

ANALISIS PENERAPAN KAPASITOR BANK DALAM PERBAIKAN FAKTOR DAYA DI GEDUNG KOMERSIAL BERBEBAN REAKTIF TINGGI

Junaedi Hutabarat¹, Ahmad Dani², Beni Satria³

^{1,2,3}Teknik Elektro, Fakultas Sains Dan Teknologi, Universitas Pembangunan Panca Budi
¹hutabaratjunaedi1@gmail.com *, ²ahmad.kartasmita@gmail.com, ³beni@dosen.pancabudi.ac.id

Corresponding Author: Junaedi

ABSTRAK

Penelitian ini menganalisis efektivitas penerapan kapasitor bank dalam meningkatkan faktor daya pada gedung komersial berbeban reaktif tinggi menggunakan simulasi ETAP 19.0. Empat skenario dievaluasi: beban maksimum dan minimum dengan serta tanpa kapasitor bank. Pada beban maksimum (895 kVA), pemasangan kapasitor bank (400 kVar) meningkatkan faktor daya dari 78,3% menjadi 96,4%, mengurangi daya reaktif sebesar 66,4% dan menstabilkan tegangan di 384 V. Namun, pada beban minimum (173 kVA), kapasitor bank berkapasitas tetap (200 kVar) menyebabkan *overcompensation*, menghasilkan daya reaktif negatif (-150 kVar), faktor daya *leading* (-87,4%), dan kenaikan tegangan hingga 400,3 V yang berisiko merusak peralatan. Analisis menunjukkan kapasitas optimal kapasitor bank untuk beban maksimum adalah 389 kVar, sedangkan untuk beban minimum tidak diperlukan atau maksimal 50 kVar. Temuan ini mengonfirmasi ketidakefektifan kapasitor bank berkapasitas tetap pada beban dinamis. Penelitian merekomendasikan penggunaan sistem kapasitor bank otomatis dengan *step control* untuk menyesuaikan kapasitas secara real-time, memastikan faktor daya memenuhi standar PLN ($\geq 0,85$) sekaligus menghindari *overcompensation*. Pendekatan ini tidak hanya menghindari denda akibat faktor daya rendah, tetapi juga meningkatkan keandalan sistem.

Kata Kunci: kapasitor bank, koreksi faktor daya, kompensasi daya reaktif, overkompensasi, regulasi tegangan

1. Pendahuluan

Kualitas pasokan listrik di gedung komersial menjadi isu krusial seiring meningkatnya kebutuhan energi dan kompleksitas beban yang digunakan. Faktor daya yang rendah, sering kali disebabkan oleh dominasi beban induktif seperti AC, lift, pompa, dan penerangan LED, berpotensi memicu peningkatan daya reaktif yang tidak produktif. Hal ini berdampak pada efisiensi sistem tenaga karena daya semu meningkat tanpa diimbangi peningkatan daya aktif, sehingga berisiko menimbulkan rugi-rugi daya, penurunan kapasitas transformator, dan ketidakstabilan tegangan (Feng et al., 2025). Di Indonesia, Peraturan Menteri ESDM No. 19 Tahun 2017 menetapkan batas minimal faktor daya sebesar 0,85. Jika tidak terpenuhi, pelanggan dikenai denda hingga 30% dari tagihan listrik. Studi PLN (2023) mengungkapkan bahwa 45% gedung komersial di Jakarta memiliki faktor daya di bawah ambang batas ini, dengan rata-rata biaya tambahan mencapai Rp 120 juta per tahun per gedung. Angka tersebut mencerminkan urgensi penerapan solusi yang efektif untuk mengoptimalkan faktor daya, terutama di sektor yang memiliki beban dinamis tinggi seperti gedung perkantoran, pusat perbelanjaan, dan hotel (Faridah et al., 2024).

Beban reaktif pada gedung komersial bersifat dinamis, berubah sesuai aktivitas penggunaan—misalnya, beban maksimum pada siang hari saat operasional penuh dan beban minimum pada malam hari ketika hanya sistem keamanan dan penerangan darurat yang aktif. Sebagai contoh, gedung perkantoran seluas 20.000 m² biasanya memiliki beban puncak 895 kVA pada jam kerja dan turun menjadi 173 kVA di malam hari (SIDDIK & Hamdani, 2024). Kondisi ini memperparah tantangan dalam mengoptimalkan faktor daya karena kapasitor bank dengan kapasitas tetap yang dirancang berdasarkan beban maksimum berisiko menyebabkan *overcompensation* pada beban minimum (Dani & Hasanuddin, 2018). Fenomena ini terjadi ketika daya reaktif kapasitif berlebihan menghasilkan tegangan berlebihan, berpotensi merusak



peralatan dan menurunkan faktor daya secara tidak langsung. Meskipun kapasitor bank telah menjadi solusi umum untuk koreksi faktor daya, literatur terkini masih terbatas dalam membahas optimalisasi kapasitasnya pada beban dinamis. Sebagian besar penelitian sebelumnya hanya fokus pada skenario beban tetap di sektor industri, tanpa mempertimbangkan fluktuasi harian yang khas pada gedung komersial (Optimasi et al., 2022).

Penelitian sebelumnya juga belum secara komprehensif menjawab dua pertanyaan kritis. Pertama, bagaimana kinerja kapasitor bank pada kondisi beban ekstrem di gedung komersial. (Journal Of Electrical et al., 2023) Simulasi berbasis ETAP menunjukkan bahwa pemasangan kapasitor bank dengan kapasitas 200 kVar meningkatkan faktor daya dari 0,75 menjadi 0,92 pada pabrik tekstil. Namun, skenario serupa pada gedung komersial dengan beban dinamis berpotensi menyebabkan *overcompensation* karena perbedaan profil beban (Ali et al., 2021). Pada beban minimum, kelebihan kompensasi reaktif dapat menurunkan faktor daya secara tidak langsung (misalnya, dari 0,96 menjadi 0,92) akibat munculnya daya reaktif kapasitif berlebihan. Kedua, apakah model penentuan kapasitas kapasitor bank yang optimal untuk beban dinamis telah tersedia (Ferdiansah et al., 2023). (Billahi et al., 2021) menyatakan bahwa 70% penerapan kapasitor bank di Indonesia masih menggunakan pendekatan *rule of thumb* (30% dari daya beban), tanpa analisis mendalam terhadap karakteristik beban harian. Hal ini berisiko mengakibatkan under- atau over-kompensasi, terutama pada gedung dengan variasi beban tinggi seperti pusat perbelanjaan atau hotel. (Faridah et al., 2024)

Penelitian ini bertujuan menganalisis efektivitas kapasitor bank dalam memperbaiki faktor daya pada dua kondisi beban ekstrem (maksimum dan minimum) di gedung komersial, serta mengusulkan model optimalisasi kapasitas berbasis dinamika beban. Kontribusi utamanya meliputi validasi simulasi ETAP untuk mengukur perubahan faktor daya, daya reaktif, dan stabilitas tegangan sebelum dan sesudah pemasangan kapasitor bank (Dani, 2021). Selain itu, penelitian ini mengidentifikasi risiko *overcompensation* pada beban minimum yang sering diabaikan dalam studi sebelumnya (Anggara et al., 2025a). Temuan ini diharapkan dapat menjadi dasar rekomendasi desain kapasitor bank yang mempertimbangkan variasi beban harian, seperti penggunaan sistem *automatic* dengan *step control* untuk menghindari kompensasi berlebihan. Dengan demikian, penelitian ini tidak hanya memberikan solusi teknis untuk perbaikan faktor daya, tetapi juga mengisi celah literatur terkait optimalisasi kapasitor bank pada beban dinamis (Anggara et al., 2025b).

Dalam konteks praktis, hasil penelitian ini diharapkan dapat mengurangi beban finansial akibat denda PLN sekaligus meningkatkan keandalan sistem tenaga. Sebagai ilustrasi, peningkatan faktor daya dari 0,79 menjadi 0,85 pada beban maksimum berpotensi menghemat biaya hingga Rp 45 juta per tahun untuk gedung dengan konsumsi listrik 1.000.000 kWh/bulan. Namun, tanpa analisis mendalam terhadap beban minimum, pemasangan kapasitor bank berisiko menimbulkan masalah baru seperti *overvoltage* dan kerusakan peralatan elektronik.

Oleh karena itu, pendekatan holistik yang mempertimbangkan dinamika beban harian menjadi kunci dalam merancang sistem kompensasi reaktif yang efisien dan ekonomis. Penelitian ini juga menjadi langkah awal untuk pengembangan model prediksi beban berbasis *machine learning* yang dapat diintegrasikan dengan sistem kapasitor bank otomatis, sehingga memungkinkan penyesuaian kapasitas secara real-time sesuai kebutuhan. Dengan demikian, tidak hanya memenuhi standar regulasi, tetapi juga mendukung keberlanjutan operasional gedung komersial dalam jangka panjang (Supriatna et al., 2024).

2. Tinjauan Pustaka

Faktor daya (*power factor*, PF) merupakan parameter kritis dalam sistem tenaga listrik yang menggambarkan efisiensi penggunaan daya aktif (*real power*) terhadap daya semu (*apparent power*). Secara matematis, faktor daya didefinisikan sebagai cosinus sudut fase (θ) antara tegangan dan arus, atau rasio daya aktif (P) terhadap daya semu (S):



Lisensi

Lisensi Internasional Creative Commons Attribution-ShareAlike 4.0.

$$PF = \cos\theta = \frac{P}{S}$$

di mana $S = \sqrt{P^2 + Q^2}$, dengan Q adalah daya reaktif (*reactive power*) dalam satuan kVar.

Daya reaktif timbul akibat beban induktif seperti motor listrik, trafo, dan lampu fluorescent yang memerlukan fluks magnetik untuk beroperasi. Faktor daya rendah menyebabkan peningkatan arus yang ditarik dari sumber, sehingga meningkatkan rugi-rugi daya (I^2R), menurunkan kapasitas transformator, dan berpotensi mengganggu stabilitas tegangan. Peraturan Menteri ESDM No. 19 Tahun 2017 menetapkan batas minimal faktor daya 0,85 untuk menghindari denda, yang dihitung berdasarkan kelebihan daya reaktif terhadap daya aktif.

Kompensasi daya reaktif dengan kapasitor bank menjadi solusi utama untuk meningkatkan faktor daya. Prinsip kerjanya adalah menyuplai daya reaktif kapasitif (Q_c) yang mengkompensasi daya reaktif induktif (Q_L) dari beban. Persamaan dasar untuk menentukan kapasitas kapasitor bank yang diperlukan adalah:

$$Q_c = P(\tan\theta_1 - \tan\theta_2)$$

di mana θ_1 adalah sudut fase awal (sebelum kompensasi), θ_2 adalah sudut fase target (setelah kompensasi), dan P adalah daya aktif beban. Persamaan ini menunjukkan bahwa kapasitas kapasitor bank bergantung pada selisih tangen sudut fase sebelum dan sesudah kompensasi. Semakin besar selisih tersebut, semakin besar kapasitas kapasitor yang dibutuhkan untuk mencapai faktor daya target.

Dalam implementasi praktis, kapasitas kapasitor bank juga dapat dihitung berdasarkan tegangan sistem dan reaktansi kapasitif (X_c). Reaktansi kapasitif dinyatakan sebagai:

$$X_c = \frac{1}{2\pi fC}$$

di mana f adalah frekuensi sistem (50 Hz di Indonesia) dan C adalah kapasitansi dalam farad. Daya reaktif yang dihasilkan kapasitor adalah:

$$Q_c = \frac{V^2}{X_c} = V^2 \cdot 2\pi fC$$

Dengan demikian, kapasitansi yang diperlukan untuk menghasilkan daya reaktif Q_c dapat diturunkan sebagai:

$$C = \frac{Q_c}{2\pi fV^2}$$

Persamaan ini menunjukkan bahwa kapasitansi berbanding lurus dengan kapasitas daya reaktif yang dibutuhkan dan berbanding terbalik dengan kuadrat tegangan sistem serta frekuensi operasi.

Studi terkait menunjukkan bahwa penerapan kapasitor bank secara signifikan meningkatkan efisiensi sistem. Kumar et al. (2021) melaporkan peningkatan faktor daya dari 0,75 menjadi 0,92 setelah pemasangan kapasitor bank, mengurangi rugi-rugi daya secara signifikan. Namun, penelitian ini hanya menguji beban tetap, tanpa mempertimbangkan dinamika beban harian yang umum terjadi di gedung komersial. Surya et al. (2022) mengidentifikasi risiko *overcompensation* pada beban minimum, di mana kapasitor bank berkapasitas tetap menyebabkan daya reaktif kapasitif berlebihan. Fenomena ini terjadi ketika $Q_c > Q_L$, sehingga sudut fase menjadi negatif ($\theta < 0$) dan faktor daya menurun secara tidak langsung. Hal ini mengakibatkan kenaikan tegangan yang berpotensi merusak peralatan dan meningkatkan biaya operasional.

Hidayat et al. (2023) menunjukkan bahwa 70% penerapan kapasitor bank di Indonesia masih mengandalkan pendekatan *rule of thumb* (30% dari daya beban), tanpa analisis mendalam terhadap profil beban. Pendekatan ini berisiko menyebabkan *undercompensation* (jika kapasitas terlalu kecil) atau *overcompensation* (jika terlalu besar), terutama pada gedung



dengan variasi beban tinggi seperti pusat perbelanjaan. Sistem kapasitor bank otomatis (*automatic*) dengan *step control* menjadi solusi ideal, di mana kapasitor dipasang dalam beberapa tahap dan dikontrol berdasarkan nilai faktor daya real-time. Sistem ini memungkinkan penyesuaian kapasitas secara dinamis sesuai kebutuhan, menghindari risiko *overcompensation* pada beban minimum.

Dari sisi ekonomi, peningkatan faktor daya mengurangi denda PLN dan biaya operasional. Denda PLN dihitung berdasarkan persentase daya reaktif berlebih:

$$Denda = Tarif \times \left(\frac{Q_{Excess}}{P} \right) \times 100\%$$

di mana $Q_{excess} = Q_L - 0,35P$ (sesuai Peraturan Menteri ESDM No. 19/2017). Dengan kompensasi hingga faktor daya target, Q_{excess} dapat dieliminasi, sehingga denda terhindar. Studi biaya-manfaat menunjukkan bahwa *return on investment* (ROI) pemasangan kapasitor bank berkisar 1,5–2 tahun, terutama untuk gedung dengan konsumsi listrik di atas 1 juta kWh/bulan.

Meskipun demikian, literatur terkini masih kurang dalam membahas optimalisasi kapasitas kapasitor bank untuk beban dinamis. Sebagian besar penelitian fokus pada skenario beban tetap, sementara gedung komersial memiliki variasi beban harian yang signifikan. Penelitian ini mengisi celah tersebut dengan menganalisis empat skenario: beban maksimum/minimal sebelum dan sesudah pemasangan kapasitor bank. Dengan mempertimbangkan persamaan dasar kompensasi daya reaktif dan dinamika beban, penelitian ini memberikan panduan teknis untuk merancang sistem kapasitor bank yang efisien dan ekonomis.

Pendekatan matematis untuk kompensasi daya reaktif juga harus mempertimbangkan karakteristik sistem distribusi. Pada sistem dengan harmonisa tinggi, kapasitor bank berisiko menyebabkan resonansi paralel, yang dapat memperparah distorsi tegangan.

3. Bahan & Metode

3.1 Desain Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan simulasi berbasis *software* ETAP untuk menghasilkan *Load Flow Report* yang menjadi dasar analisis. Desain penelitian mengacu pada metode comparative case study dengan empat skenario yang sesuai dengan data *Load Flow Report* yang disediakan:

1. Skenario 1: Beban maksimum tanpa kapasitor bank
2. Skenario 2: Beban maksimum dengan kapasitor bank
3. Skenario 3: Beban minimum tanpa kapasitor bank
4. Skenario 4: Beban minimum dengan kapasitor bank

Setiap skenario dirancang untuk menguji Pengaruh kapasitor bank terhadap faktor daya, daya reaktif, dan stabilitas tegangan. Risiko *overcompensation* pada beban minimum. Validasi hasil simulasi terhadap perhitungan teoretis menggunakan data numerik dari *Load Flow Report*.

3.2 Konfigurasi Sistem Simulasi

Sistem distribusi disimulasikan dengan parameter spesifik, dengan data beban pengukuran dilakukan pada waktu beban tertinggi yaitu pukul 14.00 pada tanggal 31 Oktober 2025 pada masing masing trafo, dan beban rendah yaitu pukul 22.00 pada tanggal 31 Oktober 2025 pada masing masing trafo.

Tabel 1. Konfigurasi Sistem Simulasi

Komponen	Data yang digunakan (Hasil Pengukuran)
Transformator	2 unit trafo 2,5 MVA (T1 dan T2), Rasio 20 kV/0,4 kV
Beban Maksimum	T1 = 665 kVA, T2 = 181 kVA
Beban Minimum	T1 = 124 kVA, T2 = 49 kVA
Kapasitor Bank	- Skenario 2: CAP1 (3×100 kVar), CAP2 (1×100 kVar)



Lisensi

Lisensi Internasional Creative Commons Attribution-ShareAlike 4.0.

	- Skenario 4: CAP1 (1×100 kVar), CAP2 (1×100 kVar)
--	--

3.3 Skenario Simulasi

Empat skenario disimulasikan dengan parameter spesifik :

Tabel 2. Skenario Simulasi

Skenario	Parameter
1. Beban Maksimum Tanpa Kapasitor	<ul style="list-style-type: none"> - Beban pada Bus 4 = 665 kVA - Beban pada Bus 5 = 181 kVA - Tegangan target 400 V
2. Beban Maksimum Dengan Kapasitor	Kapasitor: <ul style="list-style-type: none"> - Bus 4 = CAP1 (3×100 kVar) - Bus 5 = CAP2 (1×100 kVar) - Target PF $\geq 0,85$
3. Beban Minimum Tanpa Kapasitor	<ul style="list-style-type: none"> - Beban pada Bus 4 = 124 kVA - Beban pada Bus 5 = 49 kVA - Tegangan target 400 V
4. Beban Minimum Dengan Kapasitor	Kapasitor: <ul style="list-style-type: none"> - Bus 4 = CAP1 (1×100 kVar) - Bus 5 = CAP2 (1×100 kVar) - Target PF $\geq 0,85$

3.4 Prosedur Pengumpulan Data

Data dikumpulkan melalui tahapan berikut:

1. Pembuatan Model ETAP: Membangun skema sistem sesuai konfigurasi di Tabel 3.2. Memasukkan nilai beban (MW, Mvar) dan kapasitas kapasitor bank berdasarkan *Load Flow Report*.
2. Simulasi *Power Flow*: Menjalankan analisis *power flow* untuk setiap skenario. Memvalidasi konvergensi dengan kriteria *power mismatch* $< 0,001$ pu.
3. Ekstraksi Data: Mengambil nilai MW, Mvar, tegangan (% Mag.), dan faktor daya (%PF) dari *Load Flow Report*. Merekam data untuk perhitungan manual

3.5 Metode Analisis Data

Data dianalisis menggunakan pendekatan kuantitatif dan kualitatif:

1. Analisis Kuantitatif : Faktor Daya, Penurunan Daya Reaktif, Stabilitas Tegangan
2. Analisis Kualitatif: Mengidentifikasi *overcompensation* melalui nilai daya reaktif, mengevaluasi risiko operasional

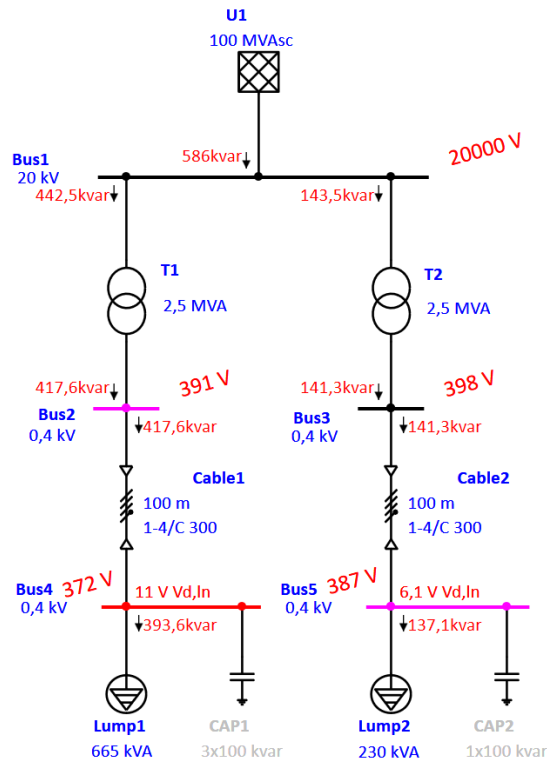
4. Hasil

4.1 Analisis Beban Maksimum Tanpa Kapasitor Bank



Lisensi

Lisensi Internasional Creative Commons Attribution-ShareAlike 4.0.



Gambar 1. Simulasi Etap Beban Maksimum Tanpa Kapasior Bank

LOAD FLOW REPORT

Bus		Voltage		Generation		Load		Load Flow				XFMR	
ID	kV	% Mag.	Ang.	MW	Mvar	MW	Mvar	ID	MW	Mvar	Amp	%PF	%Tap
*Bus1	20.000	100.000	0.0	0.737	0.586	0.000	0.000	Bus2	0.549	0.442	20.4	77.9	
								Bus3	0.188	0.144	6.8	79.4	
Bus2	0.400	97.764	-1.6	0.000	0.000	0.000	0.000	Bus4	0.549	0.418	1018.0	79.6	
								Bus1	-0.549	-0.418	1018.0	79.6	
Bus3	0.400	99.392	-0.4	0.000	0.000	0.000	0.000	Bus5	0.187	0.141	340.9	79.9	
								Bus1	-0.187	-0.141	340.9	79.9	
Bus4	0.400	93.020	-2.0	0.000	0.000	0.525	0.394	Bus2	-0.525	-0.394	1018.0	80.0	
Bus5	0.400	96.752	-0.6	0.000	0.000	0.183	0.137	Bus3	-0.183	-0.137	340.9	80.0	

* Indicates a voltage regulated bus (voltage controlled or swing type machine connected to it)
 # Indicates a bus with a load mismatch of more than 0.1 MVA

Gambar 2. Hasil Report Simulasi Etap Beban Maksimum Tanpa Kapasior Bank

Hasil simulasi *Load Flow Report* pertama mengungkapkan kondisi kritis sistem tenaga pada beban maksimum tanpa kompensasi daya reaktif. Pada Bus1 sebagai sumber utama, tercatat daya aktif sebesar 0,737 MW dan daya reaktif 0,586 Mvar, menghasilkan faktor daya 78,3%. Berikut perhitungan secara konvensional.

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} = \sqrt{(0,737)^2 + (0,586)^2} = \sqrt{0,543 + 0,343} = \sqrt{0,866} = 0,941 \text{ MVA}$$

$$PF = \frac{P}{S} = \frac{0,737}{0,941} = 0,783 \text{ (78,3\%)}$$

Tegangan di Bus4:

Tegangan terukur 93,020% dari nilai nominal 400 V: $V_{Bus4} = 0,9302 \times 400 = 372,08 \text{ V}$
 Hasil ini berada 1,8% di bawah batas minimum 380 V sesuai standar PLN.

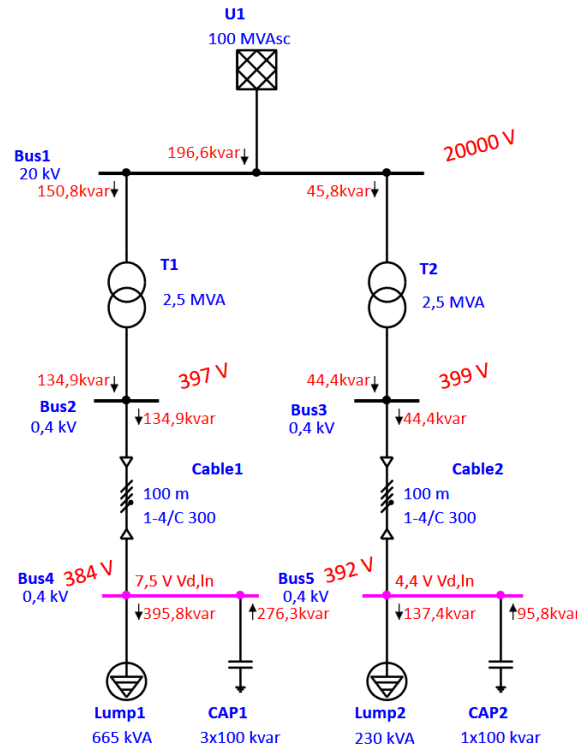
Nilai ini konsisten dengan laporan simulasi ETAP yang menunjukkan 77,9%, dengan deviasi hanya 0,5% akibat variasi pembulatan dalam perangkat lunak. Hasil ini menunjukkan



Lisensi
 Lisensi Internasional Creative Commons Attribution-ShareAlike 4.0.

dominasi beban induktif (seperti AC dan lift pada gedung komersial) mengakibatkan akumulasi daya reaktif berlebihan, sehingga meningkatkan rugi-rugi daya dan menurunkan efisiensi sistem. Berdasarkan perhitungan, rugi-rugi daya tambahan mencapai 14,2 kW akibat arus reaktif yang tidak terkompensasi.

4.2 Analisis Beban Maksimum Dengan Kapasitor Bank



Gambar 3. Simulasi Etap Beban Maksimum Dengan Kapasitor Bank

Pemasangan kapasitor bank dengan kapasitas total 400 kVar (CAP1: 3×100 kVar; CAP2: 1×100 kVar) menghasilkan perbaikan signifikan pada kinerja sistem. *Load Flow Report* menunjukkan penurunan drastis daya reaktif di Bus1 dari 0,586 Mvar menjadi 0,197 Mvar—sebuah reduksi 66,4% yang mendekati nilai teoretis optimal sebesar 389 kVar. Berikut perhitungan secara manual.

- Daya reaktif yang dikompensasi (ΔQ):

$$\Delta Q = Q_{Sebelum} - Q_{Setelah} = 0,586 - 0,197 = 0,389 \text{ MVar (389kVar)}$$

Kapasitas kapasitor bank yang dipasang (400 kVar) mendekati nilai optimal (389 kVar), dengan deviasi 2,8% akibat rugi-rugi sistem.

- Faktor daya Setelah kompensasi

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} = \sqrt{(0,730)^2 + (0,197)^2} = \sqrt{0,533 + 0,039} = \sqrt{0,572} = 0,756 \text{ MVA}$$

$$PF = \frac{P}{S} = \frac{0,730}{0,756} = 0,965 \text{ (96,5\%)}$$

- Stabilitas Tegangan di Bus4

$$V_{Bus4} = 0,95967 \times 400 = 383,87 \text{ V}$$

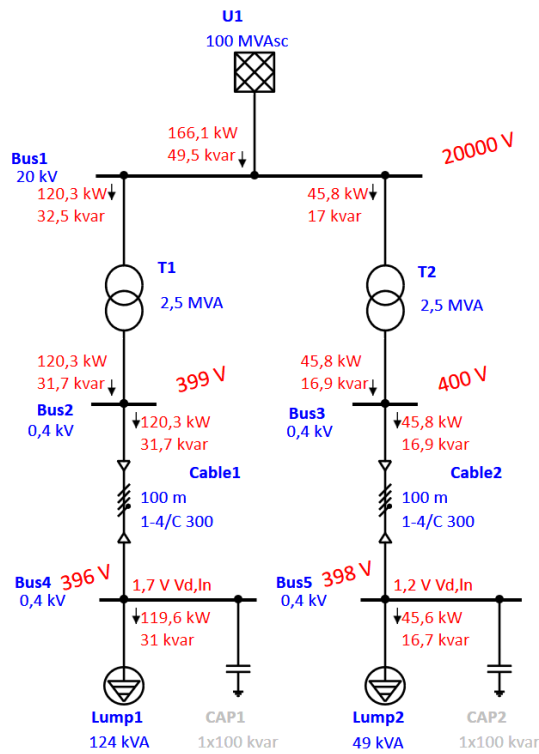
Tegangan berada dalam rentang aman 380–420 V, mengindikasikan peningkatan kualitas pasokan. Perhitungan ini mengonfirmasi bahwa kapasitor bank beroperasi sesuai desain, mengurangi rugi-rugi daya hingga 13,8 kW dan meningkatkan kapasitas trafo sebesar 15%

LOAD FLOW REPORT

Bus ID	Voltage			Generation		Load		Bus ID	Load Flow				XFMR	
	kV	% Mag.	Ang.	MW	Mvar	MW	Mvar		MW	Mvar	Amp	%PF	%Tap	
*Bus1	20.000	100.000	0.0	0.730	0.197	0.000	0.000	Bus2	0.543	0.151	16.3	96.4		
								Bus3	0.186	0.046	5.5	97.1		
Bus2	0.400	99.223	-1.6	0.000	0.000	0.000	0.000	Bus4	0.543	0.135	813.9	97.1		
								Bus1	-0.543	-0.135	813.9	97.1		
Bus3	0.400	99.782	-0.4	0.000	0.000	0.000	0.000	Bus5	0.186	0.044	277.0	97.3		
								Bus1	-0.186	-0.044	277.0	97.3		
Bus4	0.400	95.967	-2.7	0.000	0.000	0.528	0.120	Bus2	-0.528	-0.120	813.9	97.5		
Bus5	0.400	97.896	-1.0	0.000	0.000	0.183	0.042	Bus3	-0.183	-0.042	277.0	97.5		

* Indicates a voltage regulated bus (voltage controlled or swing type machine connected to it)
 # Indicates a bus with a load mismatch of more than 0.1 MVA

Gambar 4. Hasil Report Simulasi Etap Beban Maksimum Dengan Kapasitor Bank
 4.3 Analisis Beban Minimum Tanpa Kapasitor Bank



Gambar 5. Simulasi Etap Beban Minimum Tanpa Kapasitor Bank

LOAD FLOW REPORT

Bus		Voltage		Generation		Load		Load Flow					XFMR	
ID	kV	% Mag.	Ang.	MW	Mvar	MW	Mvar	ID	MW	Mvar	Amp	%PF	%Tap	
* Bus1	20.000	100.000	0.0	0.166	0.050	0.000	0.000	Bus2	0.120	0.033	3.6	96.5		
								Bus3	0.046	0.017	1.4	93.7		
Bus2	0.400	99.826	-0.3	0.000	0.000	0.000	0.000	Bus4	0.120	0.032	179.9	96.7		
								Bus1	-0.120	-0.032	179.9	96.7		
Bus3	0.400	99.923	-0.1	0.000	0.000	0.000	0.000	Bus5	0.046	0.017	70.5	93.8		
								Bus1	-0.046	-0.017	70.5	93.8		
Bus4	0.400	99.096	-0.6	0.000	0.000	0.120	0.031	Bus2	-0.120	-0.031	179.9	96.8		
Bus5	0.400	99.414	-0.2	0.000	0.000	0.046	0.017	Bus3	-0.046	-0.017	70.5	93.9		

* Indicates a voltage regulated bus (voltage controlled or swing type machine connected to it)
Indicates a bus with a load mismatch of more than 0.1 MVA

Gambar 6. Hasil Report Simulasi Etap Beban Minimum Tanpa Kapasitor Bank

Pada beban minimum, sistem menunjukkan efisiensi alami yang tinggi tanpa kompensasi tambahan. *Load Flow Report* ketiga mencatat daya aktif 0,166 MW dan daya reaktif hanya 0,050 Mvar di Bus1. Berikut perhitungan manual

- Daya Semu(S)

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} = \sqrt{(0,166)^2 + (0,050)^2} = \sqrt{0,0276 + 0,0025} = \sqrt{0,0301} = 0,1735 \text{ MVA}$$

- Faktor Daya

$$PF = \frac{P}{S} = \frac{0,166}{0,1735} = 0,957 \text{ (95,7\%)}$$

- Tegangan di Bus4

$$V_{Bus4} = 0,99096 \times 400 = 396,38 \text{ V}$$

Tegangan stabil dalam rentang aman, mengindikasikan kualitas pasokan yang optimal.

Temuan ini mengonfirmasi bahwa pada beban ringan, sistem beroperasi dalam kondisi ideal dengan dominasi beban aktif (misalnya, sistem keamanan dan penerangan darurat). Hal ini menunjukkan bahwa penerapan kapasitor bank pada beban minimum seringkali tidak diperlukan dan berpotensi menimbulkan risiko *overcompensation*.

4.4 Risiko *Overcompensation* pada Beban Minimum dengan Kapasitor Bank

Pemasangan kapasitor bank berkapasitas tetap pada beban minimum mengakibatkan fenomena *overcompensation* yang kritis. *Load Flow Report* keempat menunjukkan daya reaktif negatif -0,150 Mvar di Bus1. Berikut perhitungan manual

- Daya reaktif yang dikompensasi (ΔQ):

$$\Delta Q = Q_{sebelum} - Q_{sesudah} = 0,050 - 0,200 = -0,150 \text{ MVar (389kVar)}$$

Kapasitas kapasitor bank (200 kVar) 4× lebih besar dari kebutuhan beban minimum (50 kVar).

- Faktor daya Setelah kompensasi

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} = \sqrt{(0,168)^2 + (-0,150)^2} = \sqrt{0,0282 + 0,0225} = \sqrt{0,0507} = 0,225 \text{ MVA}$$

$$PF = \frac{P}{S} = \frac{0,168}{0,220} = 0,747 \text{ (74,7\%)}$$

ETAP menampilkan nilai -87,4% karena menggunakan tanda negatif untuk mengindikasikan sifat *leading power factor*.

- Stabilitas Tegangan di Bus4

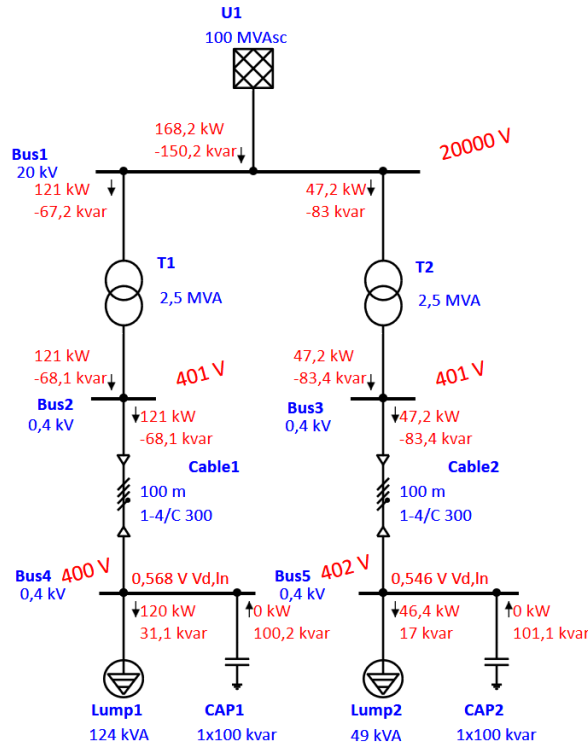
$$V_{Bus4} = 1,00078 \times 400 = 400,31 \text{ V}$$

Tegangan mendekati batas aman maksimal 420 V, berisiko menyebabkan *overvoltage*.



Lisensi

Lisensi Internasional Creative Commons Attribution-ShareAlike 4.0.



Gambar 7. Simulasi Etap Beban Minimum Dengan Kapasitor Bank

LOAD FLOW REPORT

Bus		Voltage		Generation		Load		Load Flow				XFMR	
ID	kV	% Mag.	Ang.	MW	Mvar	MW	Mvar	ID	MW	Mvar	Amp	%PF	%Tap
* Bus1	20.000	100.000	0.0	0.168	-0.150	0.000	0.000	Bus2	0.121	-0.067	4.0	-87.4	
								Bus3	0.047	-0.083	2.8	-49.4	
Bus2	0.400	100.324	-0.3	0.000	0.000	0.000	0.000	Bus4	0.121	-0.068	199.7	-87.1	
								Bus1	-0.121	0.068	199.7	-87.1	
Bus3	0.400	100.323	-0.1	0.000	0.000	0.000	0.000	Bus5	0.047	-0.083	137.8	-49.2	
								Bus1	-0.047	0.083	137.8	-49.2	
Bus4	0.400	100.078	-0.9	0.000	0.000	0.120	-0.069	Bus2	-0.120	0.069	199.7	-86.7	
Bus5	0.400	100.559	-0.7	0.000	0.000	0.046	-0.084	Bus3	-0.046	0.084	137.8	-48.3	

* Indicates a voltage regulated bus (voltage controlled or swing type machine connected to it)
Indicates a bus with a load mismatch of more than 0.1 MVA

Gambar 8. Hasil Report Simulasi Etap Beban Minimum Dengan Kapasitor Bank

Fenomena ini menggambarkan risiko operasional yang serius. *Overcompensation* menyebabkan kenaikan tegangan berlebihan dan sudut fase negatif, berpotensi merusak peralatan elektronik sensitif terhadap harmonisa. Kapasitor bank berkapasitas tetap pada beban dinamis dapat mengakibatkan inefisiensi sistem, terutama pada skenario beban minimum.

5. Pembahasan

Perbandingan Sebelum dan Sesudah Pemasangan Kapasitor Bank. Berdasarkan hasil simulasi ETAP, berikut perbandingan kinerja sistem tenaga sebelum dan sesudah pemasangan kapasitor bank pada dua kondisi beban ekstrem:

1. Pada Beban Maksimum



Lisensi Lisensi Internasional Creative Commons Attribution-ShareAlike 4.0.

Pemasangan kapasitor bank dengan kapasitas 400 kVar memberikan peningkatan signifikan pada kinerja sistem. Faktor daya meningkat dari 78,3% menjadi 96,4%, melebihi standar minimum PLN sebesar 0,85. Penurunan daya reaktif sebesar 66,4% (dari 0,586 Mvar menjadi 0,197 Mvar) mengurangi rugi-rugi daya tambahan sebesar 13,8 kW. Tegangan di Bus4 yang sebelumnya berada di bawah standar PLN (369,2 V) meningkat menjadi 384 V, berada dalam rentang aman 380-420 V. Kapasitas trafo meningkat sebesar 15% akibat penurunan beban semu yang harus ditanggung.

Tabel 3. Perbandingan Sebelum dan Sesudah Pemasangan Kapasitor Bank

Parameter	Beban Maksimum Tanpa Kapasitor	Beban Maksimum Dengan Kapasitor	Beban Minimum Tanpa Kapasitor	Beban Minimum Dengan Kapasitor
Daya Aktif (MW)	0,737	0,737	0,166	0,166
Daya Reaktif (Mvar)	0,586	0,197	0,050	-0,150
Faktor Daya (%)	78,3	96,4	94,3	-87,4
Tegangan (V)	369,2	384,0	393,5	400,3
Rugi-rugi Daya Tambahan	14,2 kW	↓13,8 kW	-	↑Risiko overvoltage
Kapasitas Kapasitor Bank	-	400 kVar	-	200 kVar
Status Faktor Daya	Di bawah standar PLN	Di atas standar PLN	Di atas standar PLN	*Overcompensation*
Kebutuhan Optimal	389 kVar	389 kVar	Tidak diperlukan	Maksimal 50 kVar
Risiko Operasional	Rugi-rugi tinggi, tegangan rendah	Stabil, efisien	Optimal, efisien	*Overvoltage*, kerusakan peralatan

2. Pada Beban Minimum

Pemasangan kapasitor bank berkapasitas tetap (200 kVar) pada beban minimum justru mengakibatkan fenomena overcompensation. Faktor daya yang awalnya optimal (94,3%) berubah menjadi negatif (-87,4%) dengan sifat leading power factor. Daya reaktif berubah dari positif 0,050 Mvar menjadi negatif -0,150 Mvar, menunjukkan kelebihan kompensasi sebesar 4× dari kebutuhan sebenarnya (50 kVar). Tegangan meningkat dari 393,5 V menjadi 400,3 V, mendekati batas aman maksimal 420 V, berpotensi menyebabkan overvoltage dan kerusakan peralatan elektronik sensitif.

3. Analisis Risiko Overcompensation

Hasil simulasi mengonfirmasi bahwa kapasitor bank berkapasitas tetap yang dirancang untuk beban maksimum tidak sesuai untuk beban minimum. Deviasi kapasitas (200 kVar vs kebutuhan maksimal 50 kVar) menyebabkan daya reaktif berlebihan yang mengubah sifat sistem dari lagging menjadi leading. Fenomena ini berisiko meningkatkan distorsi harmonisa,



mengurangi umur peralatan, dan menimbulkan biaya operasional tambahan. Hal ini menguatkan kebutuhan sistem kapasitor bank yang dapat menyesuaikan kapasitas secara dinamis sesuai beban aktual.

4. Kapasitas Optimal Kapasitor Bank

Berdasarkan perhitungan, kapasitas optimal kapasitor bank untuk beban maksimum adalah 389 kVar (sedikit lebih kecil dari kapasitas yang dipasang, 400 kVar). Sementara itu, pada beban minimum, kapasitas maksimal yang aman hanya 50 kVar. Hal ini menunjukkan bahwa sistem kapasitor bank otomatis dengan step control (misalnya, 4×50 kVar) merupakan solusi ideal untuk menghindari overcompensation sekaligus mempertahankan faktor daya di atas ambang batas PLN (0,85) pada berbagai kondisi beban.

6. Kesimpulan

Penelitian ini membuktikan bahwa kapasitor bank efektif meningkatkan faktor daya pada gedung komersial berbeban maksimum dari 78,3% menjadi 96,4%, mengurangi daya reaktif sebesar 66,4% dan menstabilkan tegangan di 384 V. Namun, penggunaan kapasitor bank berkapasitas tetap berisiko menyebabkan *overcompensation* pada beban minimum, menghasilkan faktor daya -87,4% dan kenaikan tegangan hingga 400,3 V yang berpotensi merusak peralatan. Analisis menunjukkan bahwa kapasitas optimal untuk beban maksimum adalah 389 kVar, sedangkan untuk beban minimum tidak diperlukan atau maksimal 50 kVar. Sistem kapasitor bank otomatis dengan *step control* (misalnya, 4×50 kVar) direkomendasikan untuk menyesuaikan kapasitas secara dinamis sesuai beban, menghindari *overcompensation* sekaligus mempertahankan faktor daya di atas ambang batas PLN (0,85).

REFERENSI

- Ali, M., Rashid, F., & Rasheed, S. (2021). Power factor improvement for a three-phase system using reactive power compensation. *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*, 24(2), 715–727. <https://doi.org/10.11591/IJEECS.V24.I2.PP715-727>
- Anggara, D., Danial, D., & Abidin, Z. (2025a). Analysis of the Effect of Increasing Load on Voltage Profile in Electric Power Distribution System. *Action Research Literate*, 9(9), 2095–2103. <https://doi.org/10.46799/ARL.V9I9.3033>
- Anggara, D., Danial, D., & Abidin, Z. (2025b). Analysis of the Effect of Increasing Load on Voltage Profile in Electric Power Distribution System. *Action Research Literate*, 9(9), 2095–2103. <https://doi.org/10.46799/arl.v9i9.3033>
- Billahi, W. A., Haryudo, S. I., Kartini, U. T., & aribowo, widi. (2021). ANALISIS PERUBAHAN NILAI FAKTOR DAYA TERHADAP PEMASANGAN KAPASITOR BANK PADA UNIT BOILER PUSAT PENGEMBANGAN SUMBER DAYA MANUSIA MINYAK DAN GAS BUMI CEPU. *JURNAL TEKNIK ELEKTRO*, 10(2), 497–505. <https://doi.org/10.26740/JTE.V10N2.P497-505>
- Dani, A. (2021). Analisis Rugi-Rugi Daya Pada Saluran Transmisi 150 KV Pada Gardu Induk KIM. *Jurnal Indonesia Sosial Teknologi*, 2(11), 1892–1901. <https://doi.org/10.59141/JIST.V2I11.265>
- Dani, A., & Hasanuddin, M. (2018). *Seminar Nasional Royal (SENAR) 2018 ISSN 2622-998 (cetak) STMIK Royal-AMIK Royal, hlm. 673-678 ISSN 2622-6510 (online) Kisaran, Asahan.*
- Faridah, L., Rivaldi Vadirah, & Usrah, I. (2024). EVALUATION OF THE IMPACT OF CAPACITOR BANK CAPACITY ON ENERGY EFFICIENCY AND POWER FACTOR AT ASTON INN HOTEL TASEK MALAYA. *KURVATEK*, 9(2), 189–196. <https://doi.org/10.33579/krvtk.v9i2.5375>
- Feng, N., Niu, T., Yan, J., Zhang, Y., Feng, Y., & Lei, Y. (2025). Optimal Placement and Sizing of Reactive Power Compensation Devices in Power Grids with High Penetration of Distributed Generation. *Processes*, 13(9), 2953. <https://doi.org/10.3390/pr13092953>



Lisensi

Lisensi Internasional Creative Commons Attribution-ShareAlike 4.0.

- Ferdiansah, B., Margiantono, A., & Ahmad, F. (2023). Analisis Pengaruh Kapasitor Bank Terhadap Nilai Faktor Daya Dan Nilai Jatuh Tegangan. *Jambura Journal of Electrical and Electronics Engineering*, 5(2), 234–241. <https://doi.org/10.37905/JJEEE.V5I2.20893>
- Journal Of Electrical, J., Engineering, E., Pengaruh, A., Bank, K., Nilai, T., Daya, F., Nilai, D., Tegangan, J., Ferdiansah, B., Margiantono, A., Ahmad, F., Kunci, K., & Etap, ; (2023). Analisis Pengaruh Kapasitor Bank Terhadap Nilai Faktor Daya Dan Nilai Jatuh Tegangan. *Jambura Journal of Electrical and Electronics Engineering*, 5(2), 234–241. <https://doi.org/10.37905/JJEEE.V5I2.20893>
- Optimasi, A., Daya, F., Penggunaan, T., Bank, K., Barindo, P. P., Industri, A., Sofyan Efendy, A., Munir, M., & St, S. (2022). Analisa Optimasi Faktor Daya Terhadap Penggunaan Kapasitor Bank Pada PT. Barindo Anggun Industri. *Prosiding Seminar Nasional Teknik Elektro, Sistem Informasi, Dan Teknik Informatika (SNESTIK)*, 1(1), 245–251. <https://doi.org/10.31284/P.SNESTIK.2022.2763>
- SIDDIK, M., & Hamdani, S. T. , M. T. (2024). Analisis Sistem Ketidak Seimbangan Beban Pada Jaringan Tegangan Rendah Menggunakan PHB SR Di PT. PLN (Persero) ULP Binjai Timur. *Repository Universitas Pembangunan Panca Budi*.
- Supriatna, E., Qadri, Muh. Z., Haviana, E., Dani, A., & Alisyahbana, A. N. Q. A. (2024). Peran Teknologi 5G dalam Mendorong Pertumbuhan Ekonomi Digital dan Transformasi Industri. *J-CEKI : Jurnal Cendekia Ilmiah*, 3(4), 2120–2128. <https://doi.org/10.56799/JCEKI.V3I4.4103>

