



Department of Digital Business

Journal of Artificial Intelligence and Digital Business (RIGGS)

Homepage: <https://journal.ilmudata.co.id/index.php/RIGGS>

Vol. 5 No. 2 (2026) pp: 17520-17528

P-ISSN: 2963-9298, e-ISSN: 2963-914X

Analisis Pengaruh Kenaikan Beban terhadap Profil Tegangan, Rugi Daya, dan Batas Operasi pada Sistem Distribusi IEEE 33-Bus Menggunakan ETAP

Faizal Riza Maulana

Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Tidar

faizalrizam@students.untidar.ac.id

Abstrak

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh kenaikan beban terhadap profil tegangan, rugi daya, dan batas operasi pada sistem distribusi IEEE 33-Bus menggunakan perangkat lunak ETAP dengan metode Newton-Raphson. Sistem dimodelkan berdasarkan data standar IEEE 33-Bus yang terdiri atas 33 bus dan 32 saluran radial dengan tegangan dasar 12,66 kV. Simulasi dilakukan pada lima tingkat pembebanan, yaitu 50%, 75%, 100%, 125%, dan 150% dari beban normal. Parameter yang dianalisis meliputi profil tegangan setiap bus, tegangan minimum sistem, identifikasi bus kritis, serta rugi daya aktif dan reaktif. Hasil validasi menunjukkan bahwa model yang dibangun memiliki kesesuaian dengan data referensi IEEE 33-Bus dengan selisih tegangan minimum sebesar 0,0001 pu. Peningkatan beban menyebabkan penurunan tegangan minimum dari 0,9583 pu pada pembebanan 50% menjadi 0,8634 pu pada pembebanan 150%, sedangkan rugi daya aktif meningkat dari 47,1 kW menjadi 496,4 kW. Bus 18 teridentifikasi sebagai bus paling kritis pada seluruh variasi pembebanan. Berdasarkan evaluasi batas operasi, sistem masih dapat dioperasikan hingga pembebanan 100% karena tegangan minimum tetap berada di atas batas kritis 0,90 pu. Pada pembebanan 125%, tegangan minimum turun menjadi 0,8889 pu sehingga sistem mulai memasuki kondisi kritis. Hasil penelitian menunjukkan bahwa peningkatan beban secara signifikan menurunkan kualitas profil tegangan dan meningkatkan rugi daya, sehingga diperlukan tindakan kompensasi apabila sistem akan dioperasikan di atas beban normal.

Kata Kunci: Kenaikan Beban, Profil Tegangan, Rugi Daya, Batas Operasi, IEEE 33-Bus, ETAP

1. Latar Belakang

Sistem distribusi tenaga listrik merupakan bagian akhir dari sistem tenaga listrik yang berfungsi menyalurkan energi listrik dari gardu induk menuju konsumen. Kinerja sistem distribusi sangat menentukan kualitas pelayanan tenaga listrik karena berhubungan langsung dengan kontinuitas pasokan, kualitas tegangan, serta efisiensi penyaluran daya. Pada praktiknya, jaringan distribusi primer umumnya menggunakan konfigurasi radial karena memiliki struktur yang sederhana, biaya investasi relatif rendah, serta lebih mudah dalam pengoperasian dan koordinasi sistem proteksi [1]. Meskipun demikian, konfigurasi radial memiliki kelemahan berupa rasio resistansi terhadap reaktansi (*R/X ratio*) yang relatif tinggi sehingga lebih rentan mengalami penurunan tegangan (*voltage drop*) dan peningkatan rugi daya, terutama pada saluran yang berada jauh dari gardu induk [2]. Kondisi tersebut menyebabkan kualitas tegangan pada sisi hilir jaringan menjadi lebih sulit dipertahankan ketika sistem mengalami peningkatan pembebanan.

Seiring dengan meningkatnya kebutuhan energi listrik akibat pertumbuhan penduduk, urbanisasi, perkembangan kawasan industri, serta bertambahnya penggunaan peralatan listrik modern, beban pada sistem distribusi mengalami peningkatan dari waktu ke waktu [4]. Pertumbuhan kendaraan listrik, pusat data, serta berbagai beban elektronik berdaya tinggi turut menyebabkan karakteristik pembebanan menjadi semakin dinamis. Apabila peningkatan beban tidak diimbangi dengan evaluasi kemampuan sistem distribusi, maka akan muncul berbagai permasalahan operasional, seperti *undervoltage*, *overload* pada peralatan, meningkatnya rugi daya aktif maupun reaktif, hingga menurunnya keandalan sistem secara keseluruhan [5]. Oleh karena itu, evaluasi terhadap pengaruh kenaikan beban menjadi penting untuk mengetahui batas kemampuan operasi sistem distribusi sebelum dilakukan tindakan penguatan jaringan.

Salah satu parameter utama yang digunakan untuk mengevaluasi performa sistem distribusi adalah profil tegangan. Profil tegangan menggambarkan distribusi nilai tegangan pada setiap bus sehingga dapat digunakan

untuk mengetahui kualitas penyaluran energi listrik pada seluruh jaringan. Sistem distribusi dikatakan memiliki performa yang baik apabila tegangan pada setiap *bus* tetap berada dalam batas toleransi yang diizinkan dan rugi daya dapat ditekan seminimal mungkin [3]. Penurunan profil tegangan yang berlebihan tidak hanya memengaruhi kualitas pelayanan kepada pelanggan, tetapi juga dapat mempercepat penurunan umur peralatan listrik, meningkatkan rugi-rugi energi, serta mengurangi efisiensi sistem distribusi secara keseluruhan. Oleh karena itu, analisis terhadap perubahan profil tegangan akibat kenaikan beban menjadi salah satu aspek penting dalam perencanaan maupun pengoperasian sistem tenaga listrik.

Selain profil tegangan, rugi daya juga merupakan indikator penting dalam menilai performa sistem distribusi. Rugi daya timbul akibat adanya impedansi pada penghantar sehingga sebagian energi listrik berubah menjadi energi panas selama proses penyaluran. Pada jaringan distribusi radial, peningkatan arus akibat bertambahnya beban akan meningkatkan rugi daya secara nonlinier sesuai hubungan kuadrat antara arus dan rugi daya. Kondisi tersebut menyebabkan sistem menjadi semakin tidak efisien ketika beroperasi mendekati kapasitas maksimumnya. Oleh karena itu, analisis hubungan antara peningkatan pembebanan terhadap rugi daya perlu dilakukan untuk mengetahui tingkat efisiensi sistem pada berbagai kondisi operasi [2].

Evaluasi kondisi operasi sistem distribusi umumnya dilakukan melalui analisis *steady-state* menggunakan metode *load flow analysis*. Analisis ini bertujuan untuk menentukan besarnya tegangan pada setiap *bus*, sudut fasa tegangan, aliran daya pada setiap saluran, serta rugi daya aktif maupun reaktif yang terjadi pada sistem [6]. Informasi tersebut menjadi dasar dalam mengevaluasi kualitas operasi jaringan serta menentukan tindakan perbaikan apabila terjadi penyimpangan dari kondisi operasi normal. Di antara berbagai metode numerik yang tersedia, metode *Newton-Raphson* merupakan salah satu metode yang paling banyak digunakan karena memiliki tingkat konvergensi yang cepat, akurasi tinggi, dan mampu menyelesaikan sistem persamaan nonlinier pada jaringan tenaga listrik dengan jumlah *bus* yang relatif besar [7]. Kemampuan tersebut menjadikan metode *Newton-Raphson* sesuai untuk diterapkan pada studi sistem distribusi IEEE 33-*Bus*.

Pelaksanaan analisis *load flow* saat ini banyak dilakukan menggunakan perangkat lunak ETAP karena mampu memodelkan sistem tenaga listrik secara rinci sesuai kondisi aktual di lapangan. ETAP menyediakan berbagai fasilitas analisis, mulai dari simulasi *load flow*, analisis hubung singkat, koordinasi proteksi, hingga analisis kestabilan sistem. Penggunaan perangkat lunak ini memungkinkan proses simulasi dilakukan secara lebih akurat dan efisien sehingga banyak dimanfaatkan baik pada lingkungan akademik maupun industri ketenagalistrikan [1], [5]. Oleh sebab itu, penggunaan ETAP dalam penelitian ini diharapkan mampu menghasilkan evaluasi sistem distribusi yang lebih representatif dibandingkan pendekatan simulasi berbasis perangkat lunak yang lebih sederhana.

Sistem distribusi IEEE 33-*Bus* yang diperkenalkan oleh Baran dan Wu [8] merupakan salah satu sistem uji (*benchmark*) yang paling banyak digunakan dalam penelitian sistem distribusi. Sistem ini terdiri atas 33 *bus* dan 32 saluran distribusi radial dengan tegangan dasar 12,66 kV. Karakteristik jaringan yang memiliki pembebanan tidak merata serta saluran yang cukup panjang menyebabkan sistem ini sangat sesuai digunakan untuk mengevaluasi penurunan profil tegangan, peningkatan rugi daya, maupun efektivitas berbagai metode optimasi sistem distribusi. Oleh karena itu, IEEE 33-*Bus* telah menjadi acuan dalam berbagai penelitian mengenai rekonfigurasi jaringan, optimasi kapasitor, integrasi *distributed generation*, maupun penerapan perangkat elektronika daya modern seperti *Soft Open Point* (SOP) [3].

Berbagai penelitian sebelumnya lebih banyak berfokus pada upaya peningkatan performa sistem melalui metode optimasi. Ali-Dahmane dkk. [5] berhasil menurunkan rugi daya sistem IEEE 33-*Bus* dari 210,95 kW menjadi 120,64 kW melalui kombinasi penempatan kapasitor optimal (*Optimal Capacitor Placement*) dan rekonfigurasi jaringan menggunakan ETAP. Penelitian lain oleh Siregar dkk. [9] membandingkan metode *Exhaustive Search* dan *Particle Swarm Optimization* (PSO) dalam rekonfigurasi jaringan sehingga berhasil meningkatkan tegangan minimum sistem dari 91,31% menjadi 93,78% sekaligus menurunkan rugi daya sebesar 139,6 kW. Selanjutnya, AbdelQader dan Alkhayyat [10] mengombinasikan rekonfigurasi jaringan dengan integrasi *distributed generation* menggunakan Algoritma Genetika sehingga mampu menghasilkan pengurangan rugi daya yang signifikan. Hasil-hasil penelitian tersebut menunjukkan bahwa optimasi jaringan mampu meningkatkan efisiensi sistem distribusi, namun fokus utamanya masih berada pada penerapan metode optimasi, bukan pada evaluasi batas kemampuan operasi sistem sebelum dilakukan kompensasi.

Penelitian yang dilakukan oleh Anggara dkk. [11] telah mengkaji pengaruh perubahan pembebanan terhadap profil tegangan pada sistem distribusi IEEE 33-*Bus* menggunakan MATLAB/PSAT dengan metode *Newton-Raphson*. Penelitian tersebut berhasil menunjukkan adanya hubungan antara peningkatan pembebanan dan penurunan tegangan sistem. Namun demikian, penelitian tersebut masih menggunakan perangkat lunak berbasis akademik serta mengacu pada standar IEC 60038 sehingga belum menggambarkan evaluasi sistem

menggunakan perangkat lunak yang umum diterapkan di lingkungan industri ketenagalistrikan, seperti ETAP. Selain itu, penelitian tersebut belum mengevaluasi secara komprehensif hubungan antara kenaikan beban terhadap profil tegangan, rugi daya, serta batas operasi sistem berdasarkan kriteria tegangan minimum.

Berdasarkan kajian terhadap penelitian terdahulu, masih terdapat kesenjangan penelitian (*research gap*) berupa belum adanya kajian yang secara khusus mengevaluasi pengaruh variasi tingkat pembebanan terhadap profil tegangan, rugi daya aktif, rugi daya reaktif, serta batas maksimum operasi sistem distribusi IEEE 33-Bus menggunakan ETAP dengan mengacu pada standar SPLN D3.002-1:2007 [12]. Sebagian besar penelitian sebelumnya lebih menitikberatkan pada optimasi jaringan setelah sistem mengalami penurunan performa, sedangkan informasi mengenai batas kemampuan operasi sistem sebelum dilakukan tindakan kompensasi masih terbatas. Padahal, informasi tersebut sangat penting sebagai dasar dalam perencanaan kapasitas jaringan maupun pengambilan keputusan terkait kebutuhan rekonfigurasi jaringan, pemasangan kapasitor, ataupun integrasi *distributed generation*.

Berdasarkan kesenjangan tersebut, penelitian ini memiliki kebaruan (*novelty*) berupa penyajian evaluasi menyeluruh mengenai pengaruh kenaikan pembebanan terhadap profil tegangan, rugi daya, dan batas operasi sistem distribusi IEEE 33-Bus menggunakan ETAP dengan metode *Newton-Raphson*. Analisis dilakukan pada lima tingkat pembebanan, yaitu 50%, 75%, 100%, 125%, dan 150% dari beban normal sehingga perubahan karakteristik sistem dapat diamati secara bertahap. Selain mengevaluasi perubahan profil tegangan dan rugi daya, penelitian ini juga mengidentifikasi bus paling kritis pada setiap tingkat pembebanan serta menentukan batas maksimum operasi sistem berdasarkan nilai tegangan minimum sesuai kriteria SPLN D3.002-1:2007. Hasil penelitian diharapkan dapat menjadi acuan dalam evaluasi kemampuan operasi sistem distribusi radial sekaligus memberikan dasar teknis bagi pengembangan strategi peningkatan keandalan dan efisiensi sistem distribusi tenaga listrik.

2. Metode Penelitian

2.1 Objek Penelitian

Objek penelitian menggunakan sistem distribusi radial IEEE 33-Bus yang terdiri atas 33 bus dan 32 saluran distribusi dengan tegangan nominal 12,66 kV. Data sistem yang digunakan merupakan data standar IEEE 33-Bus yang memiliki total beban aktif sebesar 3.715 kW dan beban reaktif sebesar 2.300 kVAr. Seluruh parameter saluran berupa resistansi, reaktansi, serta data pembebanan setiap bus dimasukkan ke dalam model simulasi tanpa dilakukan perubahan konfigurasi jaringan sehingga kondisi awal sistem tetap mengacu pada sistem referensi. Model ini dipilih karena telah banyak digunakan sebagai sistem uji (*benchmark*) dalam penelitian analisis aliran daya dan evaluasi performa jaringan distribusi radial [13].

2.2 Pemodelan Sistem

Pemodelan sistem dilakukan menggunakan perangkat lunak ETAP. Seluruh komponen pada sistem dimodelkan berdasarkan konfigurasi asli IEEE 33-Bus yang terdiri atas sebuah *infinite bus* pada Bus 1 sebagai sumber utama bertegangan 12,66 kV, 32 *impedance element* yang merepresentasikan saluran distribusi sesuai data resistansi dan reaktansi, serta *static load* pada setiap bus sesuai data pembebanan standar.

Sebelum simulasi dijalankan, seluruh data impedansi saluran, daya aktif, dan daya reaktif diverifikasi kembali agar sesuai dengan data referensi IEEE 33-Bus. Selanjutnya dilakukan pemeriksaan konektivitas jaringan untuk memastikan tidak terdapat kesalahan hubungan antarbus maupun parameter komponen yang dapat memengaruhi hasil simulasi.

Analisis aliran daya dilakukan menggunakan metode Newton-Raphson dengan toleransi konvergensi sebesar 0,0001 pu, sedangkan jumlah iterasi maksimum mengikuti pengaturan bawaan ETAP hingga solusi konvergen diperoleh. Pemilihan metode Newton-Raphson didasarkan pada kemampuan konvergensi yang cepat serta tingkat akurasi yang tinggi dalam menyelesaikan persamaan aliran daya pada sistem distribusi dengan jumlah bus yang relatif besar [6]. Keandalan metode ini turut dikonfirmasi oleh penelitian yang membandingkan hasil simulasi ETAP dengan perhitungan manual pada sistem distribusi tegangan menengah, di mana selisih yang diperoleh masih berada dalam batas toleransi yang dapat diterima (<10%) [14].

Persamaan dasar aliran daya yang diselesaikan adalah:

$$P_i = V_i \sum_{k=1}^n V_k (G_{ik} \cos \theta_{ik} + B_{ik} \sin \theta_{ik}) \quad (1)$$

$$Q_i = V_i \sum_{k=1}^n V_k (G_{ik} \sin \theta_{ik} - B_{ik} \cos \theta_{ik}) \quad (2)$$

Dimana:

P_i = daya aktif pada bus ke- i

Q_i = daya reaktif pada bus ke- i

V_i = tegangan bus ke- i

G_{ij} = konduktansi saluran

B_{ij} = susceptansi saluran

2.3 Skenario Variasi Pembebanan

Pengujian dilakukan dengan menerapkan variasi pembebanan secara seragam terhadap seluruh bus beban menggunakan faktor pembebanan (λ). Pada setiap skenario, nilai daya aktif (P) dan daya reaktif (Q) pada setiap bus dikalikan dengan faktor pembebanan yang sama sehingga pola distribusi beban pada seluruh sistem tetap dipertahankan, sedangkan besar total pembebanan berubah sesuai skenario yang ditetapkan. Pendekatan ini memungkinkan pengaruh kenaikan beban terhadap karakteristik sistem dianalisis tanpa mengubah konfigurasi jaringan maupun parameter saluran [15].

Besarnya daya aktif dan daya reaktif pada setiap skenario dihitung menggunakan persamaan berikut.

$$P_i^{(\lambda)} = \lambda \cdot P_i^{\text{nom}}, Q_i^{(\lambda)} = \lambda \cdot Q_i^{\text{nom}} \quad (3)$$

Lima skenario pembebanan yang digunakan terdiri atas 50%, 75%, 100%, 125%, dan 150% dari kondisi beban normal. Pada setiap skenario dilakukan satu kali simulasi aliran daya hingga diperoleh kondisi konvergen, kemudian hasil simulasi disimpan untuk dianalisis dan dibandingkan antar tingkat pembebanan. Pendekatan ini bertujuan untuk mengamati perubahan performa sistem akibat peningkatan beban secara bertahap tanpa mengubah konfigurasi jaringan maupun parameter saluran.

Lima variasi pembebanan yang dianalisis ditunjukkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Skenario Variasi Pembebanan Sistem IEEE 33-Bus

Skenario	λ	Total P (kW)	Total Q (kVAr)
1	50%	1.857,5	1.150
2	75%	2.786,25	1.725
3	100%	3.715	2.300
4	125%	4.643,75	2.875
5	150%	5.572,50	3.450

2.4 Prosedur Simulasi

Proses simulasi dilakukan melalui beberapa tahapan secara berurutan. Tahap pertama adalah membangun model sistem IEEE 33-Bus pada ETAP berdasarkan data referensi. Tahap kedua adalah melakukan validasi model dengan membandingkan hasil simulasi kondisi pembebanan 100% terhadap data referensi IEEE 33-Bus. Setelah model dinyatakan valid, dilakukan simulasi pada lima variasi tingkat pembebanan.

Pada setiap simulasi dicatat nilai tegangan seluruh bus, sudut fasa tegangan, rugi daya aktif, rugi daya reaktif, serta lokasi bus dengan tegangan minimum. Seluruh hasil kemudian direkapitulasi dan dibandingkan untuk mengetahui pengaruh kenaikan beban terhadap perubahan profil tegangan, peningkatan rugi daya, serta batas operasi sistem. Pendekatan simulasi menggunakan ETAP memungkinkan evaluasi kondisi operasi sistem secara konsisten karena seluruh skenario dianalisis menggunakan parameter jaringan yang sama [15].

2.5 Parameter yang Dianalisis dan Kriteria Batas Operasi

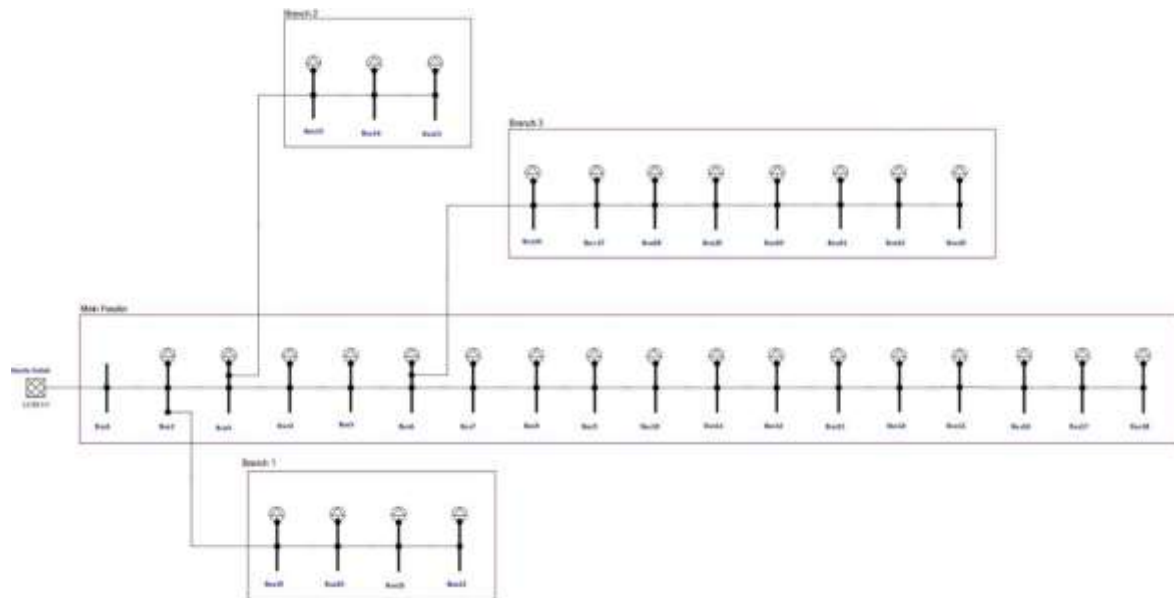
Parameter yang dianalisis pada setiap skenario meliputi profil tegangan seluruh bus (pu), tegangan minimum sistem, identifikasi bus kritis, total rugi daya aktif (kW), dan total rugi daya reaktif (kVAr). Rugi daya pada setiap saluran dihitung menggunakan persamaan:

$$P_{\text{loss}} = \sum_{ij} I_{ij}^2 \cdot R_{ij}, Q_{\text{loss}} = \sum_{ij} I_{ij}^2 \cdot X_{ij} \quad (4)$$

Selanjutnya dilakukan evaluasi terhadap batas operasi sistem berdasarkan nilai tegangan minimum yang diperoleh pada setiap skenario pembebanan. Kriteria operasi ditetapkan menjadi tiga kondisi, yaitu kondisi normal apabila tegangan minimum berada di atas 0,95 pu, kondisi peringatan apabila berada pada rentang 0,90–0,95 pu, serta kondisi kritis apabila tegangan minimum berada di bawah 0,90 pu. Batas 0,95 pu mengacu pada toleransi tegangan sebesar $\pm 5\%$ sesuai SPLN D3.002-1:2007, sedangkan batas 0,90 pu digunakan sebagai batas minimum operasi sistem distribusi berdasarkan penelitian-penelitian IEEE 33-Bus terbaru. Hasil evaluasi tersebut digunakan untuk menentukan batas maksimum pengoperasian sistem sebelum diperlukan tindakan kompensasi, seperti rekonfigurasi jaringan, pemasangan kapasitor, maupun integrasi *distributed generation*.

3. Hasil dan Diskusi

3.1 Validasi Model IEEE 33-Bus



Gambar 1. Single Line Diagram Sistem

Validasi model dilakukan dengan membandingkan hasil simulasi sistem distribusi IEEE 33-Bus pada kondisi pembebanan 100% terhadap data referensi yang dikembangkan oleh Baran dan Wu [8]. Tahapan ini bertujuan untuk memastikan bahwa model yang dibangun pada perangkat lunak ETAP telah mampu merepresentasikan karakteristik sistem distribusi standar sehingga hasil simulasi pada variasi pembebanan berikutnya dapat dipercaya. Parameter yang digunakan sebagai indikator validasi meliputi tegangan minimum sistem, lokasi bus kritis, dan total rugi daya aktif.

Tabel 2. Hasil Validasi Pemodelan Sistem IEEE 33-Bus

Parameter	Nilai Referensi	Hasil Simulasi	Selisih	Status
Tegangan minimum (pu)	0,9131	0,9130	0,0001	Valid
Bus kritis	Bus 18	Bus 18	–	Valid
Rugi daya aktif (kW)	202,7	202,7	0,0	Valid

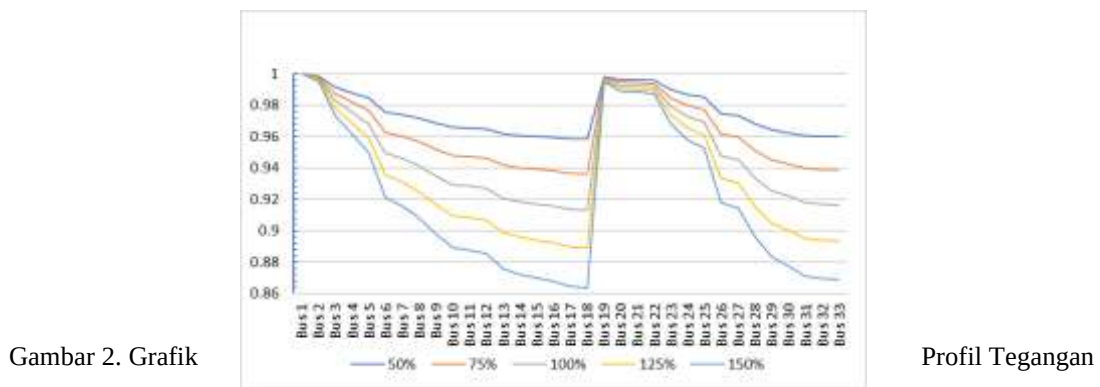
Berdasarkan hasil pada Tabel 2, tegangan minimum sistem yang diperoleh melalui simulasi sebesar 0,9130 pu dengan lokasi tegangan terendah berada pada Bus 18. Nilai tersebut hanya memiliki selisih sebesar

0,0001 pu dibandingkan data referensi sehingga tingkat kesalahan yang dihasilkan dapat dianggap sangat kecil. Selain itu, nilai rugi daya aktif yang diperoleh juga identik dengan data referensi, yaitu sebesar 202,7 kW. Hasil ini menunjukkan bahwa seluruh parameter jaringan, mulai dari impedansi saluran, konfigurasi jaringan, hingga data pembebanan telah dimodelkan dengan benar pada ETAP.

Kesesuaian hasil simulasi dengan data referensi menunjukkan bahwa metode *Newton-Raphson* yang diterapkan pada ETAP mampu menghasilkan solusi *load flow* yang konsisten terhadap sistem IEEE 33-Bus. Akurasi tersebut menjadi indikator bahwa model simulasi telah memenuhi syarat untuk digunakan dalam evaluasi pengaruh variasi pembebanan terhadap profil tegangan, rugi daya, serta batas operasi sistem.

Keberhasilan proses validasi juga memperkuat bahwa seluruh perubahan karakteristik sistem yang diamati pada tahap berikutnya benar-benar disebabkan oleh variasi tingkat pembebanan, bukan akibat kesalahan pemodelan maupun konfigurasi jaringan. Dengan demikian, hasil analisis yang diperoleh memiliki tingkat keandalan yang baik untuk dijadikan dasar evaluasi performa sistem distribusi radial.

3.2 Pengaruh Variasi Pembebanan terhadap Profil Tegangan.



Profil tegangan dianalisis melalui lima skenario pembebanan, yaitu 50%, 75%, 100%, 125%, dan 150% dari kondisi beban normal. Evaluasi dilakukan terhadap tegangan minimum sistem, lokasi bus kritis, serta kategori kondisi operasi berdasarkan batas tegangan yang telah ditetapkan.

Tabel 3. Hasil Simulasi Profil Tegangan Minimum

Skenario	λ	$V_{\min}(\%)$	$V_{\min}(\text{pu})$	Bus Kritis	Status
1	50%	95,83	0,9583	Bus 18	Normal
2	75%	93,6	0,936	Bus 18	Peringatan
3	100%	91,30	0,9130	Bus 18	Peringatan
4	125%	88,891	0,8889	Bus 18	Kritis
5	150%	86,344	0,8634	Bus 18	Sangat Kritis

Hasil simulasi menunjukkan bahwa peningkatan pembebanan menyebabkan penurunan profil tegangan secara bertahap pada seluruh sistem distribusi. Pada kondisi pembebanan 50%, tegangan minimum masih berada pada nilai 0,9583 pu sehingga seluruh sistem masih memenuhi batas tegangan normal. Ketika beban meningkat menjadi 75% dan 100%, tegangan minimum turun menjadi 0,9360 pu dan 0,9130 pu. Meskipun masih berada di atas batas kritis 0,90 pu, kondisi tersebut menunjukkan bahwa sistem telah memasuki zona peringatan sehingga kualitas tegangan mulai mengalami penurunan.

Pada pembebanan 125%, tegangan minimum turun menjadi 0,8889 pu sehingga telah melewati batas minimum operasi. Kondisi ini menunjukkan bahwa sistem mulai mengalami *undervoltage* dan berpotensi mengganggu kualitas penyaluran daya apabila tetap dioperasikan tanpa tindakan kompensasi. Ketika pembebanan kembali dinaikkan hingga 150%, tegangan minimum semakin turun menjadi 0,8634 pu sehingga kondisi sistem dikategorikan sangat kritis.

Penurunan tegangan tersebut disebabkan oleh meningkatnya arus yang mengalir pada saluran distribusi akibat kenaikan beban. Semakin besar arus yang mengalir, semakin besar pula nilai *voltage drop* yang terjadi pada

impedansi saluran. Karakteristik ini sesuai dengan sifat jaringan distribusi radial yang memiliki rasio resistansi terhadap reaktansi relatif tinggi sehingga penurunan tegangan semakin signifikan pada bagian ujung jaringan.

Hasil simulasi juga menunjukkan bahwa *Bus 18* secara konsisten menjadi *bus* dengan tegangan terendah pada seluruh variasi pembebanan. Kondisi tersebut disebabkan oleh posisi *Bus 18* yang berada pada bagian hilir jaringan sehingga mengalami akumulasi impedansi dari seluruh saluran sebelumnya. Konsistensi lokasi *bus* kritis ini mengindikasikan bahwa pola distribusi daya sistem tidak berubah selama simulasi, sedangkan besarnya penurunan tegangan dipengaruhi langsung oleh peningkatan pembebanan.

Secara keseluruhan, hasil penelitian menunjukkan bahwa profil tegangan memiliki hubungan berbanding terbalik dengan tingkat pembebanan. Semakin besar beban yang dilayani sistem, semakin rendah tegangan yang diterima pada sisi hilir jaringan. Oleh karena itu, pengendalian tingkat pembebanan maupun penerapan kompensasi daya reaktif menjadi faktor penting untuk menjaga kualitas tegangan pada sistem distribusi.

3.3 Pengaruh Variasi Pembebanan terhadap Rugi Daya

Total rugi daya aktif dan reaktif sistem pada setiap tingkat pembebanan ditunjukkan pada Tabel 4.

Tabel 4. Hasil Simulasi Perubahan Beban

Skenario	λ	P_{loss} (kW)	Q_{loss} (kVAr)
1	50%	47,1	31,3
2	75%	109,8	73,1
3	100%	202,7	135,1
4	125%	329,9	220,1
5	150%	496,4	331,4

Tabel 4 memperlihatkan bahwa peningkatan pembebanan menyebabkan kenaikan rugi daya aktif maupun rugi daya reaktif secara signifikan. Pada kondisi pembebanan 50%, rugi daya aktif hanya sebesar 47,1 kW, sedangkan pada pembebanan normal meningkat menjadi 202,7 kW. Ketika pembebanan dinaikkan hingga 150%, rugi daya aktif mencapai 496,4 kW atau lebih dari dua kali lipat dibandingkan kondisi normal.

Peningkatan rugi daya tersebut menunjukkan kecenderungan nonlinier. Secara teoritis, rugi daya aktif mengikuti persamaan $P_{\text{loss}} = I^2 R$, sehingga sedikit peningkatan arus akibat kenaikan beban dapat menghasilkan peningkatan rugi daya yang jauh lebih besar. Fenomena ini menjelaskan mengapa laju kenaikan rugi daya menjadi semakin tinggi ketika sistem mendekati kondisi pembebanan maksimum.

Rugi daya reaktif juga menunjukkan pola peningkatan yang serupa, yaitu dari 31,3 kVAr pada pembebanan 50% menjadi 331,4 kVAr pada pembebanan 150%. Meningkatnya rugi daya reaktif mengindikasikan bahwa kebutuhan daya reaktif sistem semakin besar sehingga kemampuan sistem dalam mempertahankan profil tegangan menjadi semakin menurun.

Dari hasil tersebut dapat disimpulkan bahwa kenaikan pembebanan tidak hanya memengaruhi kualitas tegangan, tetapi juga menurunkan efisiensi penyaluran energi listrik. Semakin besar rugi daya yang terjadi, semakin besar pula energi yang hilang selama proses distribusi sehingga biaya operasi sistem menjadi lebih tinggi. Oleh karena itu, diperlukan strategi pengurangan rugi daya, seperti rekonfigurasi jaringan, pemasangan kapasitor, maupun integrasi *distributed generation* agar efisiensi sistem tetap terjaga.

3.4 Penentuan Batas Operasi Sistem

Batas operasi sistem ditentukan berdasarkan dua kriteria tegangan, yaitu 0,95 pu sebagai batas peringatan dan 0,90 pu sebagai batas kritis minimum pengoperasian. Hasil penentuan batas operasi sistem ditunjukkan pada Tabel 5.

Tabel 5. Hasil Evaluasi Batas Operasi Sistem

Skenario	λ	V_{min} (pu)	P_{loss} (kW)	Kategori
1	50%	0,9583	47,1	Normal
2	75%	0,936	109,8	Peringatan
3	100%	0,9130	202,7	Peringatan
4	125%	0,8889	329,9	Kritis
5	150%	0,8634	496,4	Sangat Kritis

Berdasarkan Tabel 5, sistem masih berada pada kondisi normal ketika pembebanan sebesar 50%. Pada pembebanan 75% dan 100%, sistem mulai memasuki kategori peringatan karena tegangan minimum telah berada di bawah 0,95 pu, meskipun masih berada di atas batas minimum operasi sebesar 0,90 pu. Kondisi ini menunjukkan

bahwa sistem masih dapat dioperasikan, tetapi memiliki margin operasi yang semakin kecil terhadap terjadinya *undervoltage*.

Pada pembebanan 125%, tegangan minimum turun menjadi 0,8889 pu sehingga sistem memasuki kondisi kritis. Penurunan ini menunjukkan bahwa kemampuan sistem dalam mempertahankan profil tegangan telah melampaui batas operasi yang direkomendasikan. Ketika pembebanan ditingkatkan hingga 150%, kondisi sistem semakin memburuk dengan tegangan minimum hanya sebesar 0,8634 pu dan rugi daya aktif meningkat hingga 496,4 kW.

Hasil tersebut menunjukkan bahwa peningkatan pembebanan menyebabkan dua dampak utama secara bersamaan, yaitu penurunan kualitas tegangan dan peningkatan rugi daya. Kedua parameter tersebut saling berkaitan karena semakin besar arus yang mengalir pada saluran distribusi, semakin besar pula rugi daya yang terjadi serta semakin besar penurunan tegangan pada ujung jaringan.

Berdasarkan hasil evaluasi tersebut, batas operasi maksimum sistem distribusi IEEE 33-Bus tanpa kompensasi ditetapkan pada tingkat pembebanan 100%. Meskipun kondisi tersebut telah memasuki kategori peringatan, sistem masih memenuhi batas minimum operasi sebesar 0,90 pu. Apabila pembebanan melebihi kondisi normal, diperlukan tindakan kompensasi seperti rekonfigurasi jaringan, pemasangan kapasitor, maupun integrasi *distributed generation* agar sistem tetap mampu mempertahankan kualitas tegangan serta mengurangi rugi daya selama proses penyaluran energi listrik.

4. Kesimpulan

Berdasarkan simulasi aliran daya sistem distribusi IEEE 33-Bus yang dilakukan dengan perangkat lunak ETAP, menunjukkan terdapatnya penurunan profil tegangan minimum turun dari 0,9583 pu menjadi 0,8634 pu. Lalu, bus 18 teridentifikasi menjadi titik paling kritis pada setiap skenario pembebanan disebabkan karena posisi bus 18 terdapat pada ujung jalur utama yang menjadi titik di mana impedansi berkumulatif. Selain itu, seiring dengan peningkatan beban, total rugi daya aktif dan rugi daya reaktif ikut meningkat secara nonlinier. Rugi daya aktif mengalami peningkatan yang signifikan dari 47,1 kW pada pembebanan 50% menjadi 496,4 kW pada pembebanan 150%, yang diiringi dengan lonjakan rugi daya reaktif dari 31,3 kVAr menjadi 331,4 kVAr. Hal tersebut membuktikan semakin tinggi pembebanan pada sistem distribusi maka degradasi efisiensi sistem akan menjadi semakin signifikan. Tinjauan dari penelitian yang dilakukan memberikan kriteria kelayakan tegangan, batas maksimum operasi sistem distribusi IEEE 33-Bus tanpa kompensasi ditetapkan pada tingkat pembebanan normal, mengingat tegangan minimumnya masih berada di atas ambang batas peringatan kritis 0,90 pu. Namun, pada saat beban dinaikkan sebesar 125%, sistem dipastikan masuk ke dalam kondisi kritis dikarenakan jatuhnya tegangan ke angka 0,8889 pu, dan berlanjut hingga tingkat pembebanan 150%. Oleh karena itu, seiring peningkatan beban melebihi kondisi normal perlu dilakukan tindakan intervensi seperti rekonfigurasi jaringan, penambahan kapasitor, dan integrasi *distributed*.

Referensi

- [1] S. Ikram, K. Rehman, M. Altamash, and J. Miraj, "Design of Radial Distribution System to Study Load-Flow and Short Circuit Analysis Using ETAP Software," *Pakistan Journal of Engineering and Technology*, vol. 7, no. 1, pp. 42-49, April 2024. doi: [10.51846/vol7iss01pp42-49](https://doi.org/10.51846/vol7iss01pp42-49)
- [2] S. W. Mathenge, E. T. Mharakurwa, and L. Mogaka, "Voltage enhancement and loss minimization in a radial network through optimal capacitor sizing and placement based on Crow Search Algorithm," *Energy Reports*, vol. 12, pp. 4953-4965, November 2024. doi: [10.1016/j.egyrs.2024.10.062](https://doi.org/10.1016/j.egyrs.2024.10.062)
- [3] M. R. Behbahani and A. Jalilian, "Optimal operation of soft open point devices and distribution network reconfiguration in a harmonically polluted distribution network," *Electric Power Systems Research*, vol. 237, p. 110967, 2024. doi: [10.1016/j.epsr.2024.110967](https://doi.org/10.1016/j.epsr.2024.110967)
- [4] T. Suresh, V. A. Shah, A. Shukla, and M. L. Kolhe, "Placement of EV Charging Stations in Reconfigured IEEE 33 Bus Distribution Network," in *Power, Energy and Electrical Engineering*, M. Deng, Ed. *IOS Press*, 2024, pp. 269-279. doi: [10.3233/ATDE240327](https://doi.org/10.3233/ATDE240327)
- [5] M. Ali-Dahmane, F. Benhamida, R. Bouddou, and A. Zeggai, "Combined Optimal Capacitor Placement and Network Reconfiguration in A Distribution Power System for Load Flow Analysis Using ETAP," *Przeegląd Elektrotechniczny*, vol. 99, no. 9, pp. 94-98, September 2023. doi: [10.15199/48.2023.09.17](https://doi.org/10.15199/48.2023.09.17)
- [6] A. C. Gunawan, Y. Simamora, Syaifullah, and Y. Batubara, "Simulasi Pembelajaran Analisis Aliran Daya Metode Newton-Raphson Berbasis ETAP Pada Perkuliahan Sistem Tenaga Listrik," *Jurnal TIK dalam Pendidikan*, vol. 12, no. 1, pp. 20-28, Juni 2025. doi: [10.24114/jtikp.v12i1.67285](https://doi.org/10.24114/jtikp.v12i1.67285)
- [7] U. I. Ukut, N. Okpura, and P. O. Tim, "The IEEE 33 Bus Distribution System Load Flow Analysis Using Newton Raphson Method," *Journal of Multidisciplinary Engineering Science and Technology (JMEST)*, vol. 10, no. 3, pp. 16039-16046, March 2023.
- [8] M. E. Baran and F. F. Wu, "Network reconfiguration in distribution systems for loss reduction and load balancing," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 4, no. 2, pp. 1401-1407, April 1989. doi: [10.1109/61.25627](https://doi.org/10.1109/61.25627)
- [9] Y. Siregar, T. S. J. Tambun, S. P. Panjaitan, K. Tanjung, and S. Yana, "Distribution network reconfiguration utilizing the particle swarm optimization algorithm and exhaustive search methods," *Bulletin of Electrical Engineering and Informatics*, vol. 13, no. 2, pp. 821-831, April 2024. doi: [10.11591/eei.v13i2.6206](https://doi.org/10.11591/eei.v13i2.6206)

- [10] D. A. Abdelqader and M. T. Alkhayyat, "Power loss minimization of an IEEE 33 bus radial distribution grid using system reconfiguration with genetic algorithm," *Diagnostyka*, vol. 26, no. 1, pp. 1-12, January 2025. doi: [10.29354/diag/197296](https://doi.org/10.29354/diag/197296)
- [11] D. Anggara, Danial, and Z. Abidin, "Analysis of the Effect of Increasing Load on Voltage Profile in Electric Power Distribution System," *Action Research Literate*, vol. 9, no. 9, pp. 2095–2103, September 2025. doi: [10.46799/ar.v9i9.3033](https://doi.org/10.46799/ar.v9i9.3033)
- [12] PT PLN (Persero), SPLN D3.002-1:2007: Kriteria Desain Enjinering Konstruksi Jaringan Distribusi Tenaga Listrik, Jakarta, Indonesia, 2007.
- [13] I. K. Winarta, E. H. Harun, and J. D. Giu, "Studi Susut Daya Jaringan Distribusi Primer Area Luwuk melalui Simulasi Aliran Daya Menggunakan Metode Newton Raphson," *Transmisi: Jurnal Ilmiah Teknik Elektro*, vol. 23, no. 4, pp. 125–133, 2021. doi: 10.14710/transmisi.23.4.125-133.
- [14] Y. Patasik, A. R. Sultan, A. R. Idris, and A. Rahmadani, "Analisis Pola Operasi Jaringan 20 kV Pasca Beroperasinya Gardu Induk Molibagu di PLN UP3 Kotamobagu," *JITET (Jurnal Informatika dan Teknik Elektro Terapan)*, vol. 13, no. 3, pp. 459–469, 2024. doi: 10.23960/jitet.v13i3.6880
- [15] I. Fauziah, M. N. Ulumudin, and M. H. I. Hajar, "Analisis Pengaruh Kapasitor Bank pada Jaringan IEEE 34 dengan Metode Newton Raphson dan Fast Decoupled," *Jurnal Teknologi Elektro*, vol. 16, no. 3, 2025. doi: 10.22441/jte.2025.v16i3.007.
