

SIMULASI PEMBELAJARAN ANALISIS ALIRAN DAYA METODE NEWTON-RAPHSON BERBASIS ETAP PADA PERKULIAHAN SISTEM TENAGA LISTRIK

Adhinda Chyntia Gunawan¹, Yoakim Simamora², Syaifullah³, Yosia Batubara⁴

^{1,2,3,4} Universitas Negeri Medan

Email Penulis: ¹adhindaachyntiaa@gmail.com

Abstrak: Analisis aliran daya (load flow) merupakan langkah penting dalam perencanaan dan operasi sistem tenaga listrik, terutama dalam memastikan kestabilan tegangan, efisiensi operasi, serta mendeteksi potensi permasalahan pada jaringan distribusi. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis aliran daya pada sistem distribusi IEEE 33 bus menggunakan metode Newton-Raphson yang diimplementasikan melalui perangkat lunak ETAP. Sistem IEEE 33 bus merupakan representasi jaringan distribusi radial yang umum digunakan sebagai standar pengujian. Metode Newton-Raphson dipilih karena kemampuannya yang tinggi dalam konvergensi cepat dan akurasi tinggi, meskipun membutuhkan perhitungan numerik kompleks. Hasil simulasi menunjukkan profil tegangan di setiap bus, arus pada masing-masing cabang, serta total rugi-rugi daya aktif dalam sistem. Evaluasi dilakukan untuk mengetahui apakah nilai tegangan berada dalam batas yang diperbolehkan ($\pm 5\%$ dari tegangan nominal) serta untuk mengidentifikasi lokasi dengan rugi-rugi daya terbesar. Dengan demikian, hasil analisis ini dapat digunakan sebagai dasar rekomendasi untuk perbaikan kualitas daya dan efisiensi sistem distribusi. Penelitian ini juga menunjukkan bahwa perangkat lunak ETAP sangat membantu dalam visualisasi dan analisis sistem distribusi secara menyeluruh dan efisien.

Kata Kunci: Aliran Daya, Newton Raphson, ETAP, Jaringan Distribusi

Abstract: Load flow analysis is a crucial step in the planning and operation of power systems, especially in ensuring voltage stability, operational efficiency, and identifying potential issues in distribution networks. This study aims to analyze power flow in the IEEE 33-bus distribution system using the Newton-Raphson method implemented through ETAP software. The IEEE 33-bus system represents a standard radial distribution network commonly used for testing and research. The Newton-Raphson method is selected due to its fast convergence and high accuracy, despite its requirement for complex numerical computations. The simulation results provide voltage profiles at each bus, current flow in each branch, and the total active power losses in the system. An evaluation is conducted to ensure that bus voltages remain within the allowable limits ($\pm 5\%$ of the nominal voltage) and to identify areas with the highest power losses. The findings serve as a basis for recommending improvements in power quality and system efficiency. This study also highlights that ETAP software is an effective tool for comprehensive and efficient visualization and analysis of distribution systems.

Keywords: Load Flow, Newton Raphson, ETAP, Distribution Network

PENDAHULUAN

Analisis aliran daya merupakan salah satu aspek fundamental dalam perencanaan dan pengoperasian sistem tenaga listrik, khususnya pada jaringan distribusi. Tujuan utama dari analisis ini adalah untuk menentukan profil tegangan, arus, serta rugi-rugi daya pada setiap komponen sistem. Metode Newton-Raphson dikenal luas dalam analisis aliran daya karena kemampuannya dalam menghasilkan solusi yang cepat dan akurat, meskipun membutuhkan proses iterasi dan komputasi yang kompleks. Sistem IEEE 33 bus sering dijadikan acuan sebagai model standar dalam pengujian performa metode aliran daya pada jaringan distribusi radial. Dalam penelitian ini, perangkat lunak ETAP digunakan untuk mensimulasikan dan menganalisis aliran daya menggunakan metode Newton-Raphson. ETAP menyediakan antarmuka yang interaktif

serta kemampuan visualisasi dan analisis sistem secara menyeluruh, sehingga memudahkan pengguna dalam memahami kondisi operasional sistem. Melalui simulasi ini, diharapkan diperoleh informasi penting mengenai stabilitas tegangan, efisiensi sistem, serta area yang mengalami rugi-rugi daya terbesar.

Ruswandi membahas analisis aliran daya pada sistem kelistrikan Sulsebarab setelah masuknya pembangkit listrik berbasis energi terbarukan, khususnya Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB). Simulasi dilakukan menggunakan perangkat lunak ETAP 16.00 dengan metode Newton-Raphson untuk mengetahui kinerja sistem di bawah kondisi normal dan kontingensi. Hasilnya menunjukkan bahwa total daya aktif dalam kondisi normal mencapai 1730,87 MW, dengan aliran daya tertinggi sebesar 171 MW dari BUS15_TLASA

ke BUS13_SGMNSA. Dibandingkan kondisi sebelum masuknya PLTB, terjadi peningkatan signifikan pada aliran daya di beberapa saluran. Meskipun daya meningkat, terdapat juga beberapa bus yang mengalami kondisi tegangan kritis dan marginal. Studi ini menunjukkan pentingnya analisis aliran daya untuk memastikan keandalan sistem setelah integrasi pembangkit energi terbarukan (Djalal et al., 2021).

Diagavane membahas penerapan algoritma genetika (GA) dalam analisis aliran daya sistem tenaga listrik. Tujuan dari analisis aliran daya adalah untuk menentukan kondisi operasi steady-state, termasuk tegangan, sudut fase, dan aliran daya aktif serta reaktif di setiap bus dan cabang. GA dipilih karena kemampuannya menjelajahi ruang solusi besar dan kompleks tanpa memerlukan turunan atau struktur matematis sistem yang lengkap. Dalam studi ini, GA diterapkan pada sistem tiga bus, dan hasilnya dibandingkan dengan metode Gauss-Seidel. Hasil menunjukkan bahwa GA menghasilkan konvergensi lebih cepat dan akurat menuju solusi global. Proses GA melibatkan seleksi, crossover, dan mutasi untuk mengembangkan populasi solusi menuju solusi terbaik. Studi ini menunjukkan bahwa GA adalah alternatif yang efisien untuk analisis aliran daya dibandingkan metode iteratif konvensional (Shrawane & Diagavane, 2013).

Makalah ini membahas perbandingan antara metode Newton-Raphson dan Algoritma Genetika dalam analisis aliran daya sistem tenaga listrik. Newton-Raphson dikenal cepat dan akurat dalam menyelesaikan masalah aliran daya, tetapi membutuhkan perhitungan kompleks seperti matriks Jacobian. Sebaliknya, Algoritma Genetika tidak memerlukan matriks tersebut karena koreksi dilakukan melalui proses evolusi generasi. Meskipun hasilnya cukup akurat, GA membutuhkan waktu komputasi jauh lebih lama dibanding Newton-Raphson. Penelitian dilakukan pada sistem 12 bus transmisi 150 kV Jawa Timur dan hasil dari kedua metode dibandingkan dari segi tegangan, daya aktif, dan daya reaktif. Newton-Raphson menyelesaikan simulasi dalam hitungan detik, sedangkan GA membutuhkan waktu hingga lebih dari 3 jam. Namun, GA tetap unggul dalam fleksibilitas dan kemampuannya menemukan solusi optimal di ruang pencarian yang luas (Emmy Hosea & Yusak Tanoto, 2004).

Bernat mengajukan perbandingan tiga metode numerik utama dalam analisis aliran daya: Gauss-Seidel, Newton-Raphson, dan Fast Decoupled. Studi dilakukan pada sistem uji IEEE

9, 30, dan 57 bus menggunakan MATLAB, dengan penilaian berdasarkan iterasi, waktu komputasi, toleransi, dan konvergensi. Hasil menunjukkan bahwa metode Newton-Raphson paling andal karena menghasilkan iterasi paling sedikit dan konvergensi tercepat. Gauss-Seidel cocok untuk sistem kecil karena kesederhanaan dan efisiensi waktu komputasinya, meski konvergensi lambat. Fast Decoupled memberikan hasil cepat, tetapi tidak stabil pada toleransi rendah dan sistem besar. Newton-Raphson unggul dalam keakuratan meski membutuhkan waktu komputasi lebih besar. Secara keseluruhan, pemilihan metode tergantung pada ukuran dan kebutuhan spesifik sistem daya (Bernat & Preece, 2019).

Makalah ini membahas penerapan metode Gauss-Seidel dalam analisis aliran daya pada sistem tenaga listrik, khususnya sistem 5-bus. Metode ini dipilih karena kesederhanaannya dan efektivitasnya dalam sistem kecil serta kemudahan pemrograman menggunakan MATLAB. Analisis dilakukan untuk menentukan tegangan, sudut tegangan, aliran daya aktif dan reaktif, serta rugi-rugi daya pada tiap bus dan saluran. Hasil menunjukkan total rugi daya aktif dan reaktif sebesar 0.0618586 MW dan 0.0403355 Mvar. Meskipun metode ini mudah dipahami, ia memiliki konvergensi lambat dan kurang akurat dibandingkan Newton-Raphson. Namun, Gauss-Seidel tetap berguna untuk sistem sederhana dan sebagai tahap awal perhitungan. Dalam konteks jaringan listrik di Afrika dan Somalia, metode ini dapat membantu memahami stabilitas sistem dan efisiensi distribusi daya. Studi ini menegaskan pentingnya analisis aliran daya dalam perencanaan dan pengoperasian sistem tenaga listrik (Hussain et al., 2024).

Qdo mempertimbangkan profil beban dalam analisis aliran daya sistem tenaga listrik. Penelitian ini menunjukkan bahwa variasi beban sepanjang waktu memengaruhi distribusi tegangan, aliran daya, dan rugi-rugi daya dalam jaringan listrik. Dengan memodelkan profil beban harian, analisis menjadi lebih realistis dan dapat meningkatkan keandalan sistem. Pendekatan ini membantu operator sistem dalam mengidentifikasi kondisi kritis dan mengoptimalkan pengoperasian jaringan. Persamaan aliran daya diselesaikan menggunakan pendekatan numerik berbasis metode iteratif. Hasil simulasi menunjukkan perubahan signifikan dalam tegangan dan aliran daya akibat fluktuasi beban. Oleh karena itu, integrasi profil beban penting untuk perencanaan dan evaluasi sistem.

Studi ini menekankan bahwa pendekatan konvensional tanpa mempertimbangkan variasi beban bisa menghasilkan hasil yang kurang akurat (Dulău & Bică, 2017).

Onah mengajukan pemodelan dan analisis kinerja aliran daya pada Gardu Induk 132/33 kV Suleja menggunakan metode Newton-Raphson dalam perangkat lunak ETAP. Studi ini bertujuan mengidentifikasi kondisi operasi tunak dan mengurangi rugi-rugi daya sistem. Hasil awal menunjukkan enam bus mengalami pelanggaran tegangan di bawah batas minimum 0,95 p.u., dengan rugi daya aktif dan reaktif mencapai 1457,5 kW dan 4425,8 kVAr. Setelah penerapan modul Optimal Capacitor Placement (OCP), terjadi peningkatan tegangan pada semua bus ke dalam rentang yang diizinkan. Selain itu, rugi-rugi daya aktif dan reaktif menurun menjadi 1408,4 kW dan 4078,6 kVAr. Hasil ini menunjukkan bahwa kompensasi kapasitor dapat meningkatkan profil tegangan dan efisiensi sistem. Oleh karena itu, metode ini terbukti efektif dalam meningkatkan kinerja jaringan transmisi sekunder (Onah, 2021).

Kaur mengajukan analisis aliran daya menggunakan perangkat lunak MATLAB/Simulink pada sistem tenaga listrik tiga bus. Metode yang digunakan termasuk Gauss-Seidel, Newton-Raphson, dan Fast Decoupled, yang masing-masing memiliki keunggulan dalam hal efisiensi, kecepatan konvergensi, dan kestabilan. Dalam studi ini, Simulink digunakan untuk memodelkan komponen seperti sumber tegangan, saluran transmisi, dan beban, yang kemudian disimulasikan untuk menentukan tegangan, aliran daya, dan rugi-rugi sistem. Simulasi dilakukan dengan pengaturan solver yang sesuai dan konfigurasi blok POWERGUI untuk mendapatkan hasil aliran daya yang akurat. Hasilnya menunjukkan bahwa model dapat merepresentasikan kondisi operasi tunak sistem secara efektif. Selain itu, simulasi juga memungkinkan integrasi sumber energi terbarukan dan analisis kondisi gangguan. Dengan antarmuka grafis yang interaktif, MATLAB/Simulink menjadi alat yang fleksibel dan kuat untuk mendukung perencanaan serta pengembangan sistem tenaga (ASA Pro, 2021).

Al-Hajri mengulas berbagai teknik solusi untuk analisis aliran daya, baik metode klasik seperti Gauss-Seidel, Newton-Raphson, dan Fast Decoupled, maupun metode rekayasa file case yg b, maupun pendekatan modern. Metode Gauss-Seidel cocok untuk sistem kecil namun memiliki kelemahan dalam konvergensi pada jaringan kompleks.

Newton-Raphson dikenal cepat dan andal, terutama dalam bentuk koordinat polar, tetapi membutuhkan perkiraan awal yang mendekati solusi. Metode Fast Decoupled mempercepat perhitungan dengan mengabaikan beberapa elemen matriks Jacobian, meski bisa gagal dalam kondisi sistem dengan rasio R/X tinggi. Ulasan ini juga membahas pendekatan baru seperti transformasi diferensial, algoritma evolusi diferensial, komputasi graf, dan teknik berbasis data. Pendekatan-pendekatan ini dirancang untuk menangani tantangan modern seperti penetrasi energi terbarukan dan sistem besar yang kompleks. Keseluruhan, makalah ini menyoroti pentingnya pengembangan metode yang adaptif terhadap dinamika sistem tenaga masa kini (Al-Hajri & Habiballah, 2022).

Fergany membahas berbagai metode load flow (LF) dalam sistem distribusi tenaga listrik, termasuk pendekatan klasik dan berbasis kecerdasan buatan. LF penting untuk analisis dan perencanaan sistem tenaga karena menentukan tegangan, arus, dan aliran daya pada kondisi tunak. Dalam sistem distribusi, tingginya rasio R/X serta penetrasi energi terbarukan menyebabkan tantangan konvergensi dan ketidakstabilan tegangan. Oleh karena itu, metode khusus seperti backward/forward sweep dan algoritma berbasis AI digunakan untuk mengatasi masalah tersebut. Studi ini mengulas literatur terkini, termasuk teknik heuristik dan machine learning. Penulis juga membahas test feeder standar seperti IEEE dan EPRI serta memberikan rekomendasi untuk pengembangan ke depan (El-Fergany, 2024).

Penelitian ini membahas tentang analisa aliran daya menggunakan metode raphson, aliran daya pada peneitian ini digunakan untuk mengevaluasi jaringa distribusi, parameter yang dievaluasi adalah tegangan tiap bus, rugi daya jaringan dan arus yang mengalir. Metode ini akan di uji coba pada sistem distribusi 52 bus.

METODE

Dalam kajian sistem tenaga listrik, bus merupakan titik atau node tempat terhubungnya satu atau lebih saluran transmisi, beban, serta unit pembangkit. Setiap bus dikaitkan dengan empat parameter utama, yaitu besar tegangan (V), sudut fase tegangan (δ), daya aktif (P), dan daya reaktif (Q). Dalam proses analisis aliran daya, dua dari empat parameter tersebut ditentukan sebagai data input, sementara dua sisanya perlu dihitung melalui penyelesaian sistem persamaan nonlinier. Klasifikasi jenis bus dilakukan berdasarkan

kombinasi dua parameter yang telah ditentukan sebelumnya. Berdasarkan hal tersebut, bus dalam sistem tenaga listrik umumnya dibedakan menjadi tiga kategori utama. Klasifikasi ini digunakan untuk memudahkan formulasi dan penyelesaian model matematis dalam studi aliran daya. Tabel 1 menyajikan pengelompokan ketiga jenis bus berdasarkan parameter yang diketahui.

Tabel 1. Klasifikasi Bus

Tipe Bus	Variabel			
	P	Q	V	δ
Slack	Unknown	Unknown	known	known
PV	known	Unknown	known	Unknown
PQ	known	known	Unknown	Unknown

Slack Bus

Bus ini digunakan sebagai bus acuan untuk memenuhi kondisi keseimbangan daya dalam sistem tenaga. Slack bus umumnya merupakan unit pembangkit yang dapat disesuaikan untuk menanggung selisih daya yang diperlukan guna memastikan keseimbangan daya tercapai [12]. Generator yang efektif pada bus ini akan menyuplai rugi-rugi daya jaringan, karena besar rugi-rugi tersebut tidak dapat diketahui sebelum perhitungan arus selesai dilakukan. Slack bus biasanya ditetapkan sebagai bus nomor 1. Parameter yang diketahui pada bus ini adalah besar tegangan ($|V|$) dan sudut fase tegangan (δ), sedangkan parameter yang tidak diketahui adalah daya aktif (P) dan daya reaktif (Q).

Generator (PV) Bus

Bus ini merupakan bus pengendali tegangan. Bus ini terhubung dengan unit pembangkit di mana daya keluaran dapat dikendalikan melalui pengaturan penggerak mula, sementara tegangan dikendalikan dengan mengatur eksitasi generator. Umumnya, terdapat batasan tertentu terhadap nilai daya reaktif yang dapat dihasilkan, bergantung pada karakteristik masing-masing mesin. Parameter yang diketahui pada jenis bus ini adalah daya aktif (P) dan besar tegangan ($|V|$), sedangkan parameter yang tidak diketahui adalah daya reaktif (Q) dan sudut fase tegangan (δ).

Load (PQ) Bus

Bus ini merupakan bus non-pembangkit yang nilainya dapat diperoleh dari data historis, hasil pengukuran, atau prediksi. Dalam sistem tenaga listrik, daya aktif dan reaktif yang disuplai ke sistem didefinisikan bernilai positif, sedangkan daya yang dikonsumsi oleh sistem didefinisikan bernilai negatif. Pemenuhan kebutuhan daya konsumen dilakukan pada jenis bus ini. Parameter

yang diketahui pada bus ini adalah daya aktif (P) dan daya reaktif (Q), sementara parameter yang tidak diketahui adalah besar tegangan ($|V|$) dan sudut fase tegangan (δ).

Metode Aliran Daya Newton Raphson

Analisis numerik yang melibatkan penyelesaian sistem persamaan aljabar simultan merupakan dasar dalam pemecahan persamaan kinerja pada analisis sistem tenaga listrik berbantuan komputer, seperti pada analisis aliran daya. Langkah pertama dalam melakukan analisis aliran daya adalah membentuk matriks admitansi Y-bus berdasarkan data input saluran transmisi dan transformator.

Untuk sistem, pendekatan Newton-Raphson lebih efektif dan lebih realistis untuk daya besar, di mana ukuran sistem menentukan jumlah iterasi yang dibutuhkan untuk menyelesaikan masalah. Persamaan aliran daya polar dibuat dengan metode ini.

Secara matematis, Untuk sistem daya yang lebih besar, pendekatan Newton-Raphson lebih praktis dan efisien. dan memiliki probabilitas divergensi yang lebih rendah dengan masalah yang tidak terkondisikan dengan baik. Tidak ada hubungan antara ukuran sistem dan jumlah iterasi yang diperlukan untuk memperoleh solusi; namun, evaluasi yang lebih fungsional diperlukan untuk setiap iterasi. Karena bus kontrol tegangan dapat mengetahui daya dan tegangan aktual, maka ekuitas aliran daya bersifat polar. Hitung aliran daya $P_i^{(k)}$ dan $Q_i^{(k)}$:

$$P_i^{(k)} = \sum_{j=1}^n |V_i| |V_j| |Y_{ij}| \cos(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j)$$

$$Q_i^{(k)} = \sum_{j=1}^n |V_i| |V_j| |Y_{ij}| \sin(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j)$$

Kemudian hitung selisih daya (*power mismatch*) :

$$\Delta P_i^{(k)} = P_i^{sch} + P_i^{(k)}$$

$$\Delta Q_i^{(k)} = Q_i^{sch} + Q_i^{(k)}$$

Lalu Gabungkan jadi vektor mismatch:

$$\Delta X = \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix}$$

Jika semua elemen $|\Delta P_i|$, $|\Delta Q_i| < \text{toleransi}$ (misalnya 0.001), maka berhenti, solusi sudah konvergen. Bangun matriks:

$$J = \begin{bmatrix} J_1 & J_2 \\ J_3 & J_4 \end{bmatrix}$$

Sesuai dengan turunan parsial dari persamaan daya P dan Q terhadap δ dan $|V|$. Kemudian pecahkan sistem persamaan linier:

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = J \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta |V| \end{bmatrix}$$

Gunakan metode numerik untuk cari $\Delta \delta$ dan $V|\Delta$.

$$\delta_i^{(k+1)} = \delta_i^{(k)} + \Delta \delta_i$$

$$|V_i|^{(k+1)} = |V_i|^{(k)} + \Delta |V_i|$$

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil

Simulasi pemodelan aliran daya dilakukan menggunakan metode Newton-Raphson dengan bantuan perangkat lunak ETAP pada sistem distribusi tenaga listrik yang telah dimodelkan. Tujuan dari simulasi ini adalah untuk menganalisis kondisi operasi sistem tenaga, termasuk tegangan pada setiap bus, aliran daya aktif dan reaktif, serta rugi-rugi daya dalam jaringan.

Model jaringan dibangun di ETAP berdasarkan data sistem yang mencakup jumlah bus, generator, transformator, dan beban. Setelah input data selesai, metode Newton-Raphson digunakan sebagai algoritma utama dalam analisis aliran daya karena keakuratannya yang tinggi dan kemampuannya menangani sistem besar serta kompleks dengan konvergensi yang cepat.

Hasil simulasi menunjukkan bahwa nilai tegangan pada sebagian besar bus berada dalam batas standar ($\pm 5\%$ dari tegangan nominal), yang menunjukkan sistem bekerja dalam kondisi normal. Namun, terdapat beberapa bus yang mengalami deviasi tegangan mendekati batas bawah, yang mengindikasikan kemungkinan adanya beban berat atau kurang optimalnya penempatan elemen kompensasi daya reaktif.

Dari segi aliran daya, terlihat distribusi daya aktif dan reaktif mengalir sesuai arah yang diharapkan, dari pusat pembangkit menuju beban. Total rugi-rugi daya aktif dalam sistem juga teridentifikasi, yang dapat digunakan sebagai dasar untuk evaluasi efisiensi sistem dan perencanaan penambahan kapasitor atau rekonfigurasi jaringan di masa depan. Tabel 2 menjelaskan tentang data bus dan impedansi saluran, sedangkan tabel 3 menjelaskan data pembebanan tiap bus.

Tabel 2. Data Saluran Jaringan Distribusi

Saluran		Impedansi	
dari	ke	R (ohm)	X (ohm)
1	2	0,092	0,047
2	3	0,493	0,251
3	4	0,366	0,184
4	5	0,381	0,194
5	6	0,819	0,707
6	7	0,187	0,619
7	8	0,711	0,235
8	9	1,030	0,740
9	10	1,044	0,740
10	11	0,197	0,065
11	12	0,374	0,124
12	13	1,468	1,155
13	14	0,542	0,713
14	15	0,591	0,526
15	16	0,746	0,545
16	17	1,289	1,721
17	18	0,732	0,574
2	19	0,164	0,156
19	20	1,504	1,355
20	21	0,409	0,478
21	22	0,708	0,937
3	23	0,451	0,308
23	24	0,898	0,709
24	25	0,896	0,711
6	26	0,203	0,103
26	27	0,284	0,145
27	28	1,059	0,934
28	29	0,804	0,701
29	30	0,507	0,258
30	31	0,974	0,963
31	32	0,310	0,362
32	33	0,341	0,530

Tabel 3. Data Pembebanan

Bus	P (kW)	Q (kVAR)
1	0	0
2	100	60
3	90	40
4	120	80
5	60	30
6	60	20
7	200	100
8	200	100
9	60	20
10	60	20
11	45	30
12	60	35
13	60	35
14	120	80
15	60	10
16	60	20
17	60	20
18	90	40
19	90	40
20	90	40
21	90	40
22	90	40
23	90	50
24	420	200
25	420	200
26	60	25
27	60	25
28	60	20

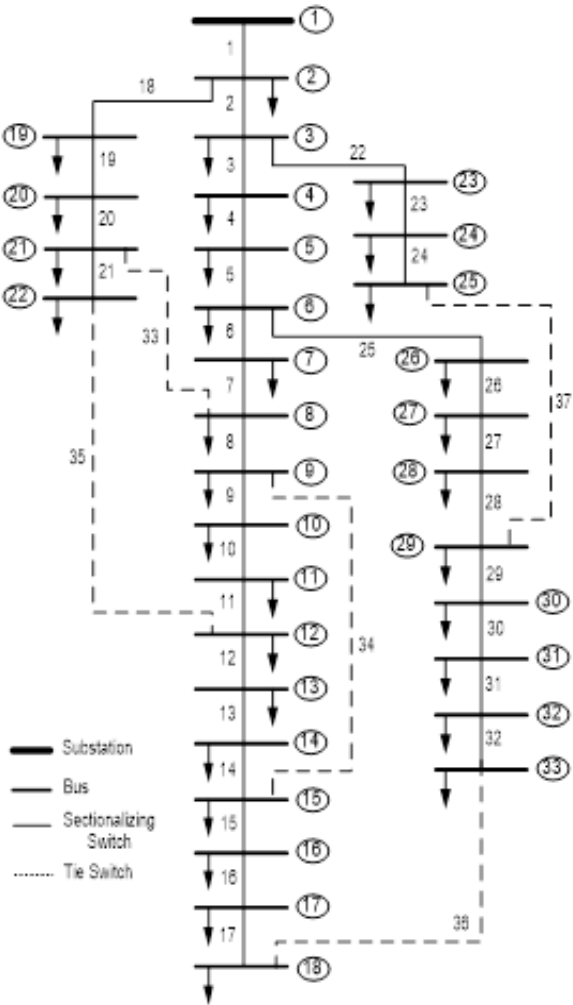
Bus	P (kW)	Q (kVAR)
29	120	70
30	200	600
31	150	70
32	210	100
33	60	40

Gambar 1 menampilkan struktur jaringan distribusi radial IEEE 33 bus, yang digunakan secara luas sebagai model referensi dalam analisa aliran daya pada sistem distribusi tegangan menengah. Sistem ini terdiri dari 33 bus dan 32 jalur distribusi, dengan Bus 1 sebagai slack bus yang berfungsi sebagai titik referensi tegangan dan pusat suplai daya ke seluruh sistem.

Setiap bus dalam jaringan ini mewakili titik sambung antara elemen sistem seperti beban, transformator, atau penghubung jaringan. Beberapa bus terhubung dengan beban aktif dan reaktif yang tersebar di sepanjang jaringan, mencerminkan distribusi konsumsi energi pada sistem nyata. Jalur distribusi yang menghubungkan antar bus merepresentasikan

saluran transmisi dengan impedansi tertentu yang memengaruhi profil tegangan dan aliran daya.

Dalam konteks analisa aliran daya, gambar ini menjadi dasar pemodelan untuk menghitung nilai tegangan di setiap bus, aliran daya aktif dan reaktif pada tiap jalur, serta rugi-rugi daya dalam sistem. Karena jaringan ini bersifat radial (tanpa loop), metode Newton-Raphson sering digunakan dalam perhitungan aliran daya untuk mendapatkan hasil yang cepat dan akurat, terutama jika dibandingkan dengan metode iteratif sederhana seperti Gauss-Seidel. Dengan menggunakan perangkat lunak seperti ETAP, gambar IEEE 33 bus ini diinput ke dalam sistem sebagai model simulasi, lalu dianalisis menggunakan metode aliran daya. Hasilnya berupa profil tegangan, arus, serta distribusi daya di seluruh bus dan jalur, yang kemudian digunakan untuk evaluasi performa sistem distribusi secara keseluruhan.



Gambar 1. Diagram Satu Garis IEEE 33 Bus

Pembahasan

Tabel 4 menjelaskan Analisa aliran daya pada jaringan distribusi IEEE 33 bus dilakukan untuk mengevaluasi kondisi tegangan, arus, dan rugi-rugi daya di setiap saluran. Jaringan ini merupakan model standar dalam studi sistem distribusi radial yang digunakan secara luas untuk keperluan akademik dan penelitian. Dari hasil simulasi, diperoleh bahwa Bus 1 sebagai slack bus memiliki tegangan sebesar 12,66 kV. Tegangan kemudian menurun secara bertahap hingga mencapai titik terendah di Bus 33 yaitu sebesar 11,60 kV.

Tabel 4. Hasil aliran daya menggunakan metode newton raphson

Bus	Tegangan (kV)	Saluran		Arus (A)	Losses (kW)
		Dari	Ke		
1	12,66	1	2	210,36	12,24
2	12,62	2	3	187,13	51,79
3	12,44	3	4	134,63	19,90
4	12,35	4	5	127,89	18,70
5	12,25	5	6	124,77	38,25
6	12,02	6	7	58,39	1,91
7	11,98	7	8	47,61	4,86
8	11,92	8	9	36,78	4,18
9	11,84	9	10	33,72	3,56
10	11,76	10	11	30,64	0,55
11	11,75	11	12	28,01	0,88
12	11,73	12	13	24,61	2,67
13	11,66	13	14	21,18	0,73
14	11,63	14	15	14,19	0,36
15	11,61	15	16	11,21	0,28
16	11,59	16	17	8,07	0,25
17	11,57	17	18	4,92	0,05
18	11,56	2	19	18,09	0,16
19	12,62	19	20	13,58	0,83
20	12,57	20	21	9,06	0,10
21	12,56	21	22	4,53	0,04
22	12,55	3	23	48,48	3,18
23	12,40	23	24	43,70	5,14

Bus	Tegangan (kV)	Saluran		Arus (A)	Losses (kW)
		Dari	Ke		
24	12,31	24	25	21,89	1,29
25	12,27	6	26	65,35	2,60
26	12,00	26	27	62,49	3,33
27	11,97	27	28	59,64	11,30
28	11,82	28	29	56,98	7,83
29	11,72	29	30	50,58	3,90
30	11,67	30	31	23,35	1,59
31	11,62	31	32	15,13	0,21
32	11,61	32	33	3,59	0,01
33	11,60	Total			202,69

Penurunan tegangan ini mencerminkan karakteristik umum jaringan distribusi radial, di mana semakin jauh jarak dari pusat suplai, tegangan akan semakin rendah. Beberapa bus seperti Bus 18, 27, dan 30 juga menunjukkan tegangan mendekati batas bawah standar. Kondisi ini perlu diwaspadai karena dapat memengaruhi kualitas pelayanan daya listrik ke konsumen. Untuk menjaga tegangan dalam batas yang diizinkan, sering kali dibutuhkan penambahan kapasitor atau pengaturan ulang beban.

Selain tegangan, arus yang mengalir pada setiap saluran juga dianalisis untuk melihat distribusi daya. Saluran dengan arus tertinggi terdapat antara Bus 1 dan Bus 2 sebesar 210,36 A. Arus ini secara bertahap menurun seiring dengan pembagian beban ke bus-bus berikutnya. Saluran 2–3 mencatat arus sebesar 187,13 A, dan saluran 3–4 sebesar 134,83 A, menunjukkan tingginya konsumsi daya di awal jaringan. Di bagian akhir jaringan, arus jauh lebih kecil, seperti pada saluran 32–33 yang hanya 15,13 A.

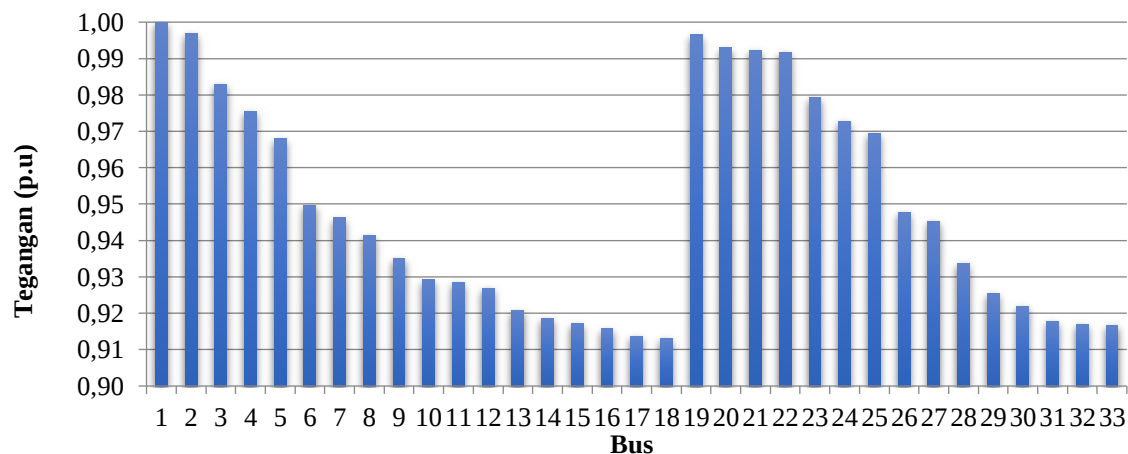
Distribusi arus ini menunjukkan bahwa beban paling besar terdapat di bagian awal jaringan, dan semakin kecil ke arah ujung. Ini konsisten dengan sistem distribusi radial yang mengalirkan daya satu arah dari pusat ke ujung. Pengaruh arus terhadap rugi-rugi daya pun terlihat cukup signifikan. Saluran dengan arus besar memiliki rugi-rugi daya yang lebih tinggi. Saluran 2–3 mengalami rugi-rugi daya tertinggi yaitu 51,99 kW, disusul saluran 3–4 sebesar 19,90 kW.

Total rugi-rugi daya sistem secara keseluruhan adalah 202,69 kW. Nilai ini mencerminkan efisiensi dari sistem distribusi tersebut. Semakin besar rugi-rugi daya, semakin rendah efisiensi sistem dan semakin besar biaya operasional yang dikeluarkan. Oleh karena itu, analisa seperti ini penting dilakukan sebagai dasar dalam pengambilan keputusan perencanaan dan pengoperasian sistem tenaga. Pengurangan rugi-rugi bisa dilakukan melalui penambahan kapasitor, perbaikan faktor daya, atau rekonfigurasi jaringan.

Simulasi ini menunjukkan bahwa ETAP sebagai perangkat lunak analisis sistem tenaga sangat membantu dalam memvisualisasikan dan menghitung parameter-parameter penting. Mahasiswa dapat memanfaatkan hasil simulasi ini untuk memahami perilaku sistem distribusi dan dampaknya terhadap kualitas dan efisiensi penyaluran energi. Selain itu, data simulasi juga

bermanfaat untuk mendukung pengembangan algoritma optimasi jaringan. Dari hasil ini, terlihat bahwa beberapa bus dan saluran merupakan titik kritis yang dapat dijadikan fokus dalam upaya peningkatan performa jaringan.

Secara keseluruhan, analisa aliran daya pada sistem IEEE 33 bus memberikan gambaran menyeluruh mengenai kondisi teknis sistem distribusi radial. Evaluasi tegangan, arus, dan rugi-rugi daya menjadi landasan penting dalam mengidentifikasi permasalahan dan peluang perbaikan sistem. Hasil ini juga dapat dibandingkan dengan metode aliran daya lainnya seperti Gauss-Seidel atau Fast Decoupled untuk melihat efisiensi perhitungan. Dengan pemahaman yang baik terhadap data hasil simulasi, pengambilan keputusan yang lebih tepat dan efisien dalam pengelolaan sistem tenaga listrik dapat dilakukan.



Gambar 2. Profil Tegangan IEEE 33 Bus

Gambar 2 menjelaskan Grafik di atas menunjukkan profil tegangan pada masing-masing bus dalam sistem distribusi radial IEEE 33 bus, dinyatakan dalam satuan per unit (p.u). Terlihat bahwa tegangan tertinggi terdapat pada Bus 1 yang merupakan slack bus, dengan nilai mendekati 1,00 p.u. Tegangan kemudian mengalami penurunan bertahap hingga mencapai titik terendah di sekitar Bus 17, dengan nilai mendekati 0,91 p.u. Penurunan tegangan ini disebabkan oleh jarak terhadap sumber dan beban kumulatif yang semakin besar di sepanjang jaringan.

Menariknya, terjadi kenaikan tegangan kembali pada Bus 18 hingga Bus 21, yang menunjukkan adanya segmentasi atau kemungkinan perubahan topologi jaringan. Setelah Bus 21, tegangan kembali menurun secara bertahap hingga Bus 33. Pola tegangan ini mencerminkan kondisi umum jaringan distribusi radial, di mana tegangan menurun di titik beban yang jauh dari sumber utama. Rentang tegangan masih berada dalam batas toleransi operasi, namun titik-titik tegangan rendah dapat menjadi indikasi perlunya kompensasi daya reaktif. Grafik ini membantu dalam mengidentifikasi lokasi kritis yang membutuhkan tindakan perbaikan. Dengan

menganalisis grafik ini, operator dapat merencanakan penambahan kapasitor atau optimalisasi konfigurasi sistem. Visualisasi ini juga mendukung pemahaman mahasiswa terhadap konsep drop tegangan dalam sistem distribusi nyata.

PENUTUP

Berdasarkan hasil analisa aliran daya pada sistem IEEE 33 bus, dapat disimpulkan bahwa profil tegangan pada setiap bus masih berada dalam batas toleransi operasi sistem distribusi, dengan tegangan terendah sebesar 11,99 kV pada Bus 33. Arus terbesar tercatat pada saluran antara Bus 1 dan Bus 2 sebesar 200,13 A, yang menunjukkan beban besar di awal jaringan. Total rugi-rugi daya aktif yang terjadi dalam sistem adalah sebesar 139,53 kW, yang tergolong cukup signifikan dan dapat mempengaruhi efisiensi operasi jaringan. Pola distribusi arus dan rugi-rugi daya menunjukkan bahwa titik-titik awal jaringan mengalami beban dan kerugian energi yang lebih besar. Hal ini menandakan pentingnya penempatan elemen kompensasi daya reaktif serta optimasi konfigurasi jaringan untuk mengurangi kerugian energi. Melalui analisa ini, mahasiswa dapat memahami secara nyata bagaimana metode perhitungan aliran daya digunakan dalam menilai kinerja sistem distribusi. Pembelajaran ini sangat relevan dengan mata kuliah Analisa Sistem Tenaga, karena melibatkan penerapan konsep aliran daya, tegangan bus, dan kerugian daya. Simulasi seperti ini melatih mahasiswa untuk mampu menginterpretasi data sistem dan mengambil langkah perbaikan teknis. Selain itu, pemahaman tentang titik kritis dalam jaringan juga penting untuk perencanaan dan pengembangan sistem yang lebih andal. Dengan demikian, analisa aliran daya menjadi fondasi penting dalam desain dan pengoperasian sistem tenaga listrik yang efisien dan stabil.

DAFTAR PUSTAKA

- Al-Hajri, S. S., & Habiballah, I. O. (2022). Review of Solution Techniques for Load Flow Studies. *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)* *Www.Ijert.Org*, 11(12), 49–52. www.ijert.org
- ASA Pro. (2021). *Load flow analysis using matlab simulink* - YouTube. 8(5), 425–434. <https://www.youtube.com/watch?v=weCSgF-xMcw&t=85s>
- Bernat, J. O., & Preece, R. (2019). Impact of VSC-HVDC reactive power control schemes on voltage stability. *2019 IEEE Milan PowerTech, PowerTech 2019, September*, 509–523. <https://doi.org/10.1109/PTC.2019.8810794>
- Djalal, M. R., Saini, M., & Yunus, A. . S. (2021). Load Flow Analysis After the Entry of Renewable Power Plants in the Sulselrabar System. *Journal of Electrical Technology UMY*, 5(2), 80–87. <https://doi.org/10.18196/jet.v5i2.12897>
- Dulău, L. I., & Bică, D. (2017). Power Flow Analysis with Loads Profiles. *Procedia Engineering*, 181, 785–790. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.02.466>
- El-Fergany, A. A. (2024). Reviews on Load Flow Methods in Electric Distribution Networks. *Archives of Computational Methods in Engineering*, 32(3), 1619–1633. <https://doi.org/10.1007/s11831-024-10191-7>
- Emmy Hosea, & Yusak Tanoto. (2004). Perbandingan Analisa Aliran Daya dengan Menggunakan Metode Algoritma Genetika dan Metode Newton-Raphson. *Jurnal Teknik Elektro*, 4(2), 63–69. <http://puslit2.petra.ac.id/ejournal/index.php/elk/article/view/16190>
- Hussain, M. D., Rahman, M. H., & Ali, N. M. (2024). Investigation of Gauss-Seidel Method for Load Flow Analysis in Smart Grids. *Scholars Journal of Engineering and Technology*, 12(05), 169–178. <https://doi.org/10.36347/sjet.2024.v12i05.004>
- Onah, C. O. (2021). *Load Flow Modeling and Performance Analysis of Suleja 132/33 kV Sub-transmission Station*. 16(4), 38–48. <https://doi.org/10.9790/1676-1604013848>
- Shrawane, S. S., & Diagavane, M. (2013). Application of Genetic Algorithm for Power Flow Analysis. *International Journal of Engineering Research & Technology*, 2(9), 453–456.