasangan kapasitor bank sebagai kompensasi daya reaktif [6]. Kapasitor bank bekerja dengan menyuplai daya reaktif secara lokal pada sisi beban sehingga mampu mengurangi kebutuhan daya reaktif dari sumber utama. Dengan berkurangnya aliran daya reaktif pada jaringan distribusi, arus sistem menjadi lebih kecil, rugi-rugi daya menurun, serta profil tegangan menjadi lebih baik [7], [8]. Pemasangan kapasitor bank juga terbukti mampu meningkatkan faktor daya sistem sehingga efisiensi penyaluran energi listrik menjadi lebih optimal [9], [10].

Beberapa penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa penggunaan kapasitor bank efektif dalam memperbaiki profil tegangan pada jaringan distribusi 20 kV. Penelitian yang dilakukan oleh Siregar dkk. menunjukkan bahwa penempatan kapasitor bank pada sistem distribusi berbasis ETAP mampu meningkatkan kestabilan tegangan sekaligus mendukung efisiensi sistem tenaga listrik [11]. Penelitian lain oleh Hsb dkk. juga membuktikan bahwa optimasi kapasitor bank pada sistem distribusi 6-bus dapat memperbaiki profil tegangan secara signifikan [12]. Selain itu, penggunaan perangkat simulasi berbasis ETAP mempermudah proses analisis sistem tenaga karena mampu menampilkan kondisi tegangan, aliran daya, dan rugi-rugi daya secara detail [13].

Pemanfaatan simulasi dalam analisis sistem tenaga listrik menjadi sangat penting karena mampu meminimalkan kesalahan perhitungan manual serta mempercepat evaluasi sistem distribusi [14], [15]. Analisis aliran daya menggunakan simulasi dapat membantu menentukan kondisi tegangan pada setiap bus, menghitung rugi-rugi daya, dan mengevaluasi kebutuhan kompensasi daya reaktif secara lebih akurat [16]. Simulasi juga memungkinkan pengujian berbagai skenario perbaikan sistem tanpa harus melakukan implementasi langsung di lapangan sehingga lebih efisien dari sisi waktu maupun biaya [17].

Meskipun berbagai penelitian mengenai kapasitor bank telah banyak dilakukan, sebagian besar penelitian hanya berfokus pada hasil optimasi tegangan tanpa melakukan validasi mendalam terhadap kesesuaian hasil simulasi dengan perhitungan teoritis [18], [19]. Selain itu, masih ditemukan perbedaan hasil simulasi akibat konfigurasi model, kesalahan parameter, maupun pengaturan kapasitor bank yang menyebabkan terjadinya over-compensation pada sistem distribusi [20]. Kondisi over-compensation dapat menyebabkan faktor daya berubah menjadi leading dan berpotensi menimbulkan masalah baru seperti kenaikan tegangan berlebih, resonansi harmonisa, serta ketidakstabilan sistem tenaga listrik [17], [20].

Berdasarkan permasalahan tersebut, penelitian ini dilakukan untuk memvalidasi dan membandingkan hasil simulasi kapasitor bank pada transformator 20 kV menggunakan perangkat simulasi ETAP 19.0.1. Penelitian ini berfokus pada analisis pengaruh kapasitor bank terhadap perbaikan drop tegangan, perubahan faktor daya, serta evaluasi perbedaan hasil antara simulasi teoritis dan simulasi independen. Novelty penelitian ini terletak pada pendekatan validasi komparatif antara hasil simulasi ETAP dan perhitungan teoritis segitiga daya untuk mengidentifikasi potensi over-compensation akibat kesalahan pemodelan sistem. Dengan demikian, penelitian ini diharapkan mampu memberikan kontribusi dalam pengembangan analisis sistem distribusi tenaga listrik yang lebih akurat, efisien, dan andal.

2. Metode

Penelitian ini menggunakan metode simulasi komparatif kuantitatif untuk membandingkan hasil simulasi perbaikan drop tegangan menggunakan kapasitor bank pada sistem distribusi 20 kV. Penelitian dilakukan melalui pemodelan sistem tenaga listrik menggunakan ETAP 19.0.1 dengan mengacu pada data sistem

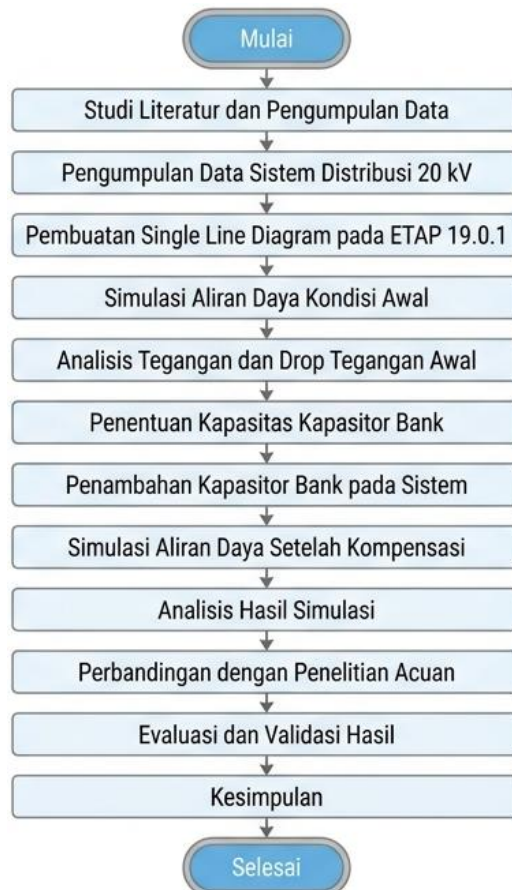
dari penelitian sebelumnya [1]. Metode ini dipilih karena mampu memberikan analisis kondisi tegangan, faktor daya, serta aliran daya secara lebih akurat sebelum implementasi dilakukan pada sistem nyata.

Tahapan penelitian dilakukan secara sistematis mulai dari pengumpulan data, pemodelan sistem, simulasi kondisi awal, penentuan kapasitas kapasitor bank, hingga analisis hasil simulasi setelah kompensasi daya reaktif diterapkan. Alur penelitian secara keseluruhan ditunjukkan pada Gambar 1.

Penelitian ini menggunakan pendekatan studi kasus pada sistem distribusi tenaga listrik 20 kV dengan konfigurasi lima bus. Seluruh parameter sistem seperti data transformator, beban, tegangan nominal, dan faktor daya awal mengacu pada data penelitian terdahulu agar hasil simulasi dapat dibandingkan secara objektif [1]. Perangkat simulasi yang digunakan adalah ETAP 19.0.1 karena memiliki kemampuan analisis sistem tenaga yang lengkap, termasuk simulasi aliran daya, analisis tegangan, dan evaluasi kompensasi daya reaktif [13].

Tahap pertama penelitian adalah pengumpulan data sistem tenaga listrik dari jurnal acuan. Data yang dikumpulkan meliputi kapasitas transformator, data beban, tegangan sistem, faktor daya awal, serta konfigurasi jaringan distribusi 20 kV. Tahap kedua adalah pembuatan single line diagram pada ETAP 19.0.1 berdasarkan parameter sistem yang telah diperoleh. Model sistem terdiri atas sumber daya, transformator, saluran distribusi, dan beban yang dihubungkan dalam konfigurasi lima bus.

Tahap ketiga dilakukan simulasi aliran daya pada kondisi awal tanpa kapasitor bank untuk mengetahui kondisi tegangan dan profil sistem sebelum dilakukan kompensasi daya reaktif. Hasil simulasi awal digunakan untuk mengidentifikasi besar drop tegangan yang terjadi pada setiap bus, khususnya pada Bus5 di sisi tegangan rendah.



Gambar 1. Diagram Alir Penelitian

Tahap berikutnya adalah penentuan kapasitas kapasitor bank yang diperlukan untuk meningkatkan faktor daya sistem dari kondisi awal menuju faktor daya target. Nilai kapasitor bank yang diperoleh kemudian dimasukkan ke dalam model sistem pada ETAP sesuai lokasi pemasangan yang telah ditentukan.

Setelah kapasitor bank ditambahkan, dilakukan simulasi ulang untuk mengetahui perubahan profil tegangan, faktor daya, serta kondisi aliran daya setelah kompensasi diterapkan. Hasil simulasi setelah pemasangan kapasitor bank kemudian dibandingkan dengan hasil penelitian acuan untuk mengetahui tingkat kesesuaian model dan pengaruh konfigurasi sistem terhadap hasil simulasi.

Variabel penelitian yang digunakan dalam studi ini terdiri atas variabel bebas, variabel terikat, dan variabel kontrol. Variabel bebas meliputi kapasitas kapasitor bank, lokasi pemasangan kapasitor, dan konfigurasi pemodelan sistem pada ETAP. Variabel terikat terdiri atas tegangan bus, drop tegangan, faktor daya, dan daya reaktif sistem. Sementara itu, variabel kontrol meliputi kapasitas beban, tegangan nominal, data transformator, data beban, dan perangkat simulasi yang digunakan. Rincian variabel penelitian ditunjukkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Variabel Penelitian

Jenis Variabel	Parameter	Keterangan
Variabel Bebas	Kapasitas kapasitor bank	Nilai kapasitor bank yang digunakan dalam simulasi
Variabel Bebas	Lokasi pemasangan kapasitor	Posisi pemasangan kapasitor pada sistem distribusi
Variabel Bebas	Konfigurasi pemodelan	Pengaturan model sistem pada ETAP
Variabel Terikat	Tegangan bus	Nilai tegangan pada setiap bus sistem
Variabel Terikat	Drop tegangan	Persentase penurunan tegangan pada sistem
Variabel Terikat	Faktor daya	Kondisi faktor daya sistem sebelum dan sesudah kompensasi
Variabel Terikat	Daya reaktif sistem	Nilai daya reaktif setelah pemasangan kapasitor
Variabel Kontrol	Data transformator	Kapasitas dan impedansi transformator
Variabel Kontrol	Data beban	Besar dan karakteristik beban sistem
Variabel Kontrol	Tegangan nominal	Tegangan operasi sistem distribusi
Variabel Kontrol	Perangkat simulasi	ETAP 19.0.1

Teknik pengumpulan data dalam penelitian ini dilakukan melalui studi literatur dan dokumentasi. Studi literatur digunakan untuk memperoleh data sistem distribusi, teori kompensasi daya reaktif, serta referensi penelitian terdahulu yang berkaitan dengan drop tegangan dan kapasitor bank [3], [7], [8], [11]. Dokumentasi dilakukan dengan mencatat seluruh parameter dan hasil simulasi yang diperoleh dari ETAP 19.0.1.

Teknik analisis data dilakukan secara deskriptif kuantitatif dan komparatif. Analisis deskriptif digunakan untuk menjelaskan perubahan kondisi tegangan, faktor daya, dan daya reaktif sebelum dan sesudah pemasangan kapasitor bank. Sementara itu, analisis komparatif dilakukan dengan membandingkan hasil simulasi penelitian ini dengan hasil penelitian acuan untuk mengetahui tingkat validasi model serta pengaruh perbedaan konfigurasi sistem terhadap hasil simulasi [1], [12], [14]. Hasil analisis kemudian

digunakan untuk mengevaluasi efektivitas pemasangan kapasitor bank dalam memperbaiki profil tegangan pada sistem distribusi tenaga listrik 20 kV.

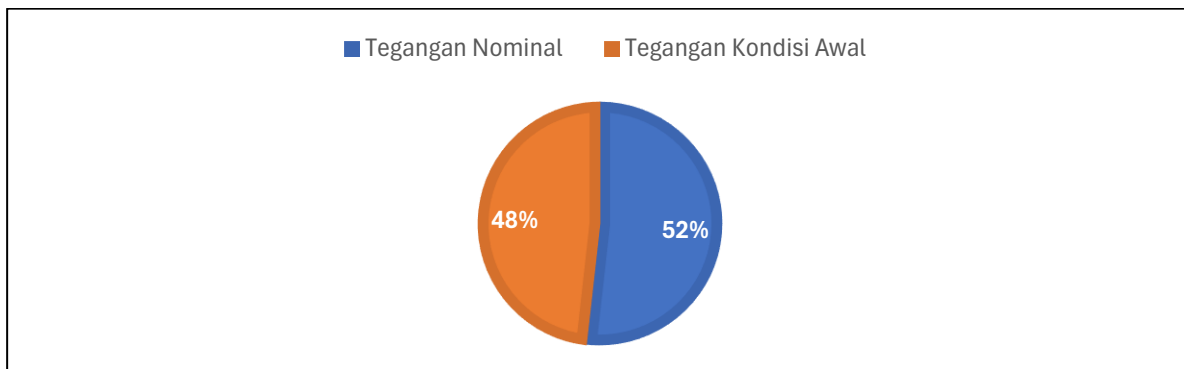
3. Hasil dan Pembahasan

Hasil simulasi aliran daya menggunakan ETAP 19.0.1 pada kondisi awal tanpa pemasangan kapasitor bank menunjukkan bahwa sistem distribusi tenaga listrik 20 kV mengalami penurunan tegangan yang cukup besar pada sisi beban. Berdasarkan hasil simulasi, tegangan pada Bus5 yang berada pada sisi tegangan rendah hanya mencapai 354 V dari tegangan nominal 380 V. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa sistem mengalami drop tegangan sebesar 6,8%, sehingga telah melampaui batas maksimum standar SUTM sebesar 5% untuk sistem distribusi radial.

Nilai drop tegangan yang tinggi menunjukkan bahwa sistem mengalami kekurangan kompensasi daya reaktif akibat dominasi beban induktif pada jaringan distribusi. Kondisi ini menyebabkan arus reaktif meningkat sehingga rugi-rugi daya dan penurunan tegangan pada saluran distribusi menjadi lebih besar. Hasil simulasi kondisi awal antara penelitian acuan dan simulasi independen menunjukkan nilai yang sama sehingga dapat dijadikan dasar validasi untuk tahap simulasi berikutnya. Perbandingan tegangan nominal dan tegangan hasil simulasi awal ditunjukkan pada Gambar 2.

Grafik pada Gambar 2 menunjukkan bahwa tegangan hasil simulasi mengalami penurunan cukup signifikan dibandingkan tegangan nominal sistem. Selisih tegangan sebesar 26 V mengindikasikan bahwa sistem distribusi memerlukan perbaikan kualitas daya untuk menjaga kestabilan tegangan pada sisi beban. Data hasil simulasi kondisi awal ditunjukkan pada Tabel 2.

Berdasarkan hasil analisis beban sistem distribusi, kapasitor bank diperlukan untuk memperbaiki faktor daya dari 0,85 lagging menjadi 0,99. Dari hasil analisis diperoleh kebutuhan kapasitor bank sebesar 3.245,36 kVar. Kapasitor bank tersebut berfungsi menyuplai daya reaktif secara lokal sehingga kebutuhan daya reaktif dari sumber utama dapat dikurangi.



Gambar 2. Grafik Perbandingan Tegangan Nominal dan Tegangan Kondisi Awal

Tabel 2. Hasil Simulasi Kondisi Awal Tanpa Kapasitor Bank

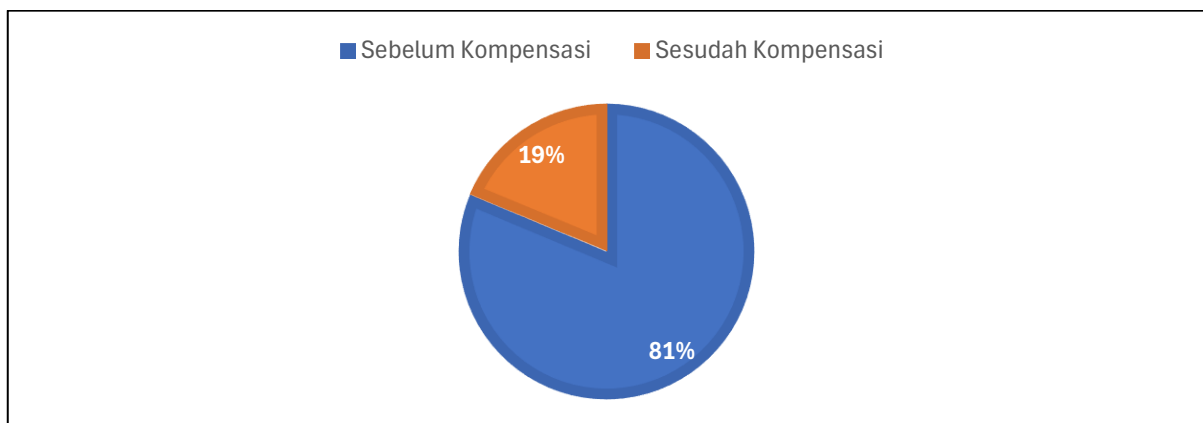
Parameter	Nilai
Tegangan Nominal Bus5	380 V
Tegangan Aktual Bus5	354 V
Drop Tegangan	6,8%
Faktor Daya Awal	0,85 Lagging
Kondisi Sistem	Belum Stabil

Pemasangan kapasitor bank memberikan pengaruh terhadap penurunan arus reaktif pada jaringan distribusi sehingga rugi-rugi daya dan drop tegangan dapat ditekan. Selain itu, perbaikan faktor daya juga meningkatkan efisiensi penyaluran daya listrik pada sistem distribusi. Perbandingan kondisi daya reaktif sebelum dan sesudah kompensasi ditunjukkan pada Gambar 3.

Grafik pada Gambar 3 menunjukkan bahwa kebutuhan daya reaktif sistem mengalami penurunan signifikan setelah pemasangan kapasitor bank. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa kompensasi daya reaktif mampu meningkatkan performa sistem distribusi dan memperbaiki kualitas tegangan pada sisi beban. Data hasil analisis kebutuhan kapasitor bank ditunjukkan pada Tabel 3.

Setelah kapasitor bank dipasang pada sistem distribusi 20 kV, hasil simulasi menunjukkan adanya peningkatan kualitas tegangan pada sisi beban. Tegangan pada Bus5 meningkat dari 354 V menjadi 371 V sehingga drop tegangan turun menjadi 2,37%. Nilai tersebut telah memenuhi standar batas maksimum drop tegangan pada sistem distribusi tenaga listrik.

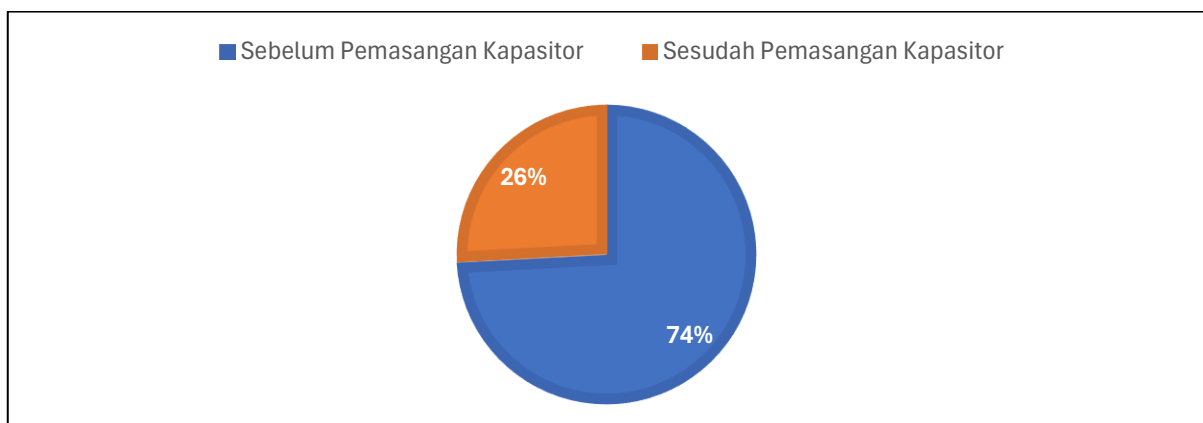
Peningkatan tegangan setelah pemasangan kapasitor bank menunjukkan bahwa kompensasi daya reaktif mampu mengurangi aliran arus reaktif pada jaringan distribusi. Kondisi tersebut menyebabkan rugi-rugi daya menjadi lebih kecil dan profil tegangan sistem menjadi lebih stabil. Perbandingan kondisi sistem sebelum dan sesudah pemasangan kapasitor bank ditunjukkan pada Gambar 4.



Gambar 3. Grafik Perbandingan Daya Reaktif Sebelum dan Sesudah Kompensasi

Tabel 3. Hasil Analisis Kebutuhan Kapasitor Bank

Parameter	Nilai
Beban Total Sistem	8.000 kVA
Faktor Daya Awal	0,85 Lagging
Faktor Daya Target	0,99
Daya Aktif Sistem	6.800 kW
Daya Reaktif Awal	4.214,26 kVAr
Daya Reaktif Setelah Perbaikan	968,90 kVAr
Kebutuhan Kapasitor Bank	3.245,36 kVAr



Gambar 4. Grafik Perbandingan Drop Tegangan Sebelum dan Sesudah Pemasangan Kapasitor Bank

Berdasarkan Gambar 4 terlihat bahwa pemasangan kapasitor bank mampu menurunkan drop tegangan secara signifikan dari 6,8% menjadi 2,37%. Penurunan ini menunjukkan bahwa kompensasi daya reaktif efektif digunakan untuk meningkatkan kualitas daya pada sistem distribusi tenaga listrik. Hasil simulasi setelah pemasangan kapasitor bank ditunjukkan pada Tabel 4.

Tabel 4. Hasil Simulasi Setelah Pemasangan Kapasitor Bank

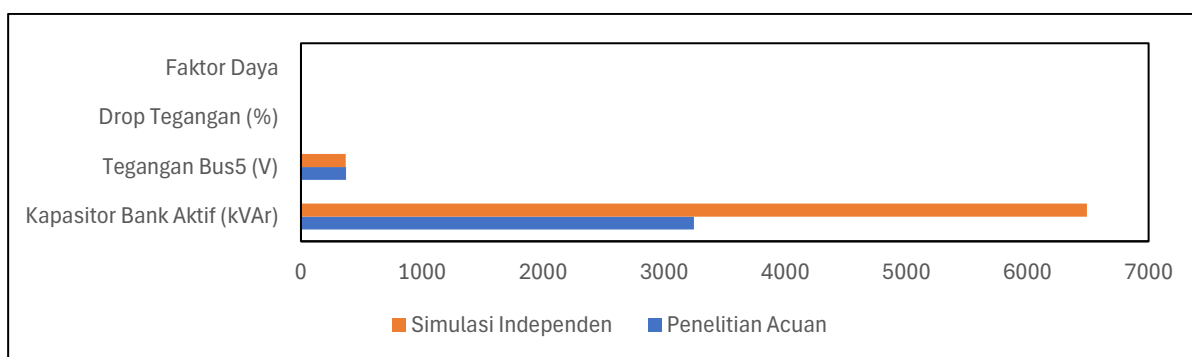
Parameter	Sebelum Kompensasi	Sesudah Kompensasi
Tegangan Bus5	354 V	371 V
Drop Tegangan	6,8%	2,37%
Faktor Daya	0,85 Lagging	0,99 Lagging
Kondisi Sistem	Tidak Stabil	Stabil

Hasil simulasi independen menunjukkan adanya perbedaan dibandingkan penelitian acuan. Pada simulasi independen, kapasitor bank aktif yang terbaca pada sistem mencapai 6.490,72 kVAr atau dua kali lebih besar dibandingkan kebutuhan teoritis. Kondisi tersebut menyebabkan sistem mengalami over-compensation sehingga faktor daya berubah menjadi leading.

Akibat over-compensation, tegangan Bus5 hanya meningkat menjadi 369 V dengan drop tegangan sebesar 2,89%. Meskipun terjadi peningkatan tegangan dibanding kondisi awal, hasil tersebut masih lebih rendah dibandingkan simulasi acuan yang menggunakan kapasitas kapasitor sesuai kebutuhan sistem. Perbandingan hasil simulasi penelitian acuan dan simulasi independen ditunjukkan pada Gambar 5.

Grafik pada Gambar 5 menunjukkan bahwa penggunaan kapasitor bank yang berlebihan tidak selalu menghasilkan performa sistem yang lebih baik. Faktor daya leading akibat over-compensation dapat menimbulkan ketidakstabilan sistem, kenaikan tegangan berlebih, dan potensi resonansi pada jaringan distribusi. Data perbandingan hasil simulasi ditunjukkan pada Tabel 5.

Secara keseluruhan, hasil penelitian menunjukkan bahwa ketelitian pemodelan sistem pada ETAP 19.0.1 sangat mempengaruhi hasil simulasi. Kesalahan konfigurasi seperti duplikasi kapasitor atau kesalahan pengaturan parameter dapat menyebabkan hasil simulasi berbeda jauh dari kondisi teoritis. Oleh karena itu, validasi model dan pengecekan konfigurasi sistem menjadi langkah penting sebelum hasil simulasi digunakan sebagai dasar pengambilan keputusan teknis pada sistem tenaga listrik.



Gambar 5. Grafik Perbandingan Hasil Simulasi Acuan dan Simulasi Independen

Tabel 5. Perbandingan Hasil Simulasi Penelitian Acuan dan Simulasi Independen

Parameter	Penelitian Acuan	Simulasi Independen
Kapasitor Bank Aktif	3.245,36 kVAr	6.490,72 kVAr
Tegangan Bus5	371 V	369 V
Drop Tegangan	2,37%	2,89%
Faktor Daya	0,99 Lagging	0,948 Leading
Kondisi Sistem	Stabil	Over-Compensation

4. Kesimpulan

Berdasarkan hasil simulasi dan analisis yang telah dilakukan menggunakan ETAP 19.0.1 pada sistem distribusi tenaga listrik 20 kV, dapat disimpulkan bahwa kondisi awal sistem tanpa pemasangan kapasitor bank mengalami drop tegangan sebesar 6,8% pada Bus5. Nilai tersebut melebihi batas maksimum standar sistem distribusi radial sebesar 5%, sehingga diperlukan perbaikan kualitas daya melalui kompensasi daya reaktif.

Hasil analisis menunjukkan bahwa kebutuhan kapasitor bank untuk meningkatkan faktor daya dari 0,85 lagging menjadi 0,99 adalah sebesar 3.245,36 kVAr. Pemasangan kapasitor bank dengan kapasitas tersebut terbukti mampu meningkatkan tegangan Bus5 dari 354 V menjadi 371 V serta menurunkan drop tegangan dari 6,8% menjadi 2,37%. Selain itu, faktor daya sistem berhasil diperbaiki menjadi 0,99 lagging sehingga kondisi sistem menjadi lebih stabil dan efisien.

Simulasi independen menunjukkan adanya perbedaan hasil akibat kapasitor bank aktif yang terbaca sebesar 6.490,72 kVAr atau dua kali lebih besar dibandingkan kebutuhan teoritis. Kondisi ini menyebabkan over-compensation sehingga faktor daya berubah menjadi 0,948 leading dan drop tegangan hanya turun menjadi 2,89%. Hasil tersebut menunjukkan bahwa penggunaan kapasitor bank yang berlebihan tidak selalu memberikan perbaikan sistem yang optimal.

Penelitian ini membuktikan bahwa akurasi pemodelan sistem pada ETAP 19.0.1 sangat mempengaruhi hasil simulasi. Kesalahan konfigurasi seperti duplikasi kapasitor, kesalahan parameter beban, maupun penempatan kapasitor yang tidak tepat dapat menghasilkan output simulasi yang berbeda dari kondisi teoritis. Oleh karena itu, proses validasi model dan verifikasi parameter sistem menjadi langkah penting sebelum hasil simulasi digunakan sebagai dasar pengambilan keputusan teknis pada sistem distribusi tenaga listrik.

Secara keseluruhan, penelitian ini berhasil memverifikasi bahwa pemasangan kapasitor bank merupakan solusi efektif untuk memperbaiki profil tegangan dan meningkatkan kualitas daya pada jaringan distribusi 20 kV apabila kapasitas dan konfigurasi pemasangannya dilakukan secara tepat.

Daftar Pustaka

- [1] A. Duta, W. Candra, M. Sandy, dan H. Akhmad, "Simulasi Perbaikan Drop Tegangan Dengan Menambahkan Capacitor Bank Pada Transformator 20 kV," *SainETIn: Jurnal Sains, Energi, Teknologi, dan Industri*, vol. 8, no. 2, pp. 77–83, 2024.
- [2] S. N. R. Nisa, S. I. Haryudo, dan A. A. Santana, "Studi Tegangan Jatuh pada Jaringan Tegangan Menengah Penyulang Sidomulyo," *Electrician: Jurnal Rekayasa dan Teknologi Elektro*, vol. 19, no. 3, pp. 383–393, 2025.
- [3] I. Darmana, A. U. Krismanto, A. Lomi, dan J. Teknik, "Implementasi Kapasitor Bank untuk Perbaikan Drop Tegangan dan Losses pada Jaringan Distribusi 20 kV di Feeder Kayu Bawang," 2017.
- [4] S. Ekanugraha dan A. B. Pulungan, "Memperbaiki Drop Tegangan dengan Simulasi Rekonfigurasi Jaringan Sistem 20 kV," *JTEIN: Jurnal Teknik Elektro Indonesia*, vol. 3, no. 1, pp. 249–256, 2022.
- [5] M. F. Malik, L. Ruslan, W. S. A. WS, dan A. Rahmadani, "Analisis Pecah Beban dan Penambahan Gardu Hubung Penyulang Tinombo terhadap Susut Teknis serta Jatuh Tegangan," *Jurnal Informatika dan Teknik Elektro Terapan*, vol. 13, no. 3S1, 2025.
- [6] P. Abidin, "Penempatan Optimal Kapasitor Bank," pp. 320–325, 2014.
- [7] A. P. Aji, "Analisis Pemasangan Kapasitor Bank sebagai Solusi untuk Mengurangi Drop Tegangan pada Penyulang Lowayu," *Uranus: Jurnal Ilmiah Teknik Elektro, Sains dan Informatika*, vol. 3, no. 2, pp. 1–31, 2025.

- [8] K. I. Toka, N. P. Agustini, dan I. B. Sulistiawati, “Perbaikan Performansi Distributed Generation (DG) Dengan Penempatan Shunt Kapasitor Bank Pada Jaringan,” *SinarFe7*, vol. 6, no. 1, pp. 28–36, 2024.
- [9] D. S. Alam, N. Busaeri, dan M. A. Risnandar, “Optimasi Pengembangan Express Feeder pada Jaringan Distribusi untuk Mengurangi Drop Voltage Menggunakan Particle Swarm Optimization,” *Fuse-Teknik Elektro*, vol. 5, no. 1, 2025.
- [10] R. S. Aman, E. Priatna, dan M. A. Risnandar, “Optimasi Sistem Distribusi melalui Penempatan Express Feeder Menggunakan Algoritma Genetika untuk Mengurangi Rugi Daya,” *Fuse-Teknik Elektro*, vol. 5, no. 2, pp. 79–88, 2025.
- [11] I. D. Siregar, Z. Tharo, dan H. Hamdani, “Analysis of Capacitor Placement in 20 kV Distribution Systems Using ETAP 19.0.1 to Support the Dedieselization Program,” *JUITECH: Jurnal Ilmiah Fakultas Teknik Universitas Quality*, vol. 8, no. 1, pp. 71–81, 2024.
- [12] M. P. Hsb, T. A. Alghazali, A. Sinuraya, dan D. J. Sinaga, “Optimasi Profil Tegangan Sistem Distribusi 6-Bus Menggunakan Kapasitor Bank Berbasis ETAP 19.0.1,” *Jurnal Ilmiah Penelitian Mahasiswa*, vol. 3, no. 6, pp. 224–234, 2025.
- [13] A. A. Firdaus dan V. A. Kusuma, *The Easiest Way to Run ETAP Software*. Surabaya: Airlangga University Press, 2023.
- [14] R. A. Kandeccing, S. Hay, S. Jie, Y. A. Koedoes, A. Lolok, dan S. N. Jaya, “Analisis Susut Daya dan Energi pada Jaringan Distribusi di Gardu Induk Kendari New Penyulang Brimob Menggunakan ETAP 19.0.1 pada Waktu Beban Puncak,” *Jurnal Fokus Elektroda*, vol. 9, no. 2, pp. 112–130, 2024.
- [15] A. W. B. Tjung, M. I. Marzuki, dan B. Y. Yulianto, “Analisa Sistem Back-Up Daya Airfield Lighting System pada Substation T1 Bandara SAMS Sepinggan dengan ETAP 19.0.1,” *Jambura Journal of Electrical and Electronics Engineering*, vol. 6, no. 1, pp. 25–31, 2024.
- [16] M. Daud, R. Kurniawan, dan A. Hasibuan, “Power Flow and Harmonics Analysis of Wind Turbine Integration into Distribution Networks,” *International Journal of Advanced Technology and Engineering Exploration*, vol. 11, no. 118, p. 1256, 2024.
- [17] R. Prastia, A. Asran, A. Hasibuan, R. Rosdiana, dan E. Ezwarsyah, “Analysis of Voltage Drop Improvement Using Transformer Insertion Method in LG-02 Receiver Lhokseumawe City,” *Applied Engineering, Innovation, and Technology*, vol. 1, no. 1, pp. 47–58, 2024.
- [18] D. Makmur, “Simulasi Optimasi Penempatan Kapasitor Bank untuk Perbaikan Drop Tegangan pada Feeder Bumiayu 07 dengan ETAP,” Tesis, Universitas Islam Sultan Agung, 2022.
- [19] M. Ilham, “Analisis Pemasangan Kapasitor Bank untuk Mengurangi Drop Tegangan pada Jaringan Distribusi 20 kV di Penyulang Singapura ULP Pasir Pangaraian PT PLN (Persero),” *SainETIn: Jurnal Sains, Energi, Teknologi, dan Industri*, vol. 9, no. 2, pp. 58–68, 2025.
- [20] I. B. Silalahi, A. Lomi, dan W. P. Muljanto, “Analisis Harmonisa pada Penyulang Geliting PT PLN Kab. Sikka akibat Integrasi PLTS Wairbleler Kapasitas 1 MWP,” *Magnetika: Jurnal Mahasiswa Teknik Elektro*, vol. 9, no. 1, pp. 39–50, 2025.