

Optimalisasi Faktor Daya dan Reduksi Rugi Daya Menggunakan Capacitor Bank Berbasis MATLAB Simulink

Fatahilal Rosyid Agusta¹, Yenni Afrida², Fitriono³, Dasweptia⁴, Hamimi⁵, Jekson⁶, Yudi Eka Putra⁷

Program Studi Teknik Elektro, Universitas Muhammadiyah Lampung, Jl. Z.A Pagar Alam No.14
Bandar Lampung 35142

Received: 27-01-2026
Accepted: 11-06-2026

Keywords:

Capacitor Bank;
Inductive Load;
Matlab Simulink;
Power Factor;;
Low-Voltage Distribution
System

Correspondent Email:

Yenniafrida2016@gmail.com

Abstrak. Penelitian ini menganalisis profil faktor daya dan kebutuhan kompensasi daya reaktif pada 52 pelanggan tiga fase tegangan rendah PT PLN (Persero) ULP Karang, Bandar Lampung. Berdasarkan data telemetering AMICON, faktor daya rata-rata terukur sebesar 0,755 ($SD = 0,082$), dengan seluruh pelanggan berada di bawah ambang PLN sebesar 0,85. Daya aktif total terukur sebesar 134,05 kW dan daya reaktif sebesar 118,24 kVAR, dengan faktor beban rata-rata 63% dari daya kontrak. Perhitungan kebutuhan kompensasi menggunakan persamaan $Q_c = P(\tan \phi_1 - \tan \phi_2)$ menghasilkan total 99,14 kVAR untuk mencapai target $\cos \phi = 0,99$. Simulasi MATLAB Simulink pada model beban berdasarkan rating kontrak memverifikasi efektivitas kompensasi, dengan penurunan daya reaktif model sebesar 63% (dari 65.768 VAR menjadi 24.521 VAR) dan peningkatan daya aktif tersalur di sisi sumber sebesar 30,4% akibat berkurangnya rugi-rugi saluran I^2R . Analisis sensitivitas menunjukkan bahwa target $\cos \phi = 0,90$ lebih ekonomis dengan kebutuhan 53,3 kVAR. Penelitian ini menghasilkan peta kebutuhan kapasitor bank berbasis data lapangan yang akurat sebagai acuan operasional bagi PLN.

Abstract. This study analyzes the power factor profile and reactive power compensation requirements of 52 three-phase low-voltage customers of PT PLN (Persero) ULP Karang, Bandar Lampung. Based on AMICON telemetering data, the average measured power factor is 0.755 ($SD = 0.082$), with all customers below the PLN threshold of 0.85. Total measured active power is 134.05 kW and reactive power 118.24 kVAR, with an average load factor of 63% relative to contracted capacity. Compensation requirements calculated using $Q_c = P(\tan \phi_1 - \tan \phi_2)$ yield a total of 99.14 kVAR to achieve a target power factor of 0.99. MATLAB/Simulink simulations based on contracted load ratings verify the compensation effectiveness, showing a 63% reduction in model reactive power (from 65,768 VAR to 24,521 VAR) and a 30.4% increase in delivered active power at the source due to reduced I^2R line losses. Sensitivity analysis shows a target of 0.90 is more economical at 53.3 kVAR. This study contributes a field-data-based capacitor bank sizing map as an operational reference for PLN.

1. PENDAHULUAN

Kualitas faktor daya pada jaringan distribusi tegangan rendah berdampak langsung pada efisiensi sistem tenaga listrik dan biaya operasional. Beban induktif yang umum digunakan di sektor komersial — seperti motor

listrik, Air conditioner (AC), pompa air, dan peralatan berbasis kumparan — menghasilkan daya reaktif yang menurunkan nilai faktor daya ($\cos \phi$) di bawah nilai ideal [1]. Akibatnya, arus yang mengalir pada jaringan menjadi lebih besar dari kebutuhan sebenarnya, sehingga

meningkatkan rugi-rugi daya I^2R pada konduktor dan transformator distribusi [2]. PT PLN (Persero) menetapkan batas minimum faktor daya sebesar 0,85 sesuai dengan Peraturan Menteri ESDM No. 28 Tahun 2016 [12]. Pelanggan dengan faktor daya di bawah ambang ini dikenai biaya kVARh — yakni biaya atas konsumsi energi reaktif yang tidak produktif — yang merupakan kerugian finansial bagi pelanggan sekaligus indikator inefisiensi sistem bagi PLN. Studi menunjukkan bahwa setiap penurunan faktor daya dari 0,85 menjadi 0,70 dapat meningkatkan rugi-rugi saluran hingga 47% pada arus yang sama [3]. Solusi teknis yang terbukti efektif dan ekonomis adalah pemasangan capacitor bank sebagai kompensator daya reaktif paralel pada sisi beban [4]. Namun perlu diperhatikan bahwa overcompensation dapat menyebabkan leading power factor yang justru meningkatkan tegangan jaringan, dan harmonisa dari beban nonlinier dapat mengurangi efektivitas kapasitor — kedua aspek ini merupakan limitasi yang perlu dipertimbangkan dalam implementasi lapangan.

Penelitian terdahulu umumnya dilakukan pada skala tunggal (satu fasilitas) atau menggunakan data beban yang diasumsikan. Penelitian pada skala ULP yang mencakup puluhan pelanggan heterogen dengan data telemetering yang nyata masih terbatas. Penelitian ini bertujuan untuk menjawab: (1) Bagaimana profil faktor daya aktual 52 pelanggan tiga fase ULP Karang berdasarkan data AMICON, termasuk faktor beban dan distribusi statistik? (2) Berapa kebutuhan capacitor bank per pelanggan, dan bagaimana sensitivitasnya terhadap variasi target, termasuk estimasi pengurangan loss? (3) Apakah simulasi MATLAB Simulink dapat memverifikasi efektivitas kompensasi? Kontribusi utama penelitian ini adalah peta kebutuhan capacitor bank berbasis data lapangan nyata dari 52 pelanggan ULP Karang, disertai analisis faktor beban dan sensitivitas, sebagai acuan operasional PLN.

2. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Perbaikan Faktor Daya Dengan Capacitor Bank

Faktor daya didefinisikan sebagai rasio daya aktif (P) terhadap daya semu (S) [15]. Faktor daya sendiri dirumuskan dengan rumus sebagai berikut:

$$\text{Faktor Daya} = \frac{P}{S} = \cos \varphi \quad (1)$$

Keterangan:

P = daya aktif (Watt)

S = daya semu (Volt-Ampere)

$\cos \varphi$ = faktor daya

Pada beban induktif, arus tertinggal terhadap tegangan sehingga timbul daya reaktif Q yang tidak melakukan kerja nyata namun membebani saluran. Adapun Persamaan daya aktif ditunjukkan pada Persamaan (1).

$$P = V \times I \times \cos \varphi \quad (2)$$

Keterangan:

P = Daya Aktif (Watt)

V = Tegangan (Volt)

I = Arus (Ampere)

$\cos \varphi$ = Faktor Daya (selisih sudut antara tegangan dan arus).

Sementara itu daya reaktif merupakan daya yang diperlukan untuk membentuk medan magnet pada peralatan listrik induktif seperti motor dan transformator. Persamaan daya reaktif ditunjukkan pada Persamaan (2).

$$Q = V \times I \times \sin \varphi \quad (3)$$

Keterangan:

Q = Daya Reaktif (VAR)

V = Tegangan (Volt)

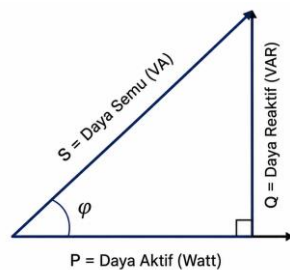
I = Arus (Ampere)

$\sin \varphi$ = Komponen sudut antara tegangan dan arus yang tidak menghasilkan daya nyata.

Sedangkan daya semu merupakan total daya yang disuplai oleh sumber listrik ke beban dan dinyatakan dalam satuan Volt-Ampere (VA). Persamaan daya semu ditunjukkan pada Persamaan (3).

$$S = V \times I \quad (4)$$

Hubungan ketiganya dinyatakan dalam gambar 1. segitiga daya berikut ini :



Gambar 1. Segitiga Daya S, P, dan Q

Pemasangan capacitor bank secara paralel menginjeksi arus kapasitif yang mengkompensasi komponen induktif dan meningkatkan faktor daya [11]. Untuk persamaan dasar sistem tiga fase tidak seimbang yang digunakan dalam penelitian ini:

$$P = (V_R \cdot I_R + V_S \cdot I_S + V_T \cdot I_T) \times \cos \varphi \quad (5)$$

$$Q = (V_R \cdot I_R + V_S \cdot I_S + V_T \cdot I_T) \times \sin \varphi \quad (6)$$

$$S = \frac{P}{\cos \varphi} \quad (7)$$

Kompensasi daya reaktif yang diperlukan untuk memperbaiki $\cos \varphi_1$ menjadi $\cos \varphi_2$:

$$Q_c = P \times (\tan \varphi_1 - \tan \varphi_2) \quad (8)$$

Kapasitansi yang dibutuhkan per fase:

$$C = \frac{Q_c}{2\pi \times f \times V^2} \text{ dengan } f = 50 \text{ Hz} \quad (9)$$

Rugi-rugi daya pada saluran akibat arus yang mengalir:

$$P_{losses} = 3 \times I^2 \times R_{saluran} \quad (10)$$

di mana pemasangan capacitor bank menurunkan I sehingga losses berkurang secara kuadratik.

2.2 MATLAB Simulink untuk Simulasi Sistem Tenaga

MATLAB Simulink merupakan platform simulasi berbasis diagram blok yang memungkinkan pemodelan sistem tenaga listrik secara visual dan kuantitatif. Model beban tiga fase dalam Simulink dikonstruksi

menggunakan blok RLC paralel yang nilainya diturunkan dari rating daya kontrak pelanggan dan faktor daya terukur. Penting untuk dicatat bahwa model Simulink merepresentasikan kondisi beban nominal (rating), sehingga nilai P dan Q yang dihasilkan mencerminkan daya kontrak, bukan daya terukur aktual dari data telemetering AMICON. Kedua representasi ini bersifat komplementer dan harus ditafsirkan sesuai konteksnya [13].

3. METODOLOGI PENELITIAN

3.1. Lokasi dan Waktu Penelitian

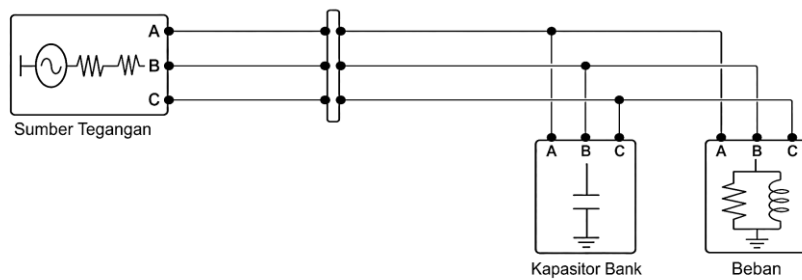
Penelitian dilaksanakan di PT PLN (Persero) ULP Karang, Jl. Diponegoro No. 14, Bandar Lampung. Pengambilan data dilakukan pada periode April–Juni 2025 menggunakan data telemetering harian sistem AMICON dengan interval sampling 30 menit.

3.2 Pengumpulan Data

Populasi penelitian adalah seluruh pelanggan tiga fase tegangan rendah (TR) di wilayah ULP Karang dengan faktor daya terukur di bawah 0,85. Data diambil dari pembacaan AMICON pada kondisi beban puncak (*peak load*) pada siang hari. Dari hasil penyaringan diperoleh 52 pelanggan yang memenuhi kriteria, terdiri dari pelanggan kategori komersial (ritel, perbankan, perkantoran, dan sejenisnya) dengan tarif B2. Data yang dikumpulkan meliputi: tegangan per fase (V_R, V_S, V_T dalam Volt), arus per fase (I_R, I_S, I_T dalam Ampere), dan faktor daya ($\cos \varphi$) per pelanggan.

3.3 Perhitungan Kebutuhan Capacitor Bank

Dari data pengukuran AMICON, dihitung daya aktif (P), daya reaktif (Q), dan daya semu (S) per pelanggan menggunakan persamaan (1)–(3). Kebutuhan kompensasi reaktif Q_c dihitung menggunakan persamaan (4) dengan target $\cos \varphi = 0,99$. Faktor beban (load factor) dihitung sebagai rasio P_{terukur} terhadap P_{simulasi} (representasi daya kontrak). Analisis sensitivitas dilakukan dengan memvariasikan target dari 0,86 hingga 0,99.



Gambar 2. Simulasi MATLAB

3.4 Pemodelan dan Simulasi MATLAB Simulink

Pemodelan MATLAB Simulink pada penelitian ini disusun untuk merepresentasikan perilaku sistem distribusi tegangan rendah tiga fase sebelum dan sesudah pemasangan capacitor bank. Model simulasi terdiri dari sumber tegangan tiga fase, impedansi saluran, beban RLC tiga fase paralel, dan capacitor bank yang dipasang secara paralel terhadap beban. Sumber tegangan dimodelkan sebesar 220 V line-to-neutral atau setara dengan 380 V line-to-line pada frekuensi 50 Hz, sesuai karakteristik sistem distribusi tegangan rendah tiga fase.

Beban pelanggan dalam simulasi dimodelkan sebagai beban RLC paralel. Parameter beban ditentukan berdasarkan daya kontrak pelanggan dan nilai faktor daya hasil pengukuran AMICON. Pendekatan ini digunakan karena daya kontrak merepresentasikan kapasitas nominal pelanggan, sedangkan faktor daya AMICON digunakan untuk menggambarkan karakteristik induktif beban aktual. Dengan demikian, model Simulink tidak dimaksudkan untuk mereplikasi seluruh fluktuasi beban sesaat, tetapi untuk mengevaluasi respons sistem terhadap kompensasi daya reaktif pada kondisi representatif.

Rangkaian simulasi (Gambar 2) terdiri dari: (1) sumber tegangan tiga fase 220 V line-to-neutral, 50 Hz; (2) impedansi saluran TR tipikal; (3) beban RLC tiga fase paralel yang nilainya diturunkan dari rating daya kontrak dan $\cos \phi$ terukur; dan (4) bank kapasitor tiga fase paralel. Simulasi dilakukan pada dua pelanggan representatif: Alfamart Perintis (daya kontrak 23 kVA, $\cos \phi$ terukur 0,62) dan Bank BTN Kantor Kas (daya kontrak 41,5 kVA, $\cos \phi$ terukur 0,62). Validasi model dilakukan dengan membandingkan $\cos \phi$ output simulasi dengan

target 0,99 setelah pemasangan CB. Sumber Tiga Fase, Kapasitor Bank, dan Beban disimulasikan pada gambar 1. dibawah ini.

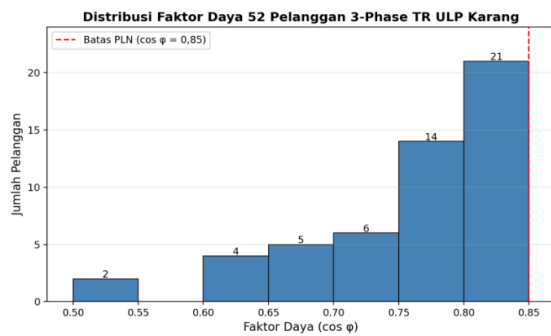
3.5 Rekonsiliasi Data AMICON dan Simulasi

Terdapat dua representasi daya dalam penelitian ini yang perlu dibedakan secara eksplisit. AMICON merekam kondisi aktual pelanggan pada saat pengukuran, sedangkan Simulink digunakan sebagai model sistem untuk mengevaluasi respons jaringan terhadap pemasangan capacitor bank. Oleh karena itu, data AMICON digunakan sebagai dasar perhitungan kebutuhan kompensasi daya reaktif, sementara Simulink digunakan untuk memverifikasi perubahan karakteristik sistem, khususnya penurunan daya reaktif, penurunan arus sumber, dan pengurangan rugi-rugi saluran. Data AMICON menghasilkan nilai P dan Q berdasarkan pengukuran $V \times I$ aktual per fase, yang merepresentasikan kondisi beban pada saat pengukuran. Sementara itu, model Simulink dikonstruksi berdasarkan rating daya kontrak sehingga P dan Q yang dihasilkan merepresentasikan kondisi nominal.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Profil dan Distribusi Faktor Daya

Hasil pengukuran telemetering AMICON terhadap 52 pelanggan tiga fase TR ULP Karang disajikan pada gambar grafik 2. Seluruh pelanggan memiliki faktor daya di bawah 0,85, mengkonfirmasi kondisi inefisiensi sistemik pada jaringan ini.



Gambar 3. Distribusi Faktor Daya 52 Pelanggan 3-Phase TR ULP Karang

Berdasarkan grafik di atas, distribusi faktor daya ($\cos \phi$) dari 52 pelanggan tiga fase tegangan rendah PT PLN (Persero) ULP Karang berdasarkan hasil pengukuran telemetering AMICON. Secara umum, distribusi data menunjukkan bahwa seluruh pelanggan memiliki faktor daya minimum PLN sebesar 0,85, yang ditandai dengan garis vertikal merah putus-putus pada grafik. Kondisi ini mengindikasikan bahwa sistem distribusi di wilayah penelitian masih mengalami permasalahan efisiensi energi akibat tingginya konsumsi daya reaktif.

Distribusi histogram menunjukkan bahwa mayoritas pelanggan terkonsentrasi pada rentang faktor daya 0,75–0,84. Tercatat sebanyak 21 pelanggan berada pada rentang 0,80–0,84 dan 14 pelanggan berada pada rentang 0,75–0,79. Di sisi lain, terdapat sejumlah pelanggan dengan faktor daya rendah hingga sangat kritis. Sebanyak 6 pelanggan berada pada rentang 0,70–0,74, 5 pelanggan pada rentang 0,65–0,69, dan 4 pelanggan pada rentang 0,60–0,64. Selain itu, terdapat 2 pelanggan dengan faktor daya sangat rendah pada rentang 0,50–0,54. Kelompok pelanggan ini menjadi kontributor utama tingginya daya reaktif pada jaringan distribusi dan berpotensi menyebabkan peningkatan rugi-rugi daya, pembebanan transformator, serta penurunan kualitas tegangan sistem.

4.2 Perhitungan Kebutuhan Capacitor Bank

Dari data pengukuran, dihitung kebutuhan kompensasi daya reaktif (Q_c) dan kapasitansi (C) untuk setiap pelanggan dengan target $\cos \phi = 0,99$. Hasil lengkap disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Perhitungan Daya Aktif, Reaktif, dan Kebutuhan Capacitor Bank

No	$\cos \phi$	P (W)	Q (VAR)	S (VA)	Q_c (kVAR)	C (μF)
1	0,62	1733	2193	2795	1,9461	114,60
2	0,75	2190	1932	2920	1,6194	114,47
3	0,76	3232	2764	4252	2,3032	135,43
4	0,79	1603	1244	2029	1,0156	61,11
5	0,74	2589	2353	3499	1,9842	112,06
6	0,71	1429	1417	2013	1,2138	72,75
7	0,84	3704	2393	4409	1,8647	117,99
8	0,77	1465	1214	1903	1,0054	64,09
9	0,78	2567	2060	3291	1,6939	99,33
10	0,83	1126	757	1357	0,5964	36,50
11	0,51	2759	4653	5409	4,2597	245,63
12	0,76	2549	2179	3353	1,8162	107,72
13	0,66	4212	4795	6382	4,1943	249,14
14	0,81	2327	1685	2873	1,3533	89,89
15	0,82	2019	1409	2463	1,1217	68,02
16	0,84	1206	779	1436	0,6071	34,41
17	0,84	1060	685	1262	0,5336	32,82
18	0,84	1146	740	1364	0,5768	38,23
19	0,77	2481	2056	3222	1,7021	101,02
20	0,76	2744	2346	3610	1,9554	120,25
21	0,82	4693	3276	5723	2,6070	155,42
22	0,78	2379	1909	3050	1,5697	88,54
23	0,78	1854	1487	2377	1,2231	69,86
24	0,81	7285	5274	8994	4,2362	238,79
25	0,76	2860	2446	3763	2,0380	118,52
26	0,75	1032	910	1376	0,7629	45,59
27	0,65	1680	1964	2584	1,7246	116,12
28	0,82	2592	1809	3161	1,4401	86,56
29	0,81	3995	2892	4932	2,3230	126,73
30	0,84	2479	1602	2952	1,2483	73,59
31	0,65	1992	2329	3065	2,0453	115,49

No	cos ϕ	P (W)	Q (VAR)	S (VA)	Qc (kVAR)	C (μ F)
32	0,71	3057	3032	4306	2,5968	150,11
33	0,82	2356	1644	2873	1,3086	78,48
34	0,70	1061	1083	1516	0,9314	58,11
35	0,83	4590	3085	5530	2,4305	152,23
36	0,81	4796	3473	5922	2,7891	169,32
37	0,82	2662	1858	3246	1,4787	88,69
38	0,79	1677	1302	2123	1,0628	68,82
39	0,81	5908	4277	7294	3,4353	196,20
40	0,74	3367	3060	4550	2,5805	148,84
41	0,69	1709	1793	2477	1,5491	93,64
42	0,80	3399	2549	4249	2,0650	117,80
43	0,68	1403	1513	2063	1,3128	81,96
44	0,84	1605	1036	1910	0,8078	46,87
45	0,78	3247	2605	4163	2,1422	128,12
46	0,84	1112	718	1324	0,5599	30,77
47	0,72	2148	2070	2983	1,7642	107,16
48	0,64	3242	3892	5065	3,4302	205,17
49	0,64	1783	2141	2787	1,8870	111,27
50	0,81	1437	1040	1774	0,8356	52,14
51	0,50	4895	8478	9789	7,7801	443,97
52	0,62	1610	2037	2597	1,8079	112,04
TOTAL		134045	118237	180359	99,1366	

Berdasarkan tabel di atas, dapat dilihat bahwa total kebutuhan kompensasi daya reaktif untuk seluruh 52 pelanggan adalah 99,14 kVAR, Tabel 2 menyajikan rekonsiliasi antara nilai P dan Q dari dua sumber data yang digunakan dalam penelitian ini.

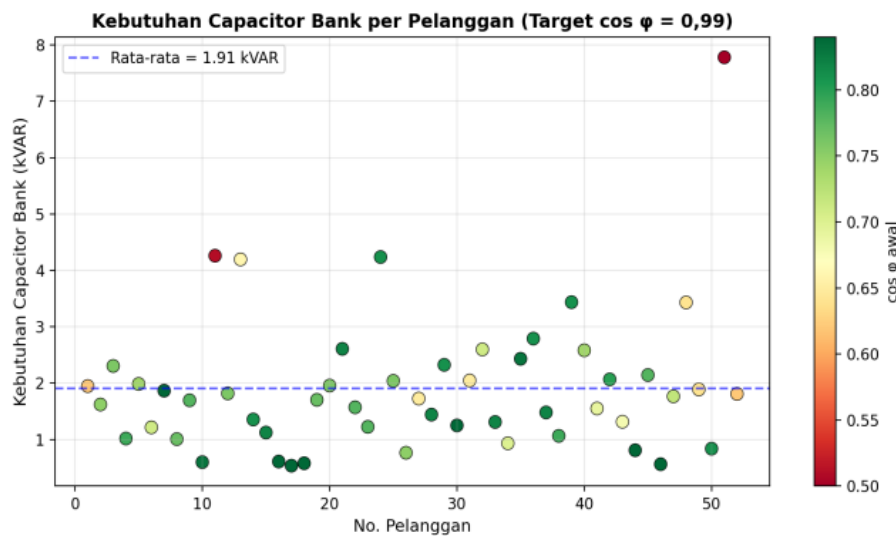
Tabel 2 menjelaskan perbedaan nilai P dan Q antara perhitungan AMICON (134.045 W / 118.237 VAR) dan simulasi MATLAB (76.638 W / 65.768 VAR). Perbedaan ini bukan inkonsistensi, melainkan mencerminkan dua

representasi yang berbeda: data AMICON adalah snapshot beban aktual saat pengukuran dengan faktor beban rata-rata 63%, sedangkan model Simulink menggunakan rating daya kontrak sebagai input. Dalam konteks penelitian ini, data AMICON digunakan untuk menentukan kebutuhan Qc yang tepat sesuai kondisi lapangan, sementara simulasi digunakan untuk memverifikasi mekanisme perbaikan faktor daya secara sistem. Pelanggan dengan prioritas pemasangan tertinggi adalah pelanggan No, 51 ($\cos \phi = 0,50$, $Q_c = 7,78$ kVAR) dan No, 24 ($\cos \phi = 0,81$, $Q_c = 4,24$ kVAR), karena beban totalnya paling tinggi. Distribusi kebutuhan capacitor bank per pelanggan divisualisasikan pada Gambar 3 di bawah ini.

Tabel 2. Rekonsiliasi Nilai Daya Aktif dan Reaktif: Data AMICON vs Simulasi MATLAB

Sumber Data	P Total (W)	Q Total (VAR)	Keterangan
Pengukuran AMICON (data lapangan)	134.045	118.237	Snapshot beban aktual saat pengukuran
Simulasi MATLAB Simulink	76.638	65.768	Model berdasarkan rating daya kontrak
Rasio (Simulasi / AMICON)	0,57	0,56	Rata-rata faktor beban aktual = 63%

Dari grafik di atas dapat dijelaskan bahwa mayoritas pelanggan membutuhkan kapasitas kompensasi pada rentang 1–2,5 kVAR, Hal ini menunjukkan bahwa sebagian besar pelanggan sebenarnya hanya memerlukan penambahan kapasitor dengan kapasitas relatif kecil untuk meningkatkan faktor daya hingga mendekati kondisi ideal, Namun demikian, terdapat beberapa pelanggan dengan kebutuhan kapasitas yang jauh lebih tinggi, bahkan mencapai lebih dari 7 kVAR.



Gambar 4. Kebutuhan Capacitor Bank per Pelanggan berdasarkan $\cos \phi$ Awal

Grafik juga menunjukkan hubungan yang jelas antara rendahnya faktor daya awal dan meningkatnya kebutuhan kapasitas *capacitor bank*. Semakin rendah nilai $\cos \phi$ awal, semakin besar daya reaktif yang harus dikompensasi agar sistem mencapai faktor daya target. Kondisi ini menegaskan bahwa karakteristik beban induktif pelanggan sangat memengaruhi kebutuhan kompensasi daya reaktif.

4.3 Analisis Sensitivitas Target Faktor Daya

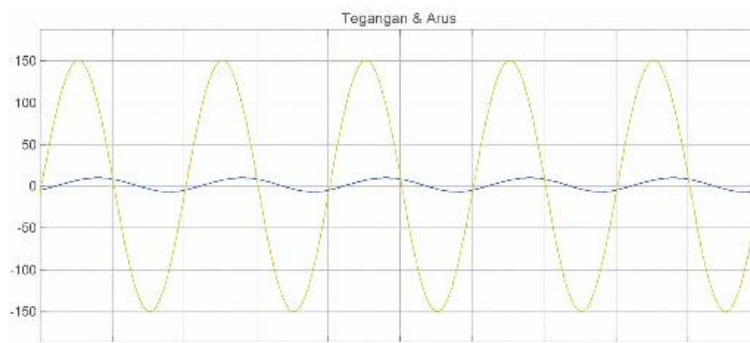
Tabel 5 menyajikan analisis sensitivitas terhadap variasi target $\cos \phi$, meliputi total kebutuhan CB, reduksi daya reaktif, dan estimasi reduksi rugi-rugi saluran. **Peningkatan target dari 0,90 ke 0,99** memerlukan tambahan kapasitor 45,8 kVAR (hampir dua kali lipat dari 53,3 menjadi 99,1 kVAR), namun memberikan tambahan reduksi Q sebesar 38,7 poin persentase dan estimasi tambahan reduksi losses sekitar 21%. Dari perspektif ekonomi teknis, target 0,90 merupakan titik infleksi yang optimal: memenuhi persyaratan regulasi PLN dengan investasi yang lebih efisien. Target 0,99 direkomendasikan untuk pelanggan dengan $\cos \phi \leq 0,65$ yang memiliki potensi penghematan kVARh dan reduksi loss paling signifikan.

Tabel 3. Analisis Sensitivitas: Pengaruh Target $\cos \phi$ terhadap Kebutuhan CB dan Reduksi Losses

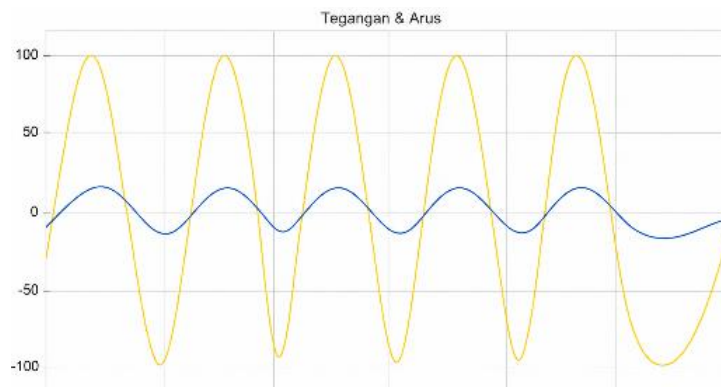
Target $\cos \phi$	Total Qc (kVAR)	Q Sesudah (kVAR)	Reduksi Q (%)	Est. Reduksi Losses (%)
0.86	38.70	79.54	-32.7%	22.9%
0.87	42.27	75.97	-35.8%	24.7%
0.88	45.89	72.35	-38.8%	26.4%
0.89	49.56	68.67	-41.9%	28.0%
0.90	53.32	64.92	-45.1%	29.6%
0.91	57.16	61.07	-48.3%	31.2%
0.92	61.13	57.10	-51.7%	32.7%
0.93	65.26	52.98	-55.2%	34.1%
0.94	69.59	48.65	-58.9%	35.5%
0.95	74.18	44.06	-62.7%	36.8%
0.96	79.14	39.10	-66.9%	38.1%
0.97	84.64	33.59	-71.6%	39.4%
0.98	91.02	27.22	-77.0%	40.6%
0.99	99.14	19.10	-83.8%	41.8%

4.4 Hasil Simulasi MATLAB Simulink

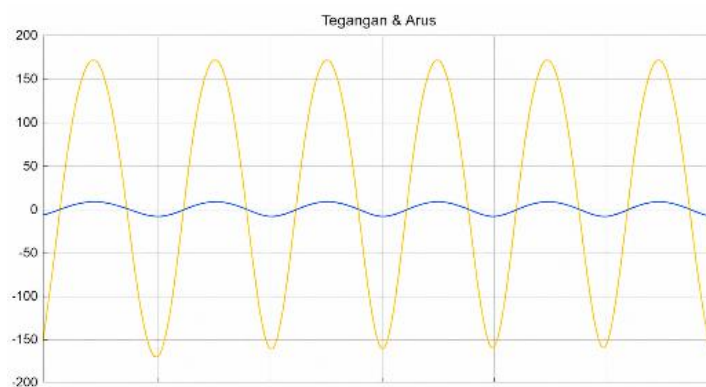
Gambar 5 dan 6 menunjukkan bentuk gelombang tegangan dan arus sebelum kompensasi. Kondisi lagging — arus (biru) tertinggal terhadap tegangan (kuning) — terlihat jelas, mengkonfirmasi dominasi beban induktif.



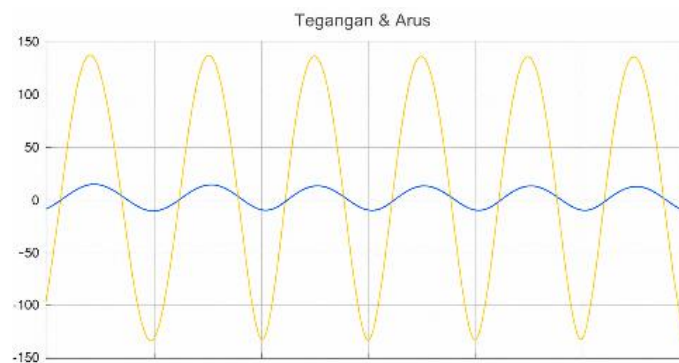
Gambar 5. Gelombang V & I Sebelum CB — Alfamart Perintis (kondisi lagging)



Gambar 6. Gelombang V & I Sebelum CB — Bank BTN Kantor Kas (kondisi lagging)



Gambar 7. Gelombang V & I Sesudah CB — Alfamart Perintis ($\cos \varphi \approx 0,99$)



Gambar 8. Gelombang V & I Sesudah CB — Bank BTN Kantor Kas

Kondisi *slightly leading* pada Bank BTN (Gambar 8) mengindikasikan kompensasi sedikit berlebih (*overcompensation*) — konsekuensi yang mungkin terjadi jika beban aktual lebih rendah daripada rating kontrak. Hal ini memperkuat rekomendasi penggunaan automatic stepped capacitor bank untuk implementasi di lapangan.

Tabel 4. Rekap Hasil Simulasi MATLAB: Perbandingan Daya Sebelum dan Sesudah Pemasangan CB

No	Pelanggan	Rating CB (kVA R)	P Sbl m (W)	P Ssdh (W)	Q Sbl m (VA R)	Q Ssdh (VA R)	ΔP (%)
1	Alfa mart Perintis	1835	1244	1690	1427	314	36%
2	—	1439	1344	1693	1144	358	26%
3	—	2053	1802	2428	1536	533	35%
4	—	914	1249	1456	951	295	17%
5	—	1757	1598	2089	1460	485	31%
6	—	1064	1035	1222	1010	302	18%
7	—	1708	1971	2503	1256	459	27%
8	—	899	1061	1229	865	262	16%
9	—	1520	1540	1939	1215	404	26%
10	—	544	920	1024	625	194	11%
11	—	3434	1217	1968	2071	877	62%
12	—	1619	1712	2221	1444	478	30%
13	—	3609	1769	2792	1967	774	58%
14	—	1227	1349	1665	1042	345	23%
15	—	1020	1429	1696	999	327	19%
16	—	556	1029	1137	670	212	10%
17	—	489	898	990	573	119	10%

No	Pelanggan	Rating CB (kVA R)	P Sbl m (W)	P Ssdh (W)	Q Sbl m (VA R)	Q Ssdh (VA R)	ΔP (%)
18	—	528	933	1017	581	183	9%
19	—	1522	1500	1909	1267	418	27%
20	—	1743	1550	2007	1320	443	29%
21	—	2371	2259	3089	1584	596	37%
22	—	1409	1596	1990	1285	421	25%
23	—	1098	1385	1653	1100	346	19%
24	—	3840	2657	3946	1884	762	49%
25	—	1817	1767	2297	1467	497	30%
26	—	678	846	962	750	216	14%
27	—	1478	1005	1308	1197	378	30%
28	—	1310	1698	2082	1175	399	23%
29	—	2106	2059	2730	1509	549	33%
30	—	1143	1781	2118	1114	383	19%
31	—	1753	1250	1645	1475	483	32%
32	—	2275	1646	2299	1649	574	40%
33	—	1190	1604	1945	1118	374	21%
34	—	813	833	969	846	244	16%
35	—	2218	2194	2937	1457	549	34%
36	—	2528	2212	3074	1605	604	39%
37	—	1345	1562	1958	1151	392	25%
38	—	957	1205	1405	908	283	17%
39	—	3114	2304	3336	1728	675	45%
40	—	2285	1749	2415	1598	562	38%

No	Pelan ggan	Ratin g CB (kVA R)	P Sbl m (W)	P Ssdh (W)	Q Sbl m (VA R)	Q Ssdh (VA R)	ΔP (%)
41	—	1348	118 6	147 5	122 5	380	24%
42	—	1866	193 7	253 4	145 8	513	31%
43	—	1138	105 7	126 4	108 9	328	20%
44	—	740	128 3	146 3	833	270	14%
45	—	1922	185 6	245 7	147 5	513	32%
46	—	513	983	107 6	640	200 5	9%
47	—	1551	133 9	171 1	128 9	415	28%
48	—	2929	150 2	226 9	187 1	678	51%
49	—	1611	116 4	152 2	140 7	453	31%
50	—	757	118 1	134 6	828	257	14%
51	Ban k BTN KK	6240	134 4	267 0	231 0	122 0	99%
52	—	1532	104 4	135 1	132 0	421	29%
TOTAL			766 38	999 71	657 68	245 22	30,4 %

Untuk memperkuat validasi hasil simulasi, dilakukan perhitungan arus saluran dan rugi-rugi daya sebelum serta sesudah pemasangan capacitor bank. Perhitungan ini diperlukan karena capacitor bank secara teoritis tidak meningkatkan daya aktif beban secara langsung, tetapi menurunkan komponen daya reaktif sehingga arus sumber dan rugi-rugi saluran berkurang. Untuk memperjelas pengaruh pemasangan capacitor bank terhadap rugi-rugi daya, dilakukan perhitungan arus saluran dan rugi-rugi daya sebelum serta sesudah kompensasi. Berdasarkan hasil simulasi MATLAB Simulink, sebelum kompensasi diperoleh daya aktif sebesar 76,638 kW dan daya reaktif sebesar 65,768 kVAR.

Berikut ini hasil perhitungan nilai sebelum dan sesudah kompensasi

1. Daya semu sebelum kompensasi

$$S_1 = \sqrt{P^2 + Q^2}$$

$$S_1 = \sqrt{(76,638)^2 + (65,768)^2}$$

$$S_1 = \sqrt{10.198,85}$$

$$S_1 = 100,989 \text{ kVA}$$

2. Arus saluran sebelum kompensasi

$$I_1 = \frac{S_1 \times 1000}{\sqrt{3} \times V_{LL}}$$

$$I_1 = \frac{100,989 \times 1000}{1,732 \times 380}$$

$$I_1 = 153,44 \text{ A}$$

3. Rugi-Rugi Daya sebelum kompensasi

$$P_{loss 1} = 3I_1^2 R_s$$

$$P_{loss 1} = 3 (153,44)^2 (0,05)$$

$$P_{loss 1} = 3531,44 \text{ W}$$

$$P_{loss 1} = 3,531 \text{ kW}$$

4. Daya semu sesudah kompensasi

$$S_2 = \sqrt{P^2 + Q^2}$$

$$S_1 = \sqrt{(76,638)^2 + (24,522)^2}$$

$$S_1 = \sqrt{6474,71}$$

$$S_1 = 80,466 \text{ kVA}$$

5. Arus saluran sesudah kompensasi

$$I_2 = \frac{S_2 \times 1000}{\sqrt{3} \times V_{LL}}$$

$$I_2 = \frac{80,466 \times 1000}{1,732 \times 380}$$

$$I_2 = 122,25 \text{ A}$$

6. Rugi-Rugi Daya sesudah kompensasi

$$P_{loss 2} = 3I_2^2 R_s$$

$$P_{loss 2} = 3 (122,25)^2 (0,05)$$

$$P_{loss 2} = 2241,94 \text{ W}$$

$$P_{loss 2} = 2,242 \text{ kW}$$

7. Reduksi rugi-rugi daya

$$\Delta P_{loss} = P_{loss 1} - P_{loss 2}$$

$$\Delta P_{loss} = 3541,44 - 2241,94$$

$$\Delta P_{loss} = 1289,50 \text{ W}$$

$$\Delta P_{loss} = 1,289 \text{ kW}$$

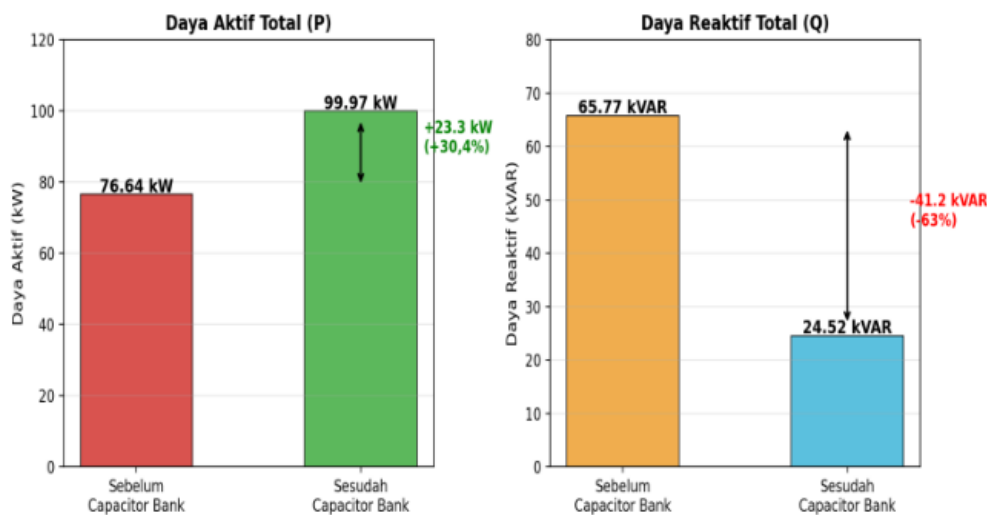
Persentasi reduksi rugi-rugi daya:

$$\% \Delta P_{loss} = \frac{1289,50}{3531,44} \times 100\%$$

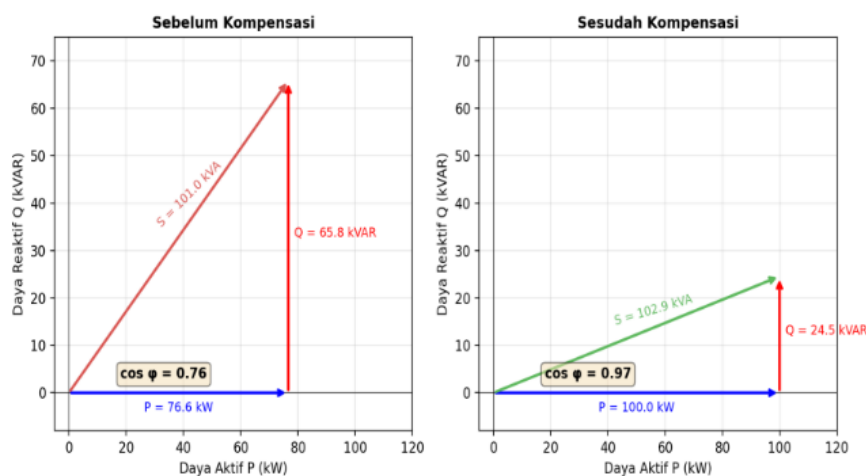
$$\% \Delta P_{loss} = 36,52\%$$

Simulasi Matlab dilakukan pada dua pelanggan representatif untuk memvalidasi model teoritis, Gambar 5 menunjukkan perbandingan daya aktif dan reaktif total sebelum dan sesudah simulasi pemasangan capacitor bank pada 52 pelanggan. Hasil simulasi menunjukkan faktor daya rata-rata

meningkat menjadi 0,99, daya reaktif total turun 63% (dari 65,768 VAR menjadi 24,521 VAR), dan daya aktif terukur di sisi sumber meningkat 30,4% (dari 76,638 W menjadi 99,970 W), Perlu ditekankan bahwa peningkatan daya aktif terukur di sisi sumber ini bukan berarti beban pelanggan bertambah, melainkan merupakan konsekuensi berkurangnya rugi-rugi saluran (I^2R losses): sebelum kompensasi, arus yang besar akibat PF rendah menghasilkan disipasi panas pada konduktor yang signifikan; setelah kompensasi, arus turun sehingga daya yang sebelumnya hilang sebagai panas kini dapat tersalurkan sebagai daya aktif ke beban [2][6],



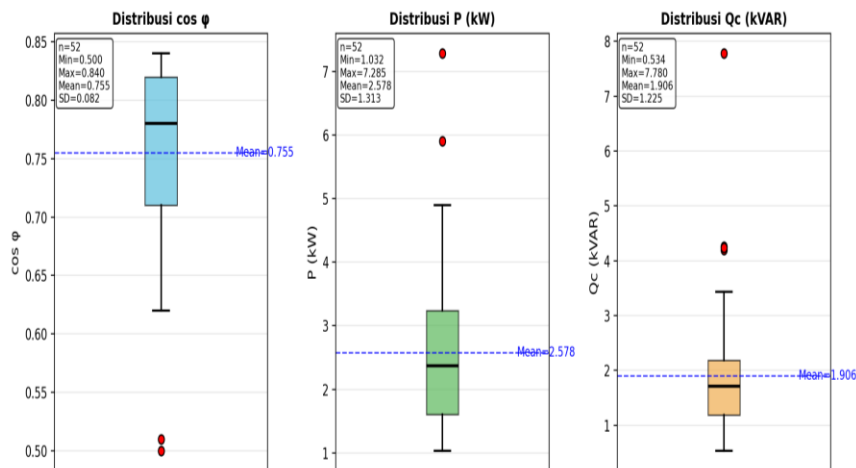
Gambar 9. Perbandingan Total Daya Aktif dan Reaktif Sebelum dan Sesudah Pemasangan Capacitor Bank.



Gambar 10. Segitiga Daya Total 52 Pelanggan Sebelum dan Sesudah Kompensasi

Gambar 10 memvisualisasikan pergeseran segitiga daya yang menggambarkan transformasi ini, Kondisi *leading power factor* (arus mendahului tegangan) yang tampak pada hasil simulasi gelombang beberapa pelanggan setelah pemasangan CB merupakan indikasi bahwa kapasitor yang dipasang sedikit melebihi kebutuhan kompensasi tepat untuk mencapai target 0,99, Kondisi ini perlu diperhatikan

dalam implementasi lapangan: *overcompensation* dapat menyebabkan tegangan naik (*voltage rise*) pada jaringan dan meningkatkan arus reaktif dalam arah sebaliknya, Oleh karena itu, disarankan penggunaan capacitor bank bertahap (*stepped/automatic capacitor bank*) yang dapat menyesuaikan kompensasi secara dinamis sesuai fluktuasi beban,



Gambar 11. Statistik Deskriptif: Distribusi $\cos \phi$, Daya Aktif, dan Kebutuhan Capacitor Bank

Dari grafik diatas dapat dijelaskan distribusi faktor daya, mayoritas pelanggan berada pada rentang 0,71–0,82 dengan rata-rata sebesar 0,755, Seluruh pelanggan masih berada di bawah standar minimum PLN sebesar 0,85, Terdapat beberapa pelanggan dengan faktor daya sangat rendah sekitar 0,50 yang menunjukkan tingginya penggunaan beban induktif, Distribusi daya aktif menunjukkan rata-rata konsumsi daya sebesar 2,58 kW dengan variasi beban yang cukup besar antar pelanggan, Sebagian besar pelanggan berada pada rentang 1,6–3,2 kW, namun terdapat beberapa pelanggan dengan konsumsi daya jauh lebih tinggi, Sementara itu, kebutuhan *capacitor bank* memiliki rata-rata sebesar 1,91 kVAR, Mayoritas pelanggan membutuhkan kompensasi pada rentang 1–2,2 kVAR, sedangkan beberapa pelanggan memerlukan kapasitas lebih besar hingga mendekati 8 kVAR akibat faktor daya yang sangat rendah.

5. KESIMPULAN

- Profil faktor daya 52 pelanggan TR ULP Karang menunjukkan nilai rata-rata 0,755 (SD = 0,082), distribusi tidak normal (Shapiro-Wilk $W = 0,865$, $p < 0,001$). Daya aktif total terukur AMICON 134,05 kW dengan faktor beban rata-rata 63% terhadap rating kontrak. Dua pelanggan kritis ($\cos \phi \leq 0,55$) memerlukan intervensi prioritas.
- Total kebutuhan kompensasi reaktif sebesar 99,14 kVAR (target $\cos \phi = 0,99$) berdasarkan data AMICON. Analisis sensitivitas menunjukkan target 0,90 lebih ekonomis (53,3 kVAR) dan merupakan titik infleksi optimal antara investasi dan pemenuhan regulasi PLN.
- Terdapat dua representasi daya yang berbeda dalam penelitian ini: data AMICON ($P=134$ kW, $Q=118$ kVAR) mencerminkan beban aktual, sedangkan model Simulink ($P=77$ kW, $Q=66$ kVAR) mencerminkan rating kontrak dengan faktor beban 63%. Simulasi memverifikasi bahwa kompensasi CB secara efektif meningkatkan daya aktif

- tersalur 30,4% dan menurunkan Q sebesar 63% pada model.
- d. Peningkatan daya aktif tersalur di sisi sumber pasca-kompensasi merepresentasikan pengurangan rugi-rugi I²R, bukan penambahan beban. Kondisi slightly leading pada simulasi Bank BTN mengindikasikan perlunya automatic stepped capacitor bank untuk menghindari overcompensation.
 - e. Penelitian ini menghasilkan peta kebutuhan CB berbasis data lapangan nyata 52 pelanggan ULP Karang, disertai analisis faktor beban dan sensitivitas, yang dapat dijadikan acuan operasional PLN dalam program efisiensi energi jaringan distribusi.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada pihak-pihak terkait yang telah memberi dukungan terhadap penelitian ini,

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Al-Naseem, O,A, dan A,K, Adi, "Impact of Power Factor Correction on the Electrical Distribution Network of Kuwait," *The Online Journal on Power and Energy Engineering*, vol, 2, no, 1, hal, 173-176, 2011,
- [2] Amir, M, dan Aji M,S,, "Analisis Perbaikan Faktor Daya untuk Memenuhi Penambahan Beban 300 kVA Tanpa Penambahan Daya PLN," *Program Studi Teknik Elektro-ISTN*, vol, 19, no, 1, hal, 33-44, 2017,
- [3] Bhattacharyya, S,, A, Choudhury, dan H,R, Jariwala, "Case Study On Power Factor Improvement," *International Journal of Engineering Science and Technology*, vol, 3, no, 12, hal, 8372-8378, 2011,
- [4] Chandra, A, dan T, Agarwal, "Capacitor Bank Designing for Power Factor Improvement," *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, vol, 4, no, 8, hal, 235-239, 2014,
- [5] Astuti, B,, Pengantar Teknik Elektro, Edisi Pertama, Yogyakarta: Graha Ilmu, 2011,
- [6] Hariansyah, M, dan J, Setiawan, "Pemasangan Kapasitor Bank Untuk Perbaikan Faktor Daya Pada Panel Utama Listrik Gedung Fakultas Teknik Universitas Ibn Khaldun Bogor," *Jurnal Teknik Elektro Dan Sains*, vol, 3, no, 1, hal, 26-33, 2016,
- [7] Nuraeni dan Charles Selan, *Analisis Sistem Tenaga Listrik*, Jakarta: Penerbit Andi, 2013,
- [8] Fazal, M,, M,W, Raza, S, Khan dan Faizullah, "Reactive Power Compensation by Power Capacitor Method," *Engineering Technology Open Access Journal*, vol, 1, no, 3, hal, 1-4, 2018,
- [9] Firmansyah, I,, "Studi Pemasangan Kapasitor Bank Untuk Perbaikan Faktor Daya PT, Asian Profile Indosteel," Skripsi Jurusan Teknik Elektro FTI ITS Surabaya, 2010,
- [10] Ramdan Febriana, *Sistem Tenaga Listrik*, Jakarta: Erlangga, 2016,
- [11] Melipurbowo, B,G,, *Dasar-Dasar Teknik Elektro*, Jakarta: Penerbit Salemba, 2016,
- [12] Peraturan Menteri ESDM No, 28 Tahun 2016 tentang Tarif Tenaga Listrik yang Disediakan oleh PT Perusahaan Listrik Negara (Persero),
- [13] MathWorks, *MATLAB and Simulink Documentation*, The MathWorks Inc., Natick, MA, 2023,
- [14] Afrida, Y,, A, Afandi, Jeckson, dan Ubaidah, "Studi Penentuan State Of Charge (SOC) pada Baterai VRLA NP7-12 Menggunakan MATLAB," *Electrician Jurnal Rekayasa dan Teknologi Elektro*, vol, 17, no, 2, hal, 146-150, 2023,
- [15] Yenni Afrida, dkk, *Instalasi Listrik*, Tangerang, Penerbit Minhaj Pustaka, 2025.