



## **Perbaikan Drop Voltage Menggunakan Kapasitor Bank pada Sistem Distribusi 6 Bus**

**Saut Martondi Raja Tamba**

Universitas Negeri Medan

**Kristianus Lumban Gaol**

Universitas Negeri Medan

**David Anrey Purba**

Universitas Negeri Medan

**Firalda Annisha**

Universitas Negeri Medan

**Arwadi Sinuraya**

Universitas Negeri Medan

**Desman Jonto Sinaga**

Universitas Negeri Medan

Jl. Willem Iskandar Pasar V, Medan Estate, Medan, Sumatera Utara 20221

*Korespondensi penulis: [sauttamba62@gmail.com](mailto:sauttamba62@gmail.com)*

**Abstrak.** distribution system using capacitor banks as reactive power compensation. The main issue in distribution networks is the voltage reduction at several buses, particularly at the end of the feeder, which decreases efficiency and increases power losses. The research was conducted by modeling a six-bus system using ETAP software with the Newton-Raphson load flow method. The initial simulation without capacitors showed that the minimum voltage occurred at Bus6 with a value of 96.73%, which was close to the lower limit of the SPLN T6.001-2013 standard, while other buses such as Bus5 and Bus4 also experienced voltage drops. After the installation of a 300 kVAR capacitor bank at Bus6, the voltage profile improved significantly, with Bus6 increasing to 98.00%, Bus5 to 98.49%, and Bus4 to 98.98%. In addition, the reactive power flow from the transformer decreased as part of the reactive demand was supplied by the capacitor bank. The results indicated that the installation of capacitor banks effectively reduced voltage drops, minimized power losses, and enhanced both efficiency and reliability of the distribution system.

**Keywords:** Voltage drop, capacitor bank, six-bus distribution system, reactive power compensation, voltage profile.

**Abstrak.** Penelitian ini membahas perbaikan drop tegangan pada sistem distribusi enam bus dengan menggunakan kapasitor bank sebagai kompensasi daya reaktif. Masalah utama yang dihadapi pada sistem distribusi adalah penurunan tegangan di beberapa bus, terutama di ujung feeder, yang berakibat pada berkurangnya efisiensi dan peningkatan rugi-rugi daya. Penelitian ini dilakukan melalui pemodelan sistem enam bus menggunakan perangkat lunak ETAP dengan metode aliran daya berbasis Newton-Raphson. Simulasi awal tanpa kapasitor menunjukkan bahwa tegangan minimum terjadi di Bus6 sebesar 96,73%, yang mendekati batas bawah standar SPLN T6.001-2013, sementara bus lain seperti Bus5 dan Bus4 juga mengalami penurunan tegangan. Setelah dilakukan penambahan kapasitor bank sebesar 300 kVAR pada Bus6, profil tegangan mengalami perbaikan signifikan dengan peningkatan tegangan Bus6 menjadi 98,00%, Bus5 menjadi 98,49%, dan Bus4 menjadi 98,98%. Selain itu, aliran daya reaktif dari trafo menurun karena sebagian kebutuhan reaktif telah disuplai oleh kapasitor bank. Hasil penelitian menunjukkan bahwa pemasangan kapasitor bank mampu mengurangi drop tegangan, menekan rugi-rugi daya, serta meningkatkan efisiensi dan keandalan sistem distribusi.

**Kata Kunci:** Drop tegangan, kapasitor bank, sistem distribusi enam bus, kompensasi daya reaktif, profil tegangan.

### **PENDAHULUAN**

Kualitas tegangan listrik pada sistem distribusi merupakan faktor utama dalam menjaga keandalan dan kontinuitas penyaluran tenaga listrik. Salah satu permasalahan yang sering muncul pada jaringan distribusi adalah terjadinya *drop voltage* (jatuh tegangan) akibat aliran daya yang

melewati penghantar dengan impedansi tertentu. Jatuh tegangan yang melebihi batas toleransi dapat mengakibatkan berkurangnya efisiensi operasi peralatan, kerusakan beban sensitif, serta tidak terpenuhinya standar mutu tegangan yang telah ditetapkan oleh SPLN T6.001-2013.

Pada sistem distribusi modern, masalah ini semakin kompleks dengan meningkatnya kebutuhan energi dan dominasi beban induktif. Untuk mengatasi masalah tersebut, salah satu metode yang banyak diterapkan adalah pemasangan kapasitor bank sebagai kompensasi daya reaktif. Kapasitor bank berfungsi untuk menginjeksi daya reaktif ( $Q$ ) ke dalam sistem sehingga arus total yang mengalir berkurang, faktor daya meningkat, rugi-rugi daya aktif ( $I^2R$ ) menurun, dan profil tegangan pada bus distribusi dapat diperbaiki.

Beberapa penelitian sebelumnya telah menunjukkan efektivitas penggunaan kapasitor bank. Pada studi yang dilakukan oleh Irawan dkk. (2023), penggunaan kapasitor bank pada penyulang Kayu Bawang dengan metode simulasi ETAP 12.6 berhasil mengurangi jatuh tegangan dari kondisi awal dan memperbaiki profil tegangan di beberapa bus kritis.

Penelitian lain oleh Riska dkk. (2022) pada penyulang Sei Deras 20 kV menggunakan metode *Newton-Raphson* dan *Loss Sensitivity Factor* menunjukkan bahwa jatuh tegangan awal sebesar 14,66% dapat ditekan sehingga semua bus memenuhi standar tegangan SPLN T6.001:2013 setelah pemasangan kapasitor bank. Sementara itu, riset yang dilakukan oleh Nasution (2019) pada penyulang Nila PT. PLN Area Metro dengan metode aliran daya *Newton-Raphson* memperlihatkan peningkatan tegangan minimum dari 0,8710 pu menjadi 0,9017 pu serta pengurangan rugi-rugi daya aktif sekitar 20%.

Selain itu, kajian di PT. Panca Agung Sejati oleh Siahaan (2022) memperlihatkan bahwa pemasangan kapasitor bank  $3 \times 400$  kVAR mampu menurunkan jatuh tegangan menjadi 4,25% yang telah sesuai standar SPLN. Temuan tersebut diperkuat oleh penelitian Asmadi dkk. (2021) pada jaringan distribusi udara 20 kV Feeder 7 Pinang, di mana kapasitor bank dipasang di lokasi strategis untuk mengurangi jatuh tegangan dan meningkatkan kualitas daya secara keseluruhan.

Secara teoritis, konsep perbaikan drop tegangan menggunakan kapasitor bank dapat dijelaskan melalui persamaan aliran daya. Pada jaringan distribusi radial, tegangan pada bus ke- $i$  dipengaruhi oleh aliran daya aktif ( $P$ ) dan daya reaktif ( $Q$ ) yang melewati saluran. Drop tegangan dapat dituliskan secara sederhana dengan persamaan:

$$\Delta V \approx \frac{R \cdot P + X \cdot Q}{V}$$

Dimana :

- $\Delta V$  = Jatuh tegangan (Voltage Drop)
- $P$  = Daya aktif beban (kW atau MW)
- $Q$  = Daya reaktif beban (kVAR atau MVAR)
- $R$  = Resistansi saluran ( $\Omega$ )
- $X$  = Reaktansi saluran ( $\Omega$ )
- $V$  = Tegangan nominal sistem (kV)

Pemasangan kapasitor bank mengurangi kebutuhan daya reaktif dari sistem ( $Q$ ), sehingga nilai  $\Delta V$  menurun dan tegangan bus dapat dinaikkan mendekati nominal. Sistem distribusi 6 bus yang digunakan pada penelitian ini merupakan representasi sederhana dari jaringan distribusi skala kecil hingga menengah. Analisis dilakukan dengan metode aliran daya berbasis algoritma *Newton-Raphson* karena metode ini mampu memberikan hasil yang akurat pada sistem multi-bus. Fokus penelitian adalah untuk menentukan kapasitas dan lokasi pemasangan kapasitor bank yang

optimum sehingga profil tegangan tiap bus dapat diperbaiki sesuai standar, sekaligus menurunkan rugi-rugi daya.

Dengan demikian, penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi pada pengembangan strategi optimasi sistem distribusi skala menengah, khususnya dalam pemanfaatan kapasitor bank untuk memperbaiki jatuh tegangan, mengurangi rugi-rugi daya, serta meningkatkan keandalan sistem tenaga listrik di Indonesia.

## **KAJIAN TEORITIS**

### **1. Karakteristik Sistem Distribusi dan Jatuh Tegangan**

Sistem distribusi merupakan bagian dari sistem tenaga listrik yang menghubungkan gardu induk dengan konsumen. Masalah utama pada saluran distribusi, khususnya tipe radial, adalah jatuh tegangan (voltage drop) yang semakin besar ke arah ujung saluran. Menurut SPLN T6.001-2013, tegangan pelayanan diperbolehkan memiliki variasi +5% dan -10% dari tegangan nominal. Jatuh tegangan terjadi akibat adanya impedansi saluran ( $Z$ ) yang dialiri arus beban ( $I$ ). Asmadi et al. (2021) menjelaskan bahwa besarnya jatuh tegangan ( $V_d$ ) dapat didekati dengan persamaan matematis berikut:

$$V_d = I (R \cdot \cos \phi_1 + X \sin \phi_2)$$

Dimana  $R$  adalah resistansi saluran ( $\Omega$ ),  $X$  adalah reaktansi saluran ( $\Omega$ ), dan  $\cos \phi$  adalah faktor daya beban. Jika nilai  $V_d$  terlalu besar, maka profil tegangan pada bus beban akan turun di bawah standar yang diizinkan (Tharo, 2023).

### **2. Kompensasi Daya Reaktif dengan Kapasitor Bank**

Beban-beban pada jaringan distribusi umumnya bersifat induktif yang menyerap daya reaktif, sehingga menyebabkan faktor daya rendah dan memperparah jatuh tegangan. Pemasangan kapasitor bank (shunt capacitor) berfungsi menginjeksikan daya reaktif ( $Q_c$ ) ke jaringan untuk melawan sifat induktif beban (Dani & Hasanuddin, 2018).

Besarnya kapasitas kapasitor yang diperlukan untuk memperbaiki faktor daya dari kondisi awal ( $\cos \phi_1$ ) menjadi target ( $\cos \phi_2$ ) dihitung dengan persamaan:

$$Q_c = P \cdot (\tan \phi_1 - \tan \phi_2)$$

Dimana  $\phi_1$  adalah sudut fasa awal dan  $\phi_2$  adalah sudut fasa target, dengan adanya suplai daya reaktif lokal dari kapasitor, arus yang mengalir dari sumber berkurang, sehingga jatuh tegangan dapat diminimalisir (Permadi & Santoso, 2023; Riska et al., 2022).

### **3. Analisis Aliran Daya Metode Newton-Raphson**

Analisis aliran daya (load flow study) diperlukan untuk mengetahui besaran tegangan, arus, dan aliran daya pada setiap bus dalam berbagai kondisi operasi. Penelitian ini menggunakan metode Newton-Raphson dengan bantuan perangkat lunak ETAP 12.6.0.

Menurut Jadi Ate (2022) dan Monice et al. (2019), metode Newton-Raphson memiliki keunggulan dalam kecepatan konvergensi untuk sistem yang kompleks dibandingkan metode Gauss-Seidel. Metode ini menyelesaikan persamaan aliran daya non-linear secara iteratif menggunakan matriks Jacobian untuk mendapatkan nilai tegangan ( $V$ ) dan sudut fasa ( $\delta$ ) yang presisi.

### **4. Tinjauan Penelitian Terdahulu**

Penelitian terkait optimasi jaringan distribusi telah banyak dilakukan. Tahir dan Haider (2020) serta Elchrisa et al. (2023) membuktikan bahwa simulasi ETAP akurat dalam menentukan lokasi kapasitor untuk memperbaiki profil tegangan. Sementara itu, Nasution (2019) dan Irawan

et al. (2023) menekankan pentingnya studi kasus spesifik pada penyulang yang mengalami kondisi kritis.

Berbeda dengan penelitian sebelumnya yang banyak membahas jaringan industri atau penyulang 20kV yang panjang, penelitian ini memfokuskan pada simulasi sistem 6 bus untuk melihat efektivitas pemasangan kapasitor terpusat di ujung beban (Bus 6) dalam memulihkan tegangan sistem secara keseluruhan.

## **METODE PENELITIAN**

Penelitian ini menggunakan pendekatan simulasi berbasis analisis aliran daya untuk mengevaluasi perbaikan *drop voltage* pada sistem distribusi enam bus dengan penambahan kapasitor bank. Analisis dilakukan dengan perangkat lunak ETAP, yang dipilih karena memiliki kemampuan analisis aliran daya yang akurat dan dapat memodelkan sistem distribusi dengan detail.

Tahapan penelitian dimulai dengan pengumpulan data sistem yang terdiri dari data transformator, kabel, dan beban. Data ini menjadi masukan utama dalam pemodelan sistem distribusi. Setelah pemodelan selesai, dilakukan simulasi aliran daya awal tanpa kapasitor bank untuk mengetahui kondisi profil tegangan, rugi-rugi daya, serta lokasi bus yang mengalami penurunan tegangan terbesar. Berdasarkan hasil simulasi tersebut, dilakukan penentuan lokasi dan kapasitas optimal kapasitor bank dengan mempertimbangkan kepekaan tegangan dan rugi daya.

Simulasi berikutnya dilakukan dengan menambahkan kapasitor bank pada bus yang terpilih. Hasil simulasi sebelum dan sesudah pemasangan kapasitor dibandingkan untuk menilai efektivitas perbaikan, dengan parameter utama berupa tegangan bus, rugi-rugi daya, dan persentase drop tegangan.



Gambar 1. Diagram Alir (*Flowchart*) Penelitian

## **HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN**

Sebagai dasar simulasi, digunakan data transformator, kabel, dan beban sebagaimana ditunjukkan pada tabel berikut:

Tabel 1. Data Sistem Power Grid

Sumber	Daya Aktif (MW)	Daya Semu (MVA)	Daya Reaktif (MVAR)
Power Grid	2,267	2,598	1,461

Tabel 2. Data Transformator

Nama	Kapasitas (MVA)	Input (kV)	Output (kV)	%Z	X/R
T1	4	150	20	7,15	8,5
T2	4	150	33	7,15	8,5
T3	3	33	0,415	6,25	6

Tabel 3. Data Sistem Kabel

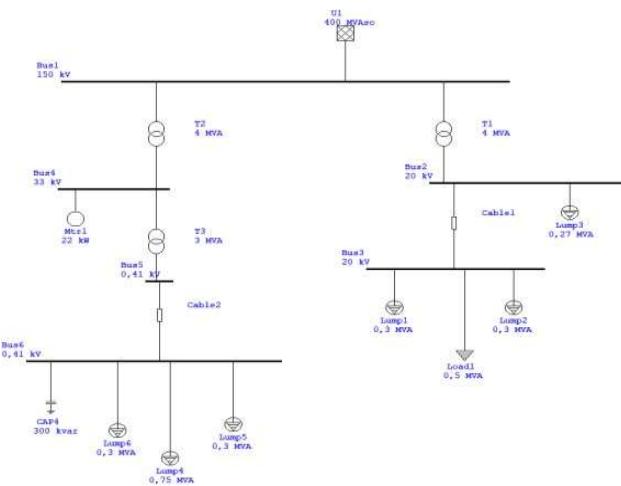
Nama	Saluran Bus	Sumber	Frekuensi (Hz)	Tegangan (Kv)	Panjang (m)
1	2-3	XLPE	50	20	1000
2	5-6	XLPE	50	20	1000

Tabel 4. Data Sistem Beban

Nama	Tegangan (kV)	Kapasitas (MVA)	Daya Aktif (MW)	Daya Reaktif (MVAR)	%PF
Lump 1	20	0,3	0,255	0,158	85
Lump 2	20	0,3	0,255	0,158	85
Lump 3	20	0,27	0,229	0,142	85
Lump 4	0,410	0,75	0,637	0,395	85
Lump 5	0,410	0,3	0,255	0,158	85
Lump 6	0,410	0,3	0,255	0,158	85
Load 1	20	0,5	0,5	0	100

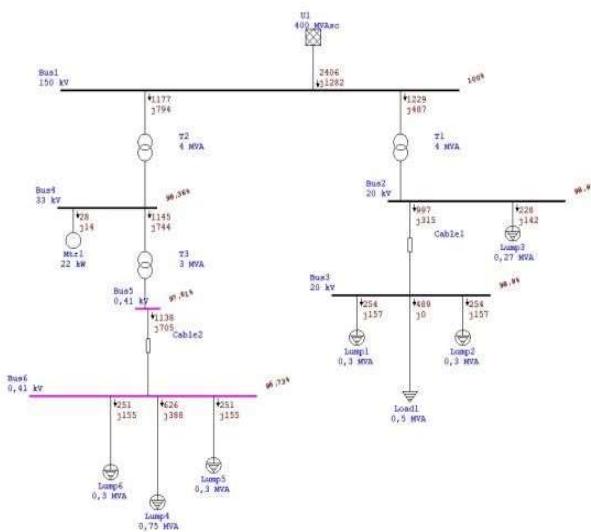
Pemodelan sistem distribusi enam bus divisualisasikan melalui single line diagram (SLD) sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 2. Diagram ini menggambarkan keterhubungan antara sumber, transformator, kabel, dan beban yang menjadi objek analisis dalam penelitian.

## Perbaikan Drop Voltage Menggunakan Kapasitor Bank pada Sistem Distribusi 6 Bus



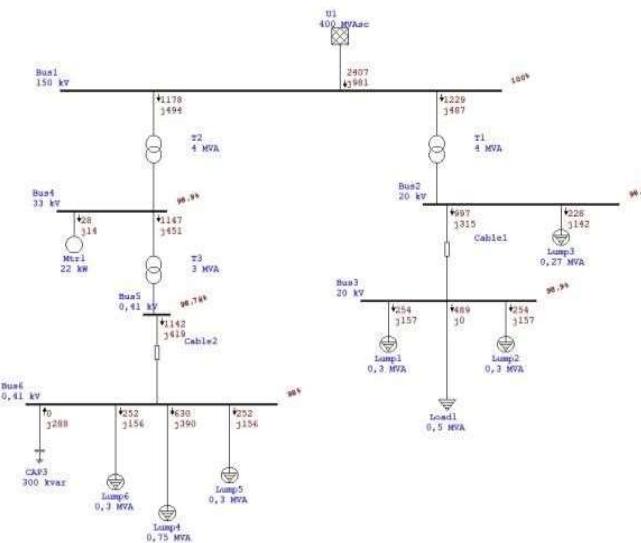
Gambar 2. Single Line Diagram Sistem Distribusi 6 Bus

Dengan metode ini, hasil yang diperoleh berupa perbandingan profil tegangan dan rugi daya sebelum serta sesudah pemasangan kapasitor bank. Hasil tersebut menjadi dasar penentuan kapasitas dan lokasi optimal kapasitor bank yang dapat memperbaiki drop tegangan sehingga tegangan bus berada dalam batas toleransi SPLN T6.001-2013.



Gambar 3. Single Line Diagram Sebelum Pemasangan Kapasitor

Pada kondisi awal tanpa kapasitor bank, tegangan minimum terjadi di Bus6 dengan nilai sekitar 96,73%, yang berada mendekati batas bawah standar SPLN. Profil tegangan pada beberapa bus lain juga menunjukkan penurunan (Bus5  $\approx$ 97,61% dan Bus4  $\approx$ 98,36%), sedangkan arus reaktif yang cukup besar masih harus disuplai dari trafo ke beban. Hal ini mengindikasikan adanya drop voltage yang signifikan di ujung feeder serta meningkatnya rugi-rugi daya akibat aliran daya reaktif yang tinggi.



Gambar 4. Single Line Diagram Sesudah Pemasangan Kapasitor

Setelah pemasangan kapasitor bank di Bus6, profil tegangan sistem mengalami perbaikan signifikan. Tegangan pada Bus 6 meningkat dari 96,73% menjadi 98,00%, sehingga kembali berada dalam batas standar SPLN. Bus lain yang berdekatan, seperti Bus 5 (dari 97,61% menjadi 98,49%) dan Bus4 (dari 98,36% menjadi 98,98%), juga mengalami kenaikan tegangan. Selain itu, aliran daya reaktif yang sebelumnya ditarik dari trafo berkurang secara nyata karena sebagian kebutuhan reaktif telah disuplai oleh kapasitor bank. Kondisi ini berdampak pada berkurangnya rugi-rugi daya dan meningkatnya efisiensi sistem distribusi.

### KESIMPULAN

Berdasarkan hasil simulasi dan analisis aliran daya yang telah dilakukan pada sistem distribusi 6 bus menggunakan perangkat lunak ETAP 12.6, dapat ditarik beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Efektivitas Perbaikan Tegangan: Pemasangan kapasitor bank tipe *shunt* sebesar 300 kVAR pada Bus 6 terbukti efektif memperbaiki profil tegangan sistem. Tegangan pada Bus 6 mengalami kenaikan signifikan dari kondisi kritis 96,73% menjadi 98,00%. Perbaikan ini juga berdampak positif pada bus-bus di sekitarnya, di mana tegangan Bus 5 meningkat dari 97,61% menjadi 98,49%, dan Bus 4 meningkat dari 98,36% menjadi 98,98%.
2. Pemenuhan Standar SPLN: Sebelum pemasangan kapasitor, tegangan pada ujung penyulang (Bus 6) mendekati batas toleransi minimum (-10%). Setelah kompensasi daya reaktif dilakukan, seluruh bus dalam sistem memiliki tegangan yang memenuhi standar pelayanan SPLN T6.001-2013, yaitu berada dalam rentang tegangan aman (di atas 90% dan di bawah 105%).
3. Reduksi Suplai Daya Reaktif: Pemasangan kapasitor bank mampu mensuplai kebutuhan daya reaktif beban secara lokal (di sisi beban), sehingga mengurangi aliran daya reaktif yang harus dikirim dari transformator utama. Hal ini berkontribusi pada penurunan rugi-rugi daya (*power losses*) pada saluran dan meningkatkan kapasitas penyaluran daya sistem.

## **SARAN**

Penelitian ini masih memiliki ruang untuk pengembangan lebih lanjut. Oleh karena itu, penulis menyarankan beberapa hal berikut untuk penelitian selanjutnya:

1. Variasi Pembebanan: Penelitian selanjutnya disarankan untuk melakukan simulasi dengan variasi pembebanan dinamis (misalnya kurva beban harian Waktu Beban Puncak dan Luar Waktu Beban Puncak) untuk melihat kinerja kapasitor bank pada kondisi operasi yang berubah-ubah.
2. Metode Optimasi: Untuk mendapatkan lokasi dan kapasitas kapasitor yang presisi, disarankan menggunakan metode kecerdasan buatan (*Artificial Intelligence*) seperti *Genetic Algorithm* (GA) atau *Particle Swarm Optimization* (PSO), alih-alih hanya menggunakan metode *trial and error* atau penempatan tunggal di ujung beban.
3. Analisis Ekonomi dan Harmonisa: Perlu dilakukan analisis kelayakan ekonomi (*Cost-Benefit Analysis*) untuk menghitung biaya investasi kapasitor dibandingkan dengan penghematan energi yang dihasilkan. Selain itu, kajian dampak pemasangan kapasitor terhadap timbulnya harmonisa atau resonansi pada jaringan juga perlu dipertimbangkan untuk menjaga kualitas daya (Power Quality).

## **DAFTAR PUSTAKA**

- Asmadi, H., Hariyadi, S., & Aripin, S. (2021). Analisis Pemasangan Kapasitor Bank Sebagai Solusi untuk Drop Tegangan pada Jaringan Udara 20 kV (Feeder 7 Pinang GI Muaro Bungo). *Jurnal Uranus*, 11(2), 89-98.
- Dani, A., & Hasanuddin, M. (2018). Perbaikan faktor daya menggunakan kapasitor sebagai kompensator daya reaktif (studi kasus STT Sinar Husni). *Prosiding Seminar Nasional Royal (SENAR)*, 1(1), 673-678.
- Elchrisa, C., Amali, L. K., & Tolago, A. I. (2023). Analisis Optimasi Penempatan Kapasitor Bank pada Jaringan Tegangan Menengah 20kV Feeder IS.03 Rayon Limboto untuk Memperbaiki Kualitas Tegangan. *Jambura Journal of Electrical and Electronics Engineering*, 5(1), 22-28.
- Hajar, I., & Rahayuni, S. M. (2020). Analisis Perbaikan Faktor Daya Menggunakan Kapasitor Bank di Plant 6 PT. Indocement Tunggal Prakarsa Tbk Unit Citereup. *Setrum: Sistem Kendali-Tenaga-Elektronika-Telekomunikasi-Komputer*, 9(1), 8-16.
- Irawan, R., Hidayat, S., & Putra, A. (2023). Simulasi Perbaikan Drop Tegangan Dengan Kapasitor Bank pada Feeder Kayu Bawang. *Jurnal FTI Universitas Bung Hatta*, 2(1).
- Izzudin, A. A. (2022). Analisa Aliran Daya Pada Rekonfigurasi Jaringan Distribusi Menggunakan Metode Newton Raphson Dan Ant Colony Optimization. *Jurnal Teknik Elektro dan Komputer TRIAC*, 9(1), 1-6.
- Jadi Ate, H. (2022). Perbandingan Hasil Iterasi Aliran Daya (Load Flow) Menggunakan Metode Newton Raphson dan Metode Fast-Decoupled Dengan Software ETAP. *Electrician: Jurnal Rekayasa dan Teknologi Elektro*, 16(3), 295-300.
- Kafi, M. H., Mahdavian, M., Amini, A. A., Shahgholian, G., & Dehghani, M. (2022). Optimal Capacitor Placement to Improve the Performance of the Electrical Power Distribution System Using Genetic Algorithm. *International Journal of Smart Electrical Engineering*, 11(3), 111-117.
- Monice, M., Situmeang, U., & Perinov, P. (2019). Analisis Kontingensi Sistem Tenaga Listrik Riau Menggunakan Metode Aliran Daya Newton Raphson. *Prosiding Seminar Nasional Pakar*, 2, 1.23.1-1.23.8.

- Nasution, F. (2019). Analisa Jatuh Tegangan dan Rugi-rugi Daya dengan Penempatan Kapasitor Bank pada Penyalang Nila, PT. PLN Area Metro. *Jurnal Nasional Teknik Elektro*, 8(1).
- Permadi, Y., & Santoso, D. B. (2023). Analisis Penggunaan Kapasitor Bank Untuk Meningkatkan Faktor Daya Pada Ruangan MCC di PT. X Purwakarta. *Jurnal Ilmiah Wahana Pendidikan*, 9(25), 903-912.
- Riska, H., Yacoub, R., & Suryadi, D. (2022). Peningkatan Profil Tegangan Menggunakan Kapasitor Bank pada Jaringan Tegangan Menengah 20 kV, Penyalang Sei Deras. *Jurnal Teknik Elektro Universitas Tanjungpura*, 2(1).
- Siahaan, E. (2022). Kajian Perbaikan Tegangan Menggunakan Kapasitor Bank di PT. Panca Agung Sejati. *Jurnal Nasional Teknologi Industri*, 3(2).
- Tahir, J., & Haider, Z. (2020). Optimal capacitor placement in a distribution system using ETAP software. *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*, 18(1), 1-8.
- Tharo, Z. (2023). Penggunaan Kapasitor Bank Sebagai Solusi Drop Tegangan Pada Jaringan 20 kV. *Prosiding Seminar Nasional Teknik UISU (SEMNASTEK)*, 6(1), 102-108.