

Perencanaan Perbaikan Faktor Daya Pada Industri Otomotif

Muhammad Fachrul Reza, Deria Pravitasari, Agung Trihasto, Andriyatna Agung Kurniawan

Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Tidar
Jl. Kapten Suparman No.39, Potrobangsari, Magelang Utara, Kota Magelang
E-mail: muhammad.fachrul.reza@students.untidar.ac.id

Naskah Masuk: 02 Desember 2025; Diterima: 28 September 2026; Terbit: 30 September 2026

ABSTRAK

Abstrak - Faktor daya listrik rendah pada industri meningkatkan rugi daya dan pembebanan yang masih jauh dari kapasitas tersedia memiliki potensi penambahan operasional beban. Penelitian ini bertujuan untuk meningkatkan faktor daya dan mengurangi rugi daya pada seluruh persentase pembebanan dengan objek penelitian PT Putra Agung Setia menggunakan kapasitor bank kompensasi terpusat. Metode penelitian ini diawali dengan analisis profil pembebanan kemudian pembuatan fungsi regresi linear dan skenario pembebanan alternatif. Selanjutnya perencanaan kapasitor bank dan perhitungan rugi daya. Hasil penelitian menunjukkan bahwa nilai pembebanan saat sistem mengalami masalah faktor daya berada pada rentang 4,388% hingga 15,038%. Model regresi linear diperoleh pada persamaan $y = -1,9273 + 1,6188x$ dengan *baseline* profil pembebanan. Skenario pembebanan alternatif ditentukan pada nilai 25%, 50%, 75%, dan 100%. Seluruh skenario alternatif menunjukkan faktor daya rendah. Peningkatan faktor daya dilakukan pada persentase pembebanan 4,388% hingga 100%. Target referensi peningkatan faktor daya secara teoritis ditetapkan 1, namun nilai praktis yang dicapai hanya mendekati 1. Hasil perencanaan kapasitor bank diperoleh kebutuhan pada nilai 2,5 kVAR, 5 kVAR, 10 kVAR, 20 kVAR, 40 kVAR, dan 80 kVAR. Hasil perbaikan faktor daya menunjukkan bahwa rata-rata faktor daya meningkat mendekati 1, sedangkan rugi daya turun mendekati 0 kW.

Kata kunci: Faktor Daya, Rugi Daya, Kapasitor Bank, Regresi Linear

ABSTRACT

Abstract – Low power factor in industrial settings increases power losses, while loading levels far below available capacity offer the potential for increased operational loads. This study aims to improve the power factor and reduce power losses across various loading percentages at PT Putra Agung Setia by utilizing a centralized capacitor bank compensation system. The research methodology began with an analysis of the load profile, followed by the formulation of a linear regression function and the development of alternative loading scenarios. Subsequently, the capacitor bank was designed, and power losses were calculated. The results indicate that the loading levels during periods of power factor issues ranged from 4.388% to 15.038%. A linear regression model was derived with the equation $y = -1.9273 + 1.6188x$ based on the baseline load profile. Alternative loading scenarios were established at 25%, 50%, 75%, and 100% of capacity. All scenarios exhibited low power factors. Power factor improvements were implemented across the loading range of 4.388% to 100%. While the theoretical target for the power factor was 1.0, the practical values achieved approached, but did not quite reach, that figure. The capacitor bank design identified requirements for capacities of 2.5 kVAR, 5 kVAR, 10 kVAR, 20 kVAR, 40 kVAR, and 80 kVAR. The results of the power factor correction show that the average power factor increased to a value approaching 1, while power losses decreased to a level approaching 0 kW.

Keywords: Power Factor, Power Losses, Capacitor Bank, Linear Regression

Copyright © 2026 Jurnal Teknik Elektro dan Komputasi (ELKOM)

1. PENDAHULUAN

Salah satu fenomena sistem tenaga listrik adalah faktor daya. Faktor daya pada sistem tenaga listrik dikatakan baik jika memiliki nilai tinggi [1]. Faktor daya rendah pada sistem tenaga listrik memicu banyak kerugian. Kerugian akibat faktor daya rendah antara lain mengurangi kapasitas daya aktif pembangkit, meningkatkan rugi-rugi jaringan, meningkatkan daya semu, meningkatkan ukuran penghantar, mengurangi

efisiensi, memicu peningkatan biaya listrik, dan dapat mengakibatkan denda pada sisi konsumen [2], [3]. Oleh karena itu faktor daya rendah pada sistem tenaga listrik perlu dilakukan perbaikan.

Perbaikan faktor daya dilakukan dengan kompensator daya reaktif [4]. Ada beberapa jenis kompensator daya reaktif meliputi kapasitor bank dan kondensor sinkron. Kondensor sinkron sebagai kompensator daya reaktif bekerja dengan pengaturan eksitasi, sedangkan kapasitor bank dengan pengaturan kapasitansi. Kondensor sinkron memiliki kelebihan dalam meningkatkan stabilitas namun tidak banyak digunakan sebab biaya pengadaan dan pemeliharanya tinggi. Selain itu juga menimbulkan kebisingan dan getaran. Kompensator ini juga perlu peralatan tambahan untuk *starting* karena motor sinkron tidak memiliki torsi awal. Peralatan tambahan itu biasanya adalah motor induksi sehingga tidak banyak digunakan [5].

Kompensator daya reaktif untuk perbaikan faktor daya sektor industri biasanya dilakukan dengan kapasitor [2], [6]. Kompensator ini dipilih karena beban-beban industri biasanya bersifat induktif. Kapasitor dipilih karena bersifat kapasitif dengan arus mendahului tegangan. Sifat tersebut dapat digunakan untuk menggeser sudut gelombang arus mendekati tegangan pada beban induktif sehingga meningkatkan faktor daya [7]. Kapasitor pada aplikasi sistem tenaga dirangkai menjadi kapasitor bank. Pemanfaatan kapasitor bank untuk perbaikan faktor daya memiliki beberapa kelebihan. Kelebihan-kelebihan tersebut antara lain mudah dalam pemasangan, tidak memerlukan banyak perawatan, dan masa pakai yang lama.

Ada dua metode konfigurasi kapasitor bank untuk perbaikan faktor daya. Kedua metode itu adalah kompensasi terpusat dan terdistribusi [8]. Kapasitor bank kompensasi terpusat dipasang pada pusat beban utama, sedangkan terdistribusi dipasang pada kelompok-kelompok beban. Kapasitor bank kompensasi terpusat digunakan apabila konfigurasi sistem sederhana. Grup beban pada metode ini dihubungkan dengan *supply* utama dan dilakukan kompensasi secara bersama.

Salah satu industri dengan faktor daya rendah kurang dari standar PT PLN adalah PT Putra Agung Setia. Perusahaan ini merupakan industri otomotif bidang karoseri. Dominasi beban listrik perusahaan ini bersifat induktif seperti blower, pendingin ruang, mesin kompressor, pemotong logam, dan busur listrik. Masalah faktor daya PT Putra Agung Setia meningkatkan rugi daya yang berimplikasi pada pemborosan biaya. Konfigurasi sistem pada perusahaan ini relatif sederhana. Selain itu rata-rata pembebanan sistem masih jauh dari kapasitas yang tersedia. Akibatnya ada potensi penambahan operasional beban yang mengakibatkan faktor daya semakin rendah. Oleh karena itu perlu perencanaan perbaikan faktor daya hingga mendekati kapasitas tersedia dengan kapasitor bank kompensasi terpusat.

Berdasarkan uraian diatas, penelitian ini bermaksud merencanakan kebutuhan kapasitor bank kompensasi terpusat untuk meningkatkan faktor daya dan mengurangi rugi daya PT Putra Agung Setia. Perencanaan kapasitor bank pada penelitian ini dilakukan dari *baseline* berupa profil pembebanan hingga skenario alternatif yang dibuat mendekati kapasitas yang tersedia untukantisipasi penambahan operasional beban. Parameter operasi skenario alternatif pada penelitian ini dihipotesiskan dengan pemodelan daya secara empiris menggunakan regresi linear. Metode ini dipilih karena mampu menjelaskan korelasi antar peubah secara sederhana. Pada penelitian ini, langkah perencanaan lebih ditekankan karena bisa digunakan sebagai strategi awal perbaikan faktor daya sehingga bisa digunakan sebagai pertimbangan dalam perancangan.

2. KAJIAN PUSTAKA

Perencanaan pada konteks sistem tenaga listrik pada dasarnya adalah proses menentukan strategi tentang komponen dan konfigurasi yang digunakan. Perencanaan pada sistem tenaga listrik melibatkan proses rekayasa mencakup analisis, perhitungan, dan prakiraan beban [9].

Prakiraan beban dalam perencanaan merupakan aspek penting yang perlu dipertimbangkan. Hal ini diperlukan mengingat dinamika sistem tenaga. Dengan prakiraan yang tepat dapat membantu operasional sistem tenaga tetap berjalan baik sesuai dengan perencanaan pada berbagai parameter operasi berbeda.

Faktor daya adalah rasio daya aktif dengan semu atau resistansi dengan impedansi. Faktor daya juga didefinisikan sebagai cosinus sudut arus terhadap tegangan [10]. Faktor daya ada tiga jenis yaitu *unity*, *lagging*, dan *leading*. Faktor daya *unity* merupakan faktor daya ideal dengan nilai 1. Faktor daya *unity* dihasilkan oleh beban dengan sifat resistif. Karakteristik beban resistif adalah arus dan tegangan satu fasa sehingga faktor daya yang dihasilkan 1. Faktor daya jenis ini secara teori digunakan sebagai target dalam perbaikan, namun sasaran praktis biasanya tetap mengacu pada regulasi PT PLN. Faktor daya *lagging* dan *leading* diakibatkan beban induktif dan kapasitif. Karakteristik beban induktif yaitu arus tertinggal dari tegangan, sedangkan kapasitif arus mendahului tegangan [11]. Faktor daya yang dihasilkan adalah *lagging* dan *leading*. Keduanya memiliki karakteristik berlawanan.

Pada penelitian-penelitian terdahulu, regresi linear sering digunakan untuk menentukan korelasi parameter kelistrikan secara empiris [12], [13]. Model-model seperti tegangan, arus, dan daya listrik dapat dimodelkan dengan regresi linear. Regresi linear pada perencanaan ini digunakan untuk memodelkan daya aktif dan semu untuk menentukan nilai daya dan faktor daya listrik dari skenario pembebanan alternatif sebagai parameter operasi yang dibuat untuk prakiraan penambahan operasional beban.

2.1. Daya Listrik Pada Sistem Kelistrikan AC (*alternating current*)

Ada tiga jenis daya pada kelistrikan AC yaitu daya aktif, reaktif, dan semu. Ekspresi matematis ketiganya ditunjukkan persamaan 1.

$$S^2 = P^2 + Q^2 \quad (1)$$

keterangan :

S = daya semu (VA)

P = daya aktif (W)

Q = daya reaktif (VAR)

Daya aktif merupakan daya yang digunakan untuk kerja, sedangkan daya reaktif tidak digunakan untuk kerja. Daya reaktif timbul dari adanya reaktansi (x) [11]. Gabungan dari dua daya ini adalah daya semu. Ekspresi matematis daya aktif, semu, dan reaktif ditunjukkan pada persamaan 2 hingga 4.

$$P = V \times I \times \cos(\varphi) \times \sqrt{3} \quad (2)$$

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

$$S = V \times I \times \sqrt{3} \quad (4)$$

keterangan :

S = daya semu (VA)

P = daya aktif (W)

Q = daya reaktif (VAR)

V = tegangan listrik (v)

I = arus listrik (A)

φ = sudut fi (°)

2.2. Kompensasi Daya Reaktif (Qc)

Cara perbaikan faktor daya dilakukan dengan menentukan kompensasi daya reaktif. Persamaan menghitung kompensasi daya reaktif adalah persamaan 5.

$$Q_c = P (\tan(\varphi_1) - \tan(\varphi_2)) \quad (5)$$

keterangan :

P = daya aktif (kW)

φ_1 = sudut fi faktor daya awal (°)

φ_2 = sudut fi faktor daya target (°)

2.3. Kapasitor Bank

Volt Ampere Reaktif (VAR) merupakan besaran kapasitor bank untuk tugas kompensasi dan farad (F) menyatakan kapasitansi. Kapasitor bank bisa terhubung bintang (*star*) atau segitiga (*delta*). Persamaan menghitung kapasitansi kapasitor bank bintang dan segitiga diperlihatkan persamaan 6 dan 7 [4].

$$C_D = \frac{Q_c}{3.2\pi f(V)^2} \quad (6)$$

$$C_S = \frac{Q_c}{2\pi f(V)^2} \quad (7)$$

keterangan :

C_D = kapasitansi segitiga (F)

C_S = kapasitansi bintang (F)

Q_c = kompensasi daya reaktif (VAR)

π = konstanta

f = frekuensi (Hz)

V = tegangan efektif fasa-fasa (V)

2.4. Kapasitor Bank *Automatic Type*

Kapasitor bank kompensasi *automatic type* digunakan ketika beban bervariasi. Kapasitor bank pada kompensasi ini dikendalikan dengan *power factor controller / power factor regulator* [14]. Kapasitor bank pada kompensasi ini dapat diaktifkan dan dinonaktifkan secara otomatis berdasarkan kebutuhan yang ada.

2.5. *Geometric Sequence*

Salah satu metode *on-off* dan pengaturan tiap tahap nilai kapasitor bank *automatic type* yaitu *geometric sequence*. *Geometric sequence* juga disebut *binary switching*. *Six stage binary switching* merupakan

salah satu metode *geometric sequence* pada kapasitor bank enam tahap. Pada metode ini, enam tahap kapasitor bank dapat menghasilkan 63 pola kompensasi daya reaktif. Skema *Six stage binary switching* ditunjukkan pada Tabel 1 [15]. Pada Tabel 1, keterangan *switch* menunjukkan nomor pensaklaran, *capacitor unit stage* menunjukkan nilai daya reaktif kapasitor bank per unit, dan pola Qc menunjukkan total daya reaktif yang dihasilkan oleh kapasitor bank yang aktif.

Tabel 1. Skema *six stage binary switching*

switch	Capacitor unit stage						Pola Qc	switch	Capacitor unit stage						Pola Qc
	Q	2Q	4Q	8Q	16Q	32Q			Q	2Q	4Q	8Q	16Q	32Q	
1	■						Q	33	■						33Q
2		■					2Q	34	■	■					34Q
3	■	■					3Q	35	■	■	■				35Q
4			■				4Q	36		■	■	■			36Q
5	■			■			5Q	37	■	■		■			37Q
6		■			■		6Q	38	■	■	■		■		38Q
7	■	■					7Q	39	■	■	■				39Q
8			■		■		8Q	40				■	■		40Q
9	■						9Q	41	■	■					41Q
10		■					10Q	42	■	■	■				42Q
11	■	■					11Q	43	■	■		■			43Q
12			■				12Q	44		■	■	■			44Q
13	■			■			13Q	45	■	■			■		45Q
14		■			■		14Q	46	■	■	■				46Q
15	■	■					15Q	47	■	■	■				47Q
16			■		■		16Q	48				■	■		48Q
17	■						17Q	49	■	■					49Q
18		■					18Q	50	■	■	■				50Q
19	■	■					19Q	51	■	■		■			51Q
20			■				20Q	52		■	■	■			52Q
21	■			■			21Q	53	■	■			■		53Q
22		■			■		22Q	54	■	■	■				54Q
23	■	■					23Q	55	■	■	■				55Q
24			■		■		24Q	56				■	■		56Q
25	■						25Q	57	■	■					57Q
26		■					26Q	58	■	■	■				58Q
27	■	■					27Q	59	■	■		■			59Q
28			■				28Q	60		■	■	■			60Q
29	■			■			29Q	61	■	■			■		61Q
30		■			■		30Q	62	■	■	■				62Q
31	■	■					31Q	63	■	■	■				63Q
32						■	32Q								

2.6. Rugi Daya

Faktor daya rendah meningkatkan rugi daya listrik. Rugi daya merupakan daya listrik yang hilang tidak digunakan. Rugi daya akibat faktor daya rendah dapat dihitung dengan persamaan 8 [16]

$$P_{loss} = V \times I \times \sqrt{3} \times (1 - \cos(\phi)) \quad (8)$$

keterangan :

V = tegangan listrik (V)

I = arus listrik (A)

ϕ = sudut fi ($^{\circ}$)

2.7. Pencocokan Kurva (*curve fitting*)

Pencocokan kurva atau *curve fitting* merupakan cara membentuk kurva dan fungsi matematika dari kumpulan titik data yang telah diketahui berdasarkan sebaran *trend* data [17]. Kurva yang terbentuk dari pencocokan kurva tidak perlu melalui seluruh rangkaian data namun mengikuti *trend* data. Konsep ini mengakibatkan pencocokan kurva dapat digunakan untuk ekstrapolasi untuk menghampiri peubah lain diluar batas pengamatan. Pencocokan kurva dilakukan dengan merajah kumpulan data pada koordinat-xy kemudian memilih model matematika yang sesuai untuk mewakili kumpulan data pada koordinat-xy. Setelah itu dilakukan pencocokan terhadap sebaran data (*trend*) pada koordinat-xy.

2.8. Regresi Linear dan Validitas

Salah satu bentuk teknik pencocokan kurva dilakukan dengan regresi linear. Regresi linear dapat digunakan untuk ekstrapolasi data guna mendapatkan nilai peubah terikat dari peubah tidak terikat yang berada di luar jangkauan data. Regresi ini digunakan jika sebaran *trend* data memiliki kecenderungan berbentuk linear. Representasi regresi linear secara matematis ditunjukkan persamaan 9

$$y = \alpha + \beta x \quad (9)$$

keterangan :

y = peubah terikat

x = peubah bebas

α = konstanta regresi (*intercept*)

β = koefisien regresi (*slope*)

Salah satu fungsi tujuan dari regresi linear adalah jumlah *total error absolute*. Representasi matematis fungsi tujuan regresi linear ditunjukkan persamaan 10 [18].

$$\text{Min } \sum |y_i - y'_i| \quad (10)$$

keterangan :

y_i = nilai asli (aktual) ke-i

y'_i = nilai hampiran ke-i

Kecocokan model regresi linear dapat dievaluasi dan validasi dengan *mean absolute percentage error* (MAPE). MAPE menunjukkan kualitas model regresi dalam besaran persentase. Representasi matematis menghitung nilai MAPE ditunjukkan persamaan 11.

$$\text{MAPE} = \frac{1}{n} \sum \frac{|y_i - y'_i|}{y_i} \times 100 \quad (11)$$

keterangan :

n = jumlah data

y_i = nilai asli (aktual) ke-i

y'_i = nilai hampiran ke-i

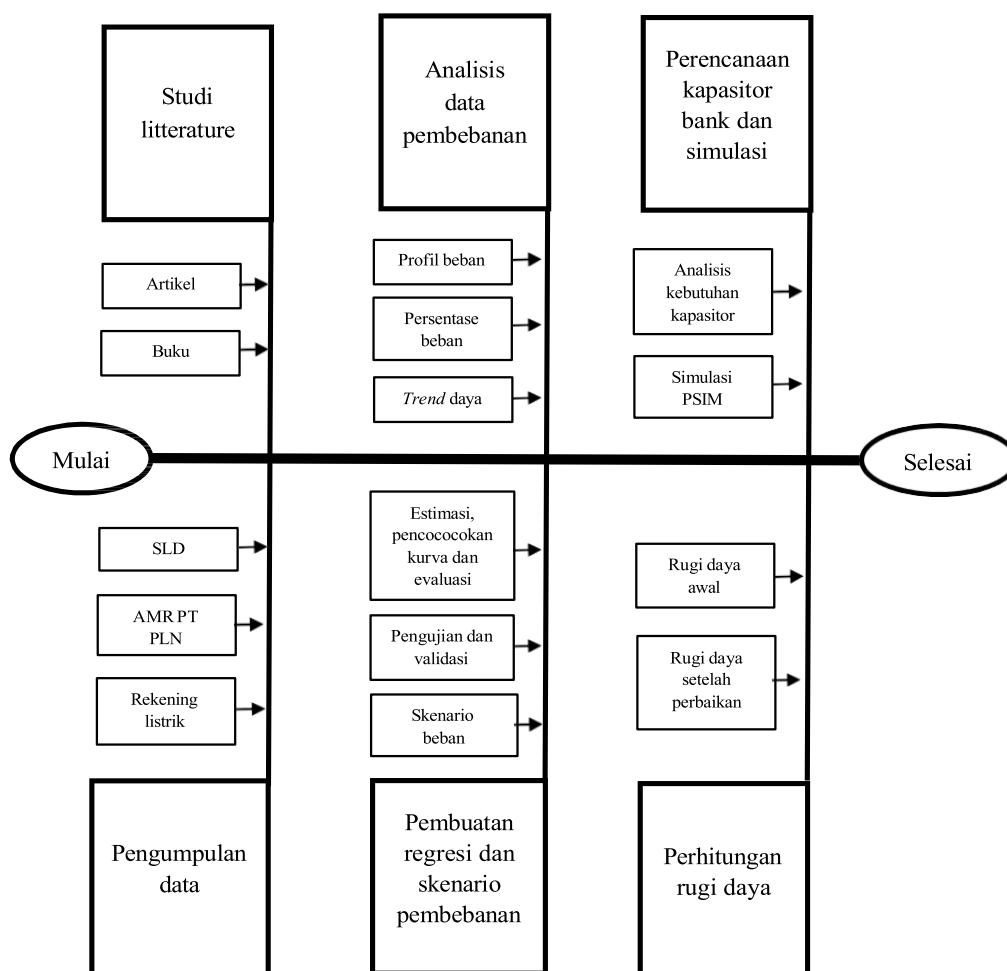
Model regresi linear semakin baik jika nilai MAPE semakin rendah. Secara umum, nilai MAPE kurang dari 10% menunjukkan valid [19]. Secara khusus, interpretasi MAPE ditunjukkan pada Tabel 2 [20].

Tabel 2. Interpretasi MAPE

No.	MAPE (%)	Kriteria
1.	<10	Sangat akurat
2.	10-20	Baik
3.	20-50	Wajar
4.	>50	Tidak akurat

3. METODE PENELITIAN

Objek penelitian ini adalah sistem kelistrikan PT Putra Agung Setia. Perusahaan ini merupakan pelanggan PT PLN dengan kapasitas daya 197 kVA golongan B2. Standar faktor daya untuk pelanggan PT PLN adalah diatas 0,85 dengan frekuensi 50 Hz dan tegangan 380 V. Prosedur dan langkah-langkah penelitian ini ditunjukkan dengan diagram *fishbone* Gambar 1.



Gambar 1. Diagram *fishbone* penelitian

3.1. Studi Litterature

Langkah awal penelitian adalah studi literature. Studi literature dilakukan dari buku dan artikel yang relevan.

3.2. Pengumpulan Data

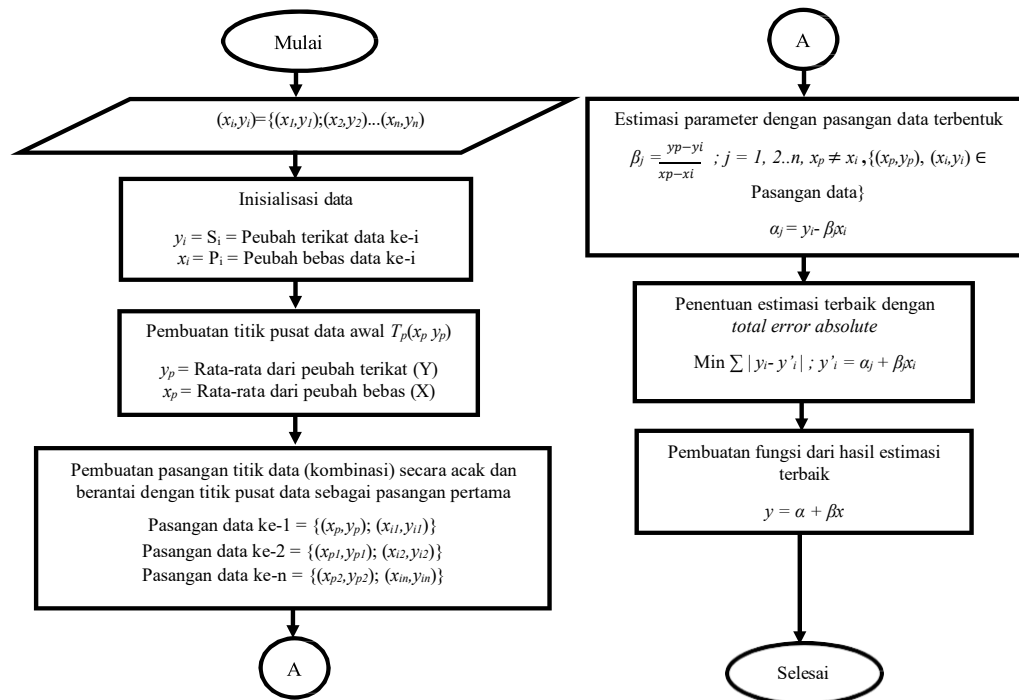
Penelitian ini menggunakan data sekunder. Data sekunder yang dikumpulkan pada penelitian ini meliputi diagram satu garis kelistrikan (*single line diagram*/ SLD), rekaman *automatic meter reading* (AMR) PT PLN, dan rekening listrik.

3.3. Analisis Data Profil Pembebanan

Profil beban, persentase, dan *trend* daya aktif serta semu pada koordinat-xy dianalisis pada bagian ini. Profil beban dibuat dari rekaman *automatic meter reading* (AMR) PT PLN yang diintegrasikan untuk representasi periode tipikal sebagai profil pembebanan *baseline*. Setelah itu, *trend* data dari pembebanan *baseline* dianalisis dan persentase pembebanan daya semu dihitung berdasarkan kapasitas eksisting. Persentase pembebanan digunakan sebagai acuan untuk menentukan skenario persentase pembebanan alternatif.

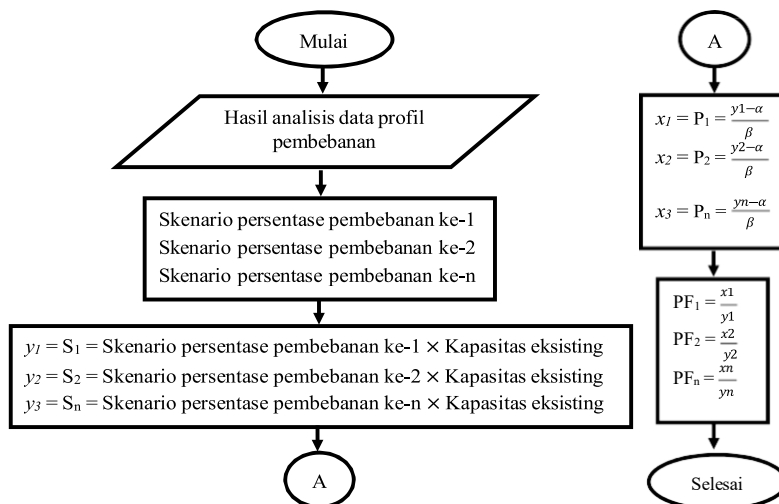
3.4. Pembuatan Regresi Linear dan Skenario Pembebanan

Model regresi linear daya aktif dan semu serta skenario pembebanan alternatif dibuat pada bagian ini. Model fungsi regresi linear pada penelitian ini digunakan untuk menentukan daya aktif dan semu dari skenario persentase pembebanan alternatif. Model regresi linear dibuat berdasarkan profil pembebanan *baseline*. Pada penelitian ini, persamaan untuk membuat model regresi linear adalah persamaan 9. Parameter α dan β pada persamaan itu diduga menggunakan estimasi *two point*. Metode estimasi ini dipilih karena dapat meminimalkan nilai dari jumlah *total error absolute* sehingga membuat model yang terbentuk kuat terhadap *outlier*. Pendugaan dan pembuatan fungsi regresi dengan estimasi *two point* mengikuti diagram alir Gambar 2.



Gambar 2. Pembuatan model fungsi regresi

Model fungsi regresi terbentuk kemudian dilakukan pencocokan kurva, evaluasi, pengujian dan validasi dengan MAPE menggunakan persamaan 11. Setelah itu dilanjutkan dengan pembuatan skenario pembebanan alternatif dengan asumsi jika penambahan beban bersifat induktif sehingga penambahan daya aktif diikuti daya reaktif. Diagram alir pembuatan skenario pembebanan alternatif beserta parameter operasinya ditunjukkan pada Gambar 3.



Gambar 3. Diagram alir penentuan skenario alternatif dan parameter operasi yang digunakan

3.5. Perencanaan Kapasitor Bank dan Simulasi

Kapasitor bank dipilih berdasarkan ketersediaan di pasaran online. Langkah awal perencanaan yaitu menentukan target faktor daya sebagai referensi. Setelah itu menghitung kebutuhan kompensasi daya reaktif beban (Q_c beban). Kebutuhan kompensasi ini digunakan untuk menentukan kompensasi daya reaktif kapasitor bank yang akan digunakan. Kompensasi daya reaktif kapasitor bank dalam hal ini ditentukan berdasarkan skema *six stage binary switching*. Setelah kapasitor bank ditentukan kemudian dilanjutkan simulasi. Simulasi perbaikan faktor daya dilakukan dengan perangkat lunak PSIM.

3.6. Perhitungan Rugi Daya

Rugi daya dihitung dengan persamaan 8. Rugi daya sebelum dan setelah perbaikan faktor daya dihitung pada bagian ini.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Kapasitor bank pada penelitian ini direncanakan beroperasi dari *baseline* berupa profil pembebanan hingga skenario alternatif yang dibuat hingga nilai persentase pembebanan 100%. Profil pembebanan dibuat dengan agregasi rekaman AMR PT PLN untuk representasi periode tipikal [21]. Setelah itu, skenario beban dibuat berdasarkan kapasitas yang tersedia dengan mewakili menggunakan 4 tingkatan nilai yang lebih tinggi dari *baseline* yaitu 25%, 50%, 75%, dan 100%. Parameter operasi dari skenario pembebanan dihipotesis dengan cara memodelkan daya semu dan aktif secara empiris menggunakan regresi linear.

Daya aktif pada pembuatan model regresi linear diposisikan sebagai peubah x , sedangkan semu peubah y . Pembuatan model regresi linear dilakukan melalui estimasi parameter dengan tujuan meminimalkan *total error absolute*. Selanjutnya evaluasi serta pengujian dan validasi dilakukan dengan *mean absolute percentage error* (MAPE). Evaluasi, pengujian, dan validasi dilakukan dengan membagi data menjadi 2 bagian. 80% dari jumlah data untuk evaluasi dan 20% sisanya untuk validasi dan pengujian [22]. Hasil pembuatan model menunjukkan korelasi daya aktif dan semu dengan persamaan $y = -1,9273 + 1,6188x$. *Intercept* persamaan tersebut adalah -1,9273 yang berarti jika daya aktif bernilai nol maka terprediksi daya semu sebesar -1,9273 kVA. Nilai ini merupakan perwakilan daya reaktif pada korelasi fisik sesungguhnya. Adapun hasil validasi dari model regresi linear menunjukkan kriteria valid karena MAPE kurang dari 10%.

Kapasitor bank pada penelitian ini direncanakan beroperasi otomatis terdiri dari 6 tahap. Konfigurasi *sequence* diatur secara *geometric* dengan *on-off* mengikuti skema *binary switching*. Skema ini merupakan konfigurasi *switching* kapasitor bank paling ekonomis menurut standar IEEE 141 Tahun 1993.

Hasil perencanaan menunjukkan kebutuhan kapasitor bank pada nilai 2,5 kVAR, 5 kVAR, 10 kVAR, 20 kVAR, 40 kVAR, dan 80 kVAR pada referensi target perbaikan faktor daya 1. Simulasi perangkat lunak PSIM telah dilakukan untuk pengujian dan validasi hasil perbaikan faktor daya. Hasil simulasi menunjukkan jika rata-rata faktor daya pada *baseline* dan skenario pembebanan meningkat mendekati 1, sedangkan rugi daya turun mendekati 0 kW. Hal ini menandakan adanya penghematan daya [16].

4.1. Profil pembebanan

Profil pembebanan dibuat dari agregasi rekaman AMR PT PLN. Rekaman AMR setiap 15 menit diagregasi per jam sehingga didapat profil pembebanan listrik tipikal. Nilai persentase pembebanan pada tahap ini juga ditentukan. Persentase pembebanan dihitung berdasarkan kapasitas yang tersedia yaitu 197 kVA. Profil dan persentase pembebanan PT Putra Agung Setia ditunjukkan pada Tabel 3.

Tabel 3. Profil dan persentase pembebanan

Jam	P (kW)	Q (kVAR)	S (kVA)	Faktor daya	V _{L-L} (kV)	Persentase pembebanan (%)
12:00:00 AM	3,183	1,274	3,429	0,928	0,402	1,741
1:00:00 AM	3,102	1,280	3,355	0,924	0,402	1,703
2:00:00 AM	3,048	1,283	3,307	0,922	0,403	1,679
3:00:00 AM	3,038	1,286	3,299	0,921	0,403	1,675
4:00:00 AM	3,045	1,262	3,296	0,924	0,401	1,673
5:00:00 AM	3,068	1,193	3,292	0,932	0,397	1,671
6:00:00 AM	2,981	1,234	3,226	0,924	0,397	1,638
7:00:00 AM	3,691	2,121	4,257	0,870	0,396	2,161
8:00:00 AM	6,877	5,859	9,034	0,787	0,394	4,586
9:00:00 AM	14,677	16,487	22,074	0,666	0,391	11,205
10:00:00 AM	17,334	20,032	26,490	0,654	0,390	13,447
11:00:00 AM	18,052	21,564	28,122	0,642	0,390	14,275
12:00:00 PM	10,471	11,281	15,391	0,693	0,394	7,813
1:00:00 PM	12,957	13,961	19,047	0,691	0,389	9,669
2:00:00 PM	19,350	22,827	29,925	0,647	0,387	15,190
3:00:00 PM	18,507	22,072	28,805	0,643	0,388	14,622
4:00:00 PM	12,969	14,152	19,196	0,682	0,393	9,744
5:00:00 PM	6,852	5,271	8,645	0,797	0,396	4,388
6:00:00 PM	5,327	2,550	5,906	0,902	0,396	2,998
7:00:00 PM	5,156	2,568	5,760	0,895	0,397	2,924
8:00:00 PM	4,452	1,767	4,790	0,930	0,397	2,431
9:00:00 PM	3,990	1,395	4,227	0,944	0,399	2,146
10:00:00 PM	3,616	1,341	3,856	0,938	0,400	1,958
11:00:00 PM	3,341	1,303	3,586	0,932	0,401	1,820
Rata-rata	7,878	7,307	10,930	0,824	0,396	5,548

Pada Tabel 3 ditunjukkan bahwa tidak semua persentase pembebanan mengalami masalah faktor daya. Persentase pembebanan terendah saat mengalami masalah faktor daya dengan nilai kurang dari 0,85 adalah 4,388% yang terjadi pada pukul 5.00 PM. Rata-rata masalah faktor daya terjadi antara pukul 8.00 AM hingga 5.00 PM. Kondisi ini terjadi karena pada rentang waktu tersebut peralatan-peralatan induktif sedang kerja secara dominan sehingga terdapat peningkatan rugi daya.

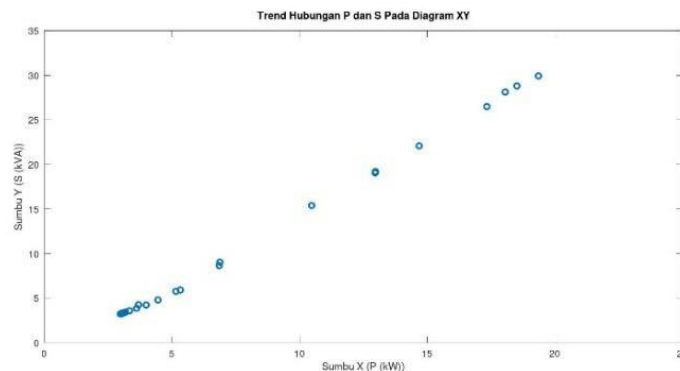
4.2. Trend Daya Aktif dan Semu

Daya aktif diposisikan sebagai peubah- x dan semu peubah- y pada analisis ini. Langkah awal dari analisis ini yaitu mengurutkan data daya aktif dan semu dari nilai terkecil ke terbesar. Daya terurut ditunjukkan Tabel 4.

Tabel 4. Daya terurut

No	Jam	P (kW)	S (kVA)	No	Jam	P (kW)	S (kVA)	No	Jam	P (kW)	S (kVA)
1	6:00:00 AM	2,981	3,226	9	10:00:00PM	3,616	3,856	17	12:00:00 PM	10,471	15,391
2	3:00:00 AM	3,038	3,299	10	7:00:00 AM	3,691	4,257	18	1:00:00 PM	12,957	19,047
3	4:00:00 AM	3,045	3,296	11	9:00:00 PM	3,990	4,227	19	4:00:00 PM	12,969	19,196
4	2:00:00 AM	3,048	3,307	12	8:00:00 PM	4,452	4,790	20	9:00:00 AM	14,677	22,074
5	5:00:00 AM	3,068	3,292	13	7:00:00 PM	5,156	5,760	21	10:00:00AM	17,334	26,490
6	1:00:00 AM	3,102	3,355	14	6:00:00 PM	5,327	5,906	22	11:00:00AM	18,052	28,122
7	12:00:00AM	3,183	3,429	15	5:00:00 PM	6,852	8,645	23	3:00:00 PM	18,507	28,805
8	11:00:00PM	3,341	3,586	16	8:00:00 AM	6,877	9,034	24	2:00:00 PM	19,350	29,925

Plot *trend* daya aktif dan semu Tabel 4 diatas pada koordinat- xy ditunjukkan pada Gambar 4 dibawah ini.



Gambar 4. *Trend* daya aktif dan semu

4.3. Pembuatan Fungsi Regresi Linear

Langkah awal pembuatan regresi linear yaitu mengelompokkan data menjadi dua bagian. Data daya Listrik Tabel 4 dikelompokkan menjadi data latih dan uji. 80% dari jumlah data dikelompokkan menjadi data latih dan 20% sisanya untuk data uji. Data latih digunakan untuk pelatihan mencakup estimasi, evaluasi, dan pencocokan kurva. Untuk data uji digunakan untuk pengujian modal dan validasi. Data latih dan uji yang telah dikelompokkan ditunjukkan Tabel 5 dan 6.

Tabel 5. Data latih

No	x	y	No	x	y	No	x	y	No	x	y
1	2,981	3,226	6	3,102	3,355	11	3,990	4,227	16	6,877	9,034
2	3,038	3,299	7	3,183	3,429	12	4,452	4,790	17	10,471	15,391
3	3,045	3,296	8	3,341	3,586	13	5,156	5,760	18	12,957	19,047
4	3,048	3,307	9	3,616	3,856	14	5,327	5,906	19	12,969	19,196
5	3,068	3,292	10	3,691	4,257	15	6,852	8,645	20	14,677	22,074

Tabel 6. Data uji

No	x	y	No	x	y	No	x	y	No	x	y
1	17,334	26,490	2	18,052	28,122	3	18,507	28,805	4	19,350	29,925

4.3.1. Estimasi Parameter

Estimasi parameter dilakukan menggunakan data latih Tabel 5. Hasil estimasi dengan jumlah *total error absolute* terendah merupakan parameter yang digunakan. Cara estimasi mengacu pada diagram alir Gambar 2. Hasil estimasi terbaik ditunjukkan dengan model persamaan di bawah ini :

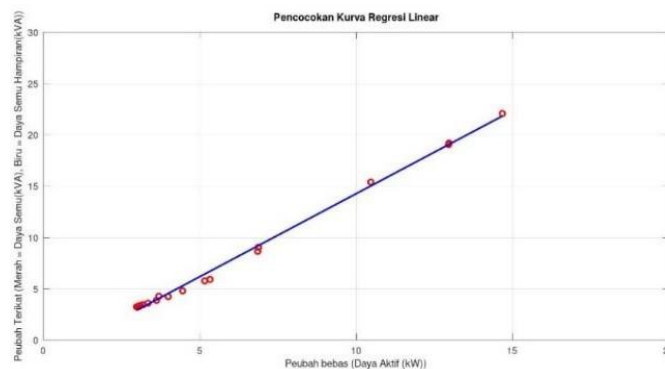
$$y = \alpha + \beta x$$

$$y = -1.9273 + 1.6188x$$

Persamaan diatas menghasilkan *total error absolute* terendah dari seluruh estimasi yang telah dilakukan dengan nilai 6,0068. Peubah y dan x pada persamaan diatas masing-masing merepresentasikan daya semu dan aktif dalam satuan kVA dan kW.

4.3.2. Pencocokan Kurva dan Evaluasi

Pencocokan kurva dilakukan menggunakan data latih Tabel 5 dengan substitusi masing-masing nilai peubah bebas ke dalam model persamaan regresi linear untuk mengetahui kecocokan fungsi terbentuk dengan sebaran *trend* data secara grafis yang kemudian dievaluasi dengan MAPE. Hasil pencocokan kurva diperlihatkan dengan *plot* grafis Gambar 5. Pada gambar itu, *plot* warna merah merupakan nilai asli, sedangkan biru nilai hampiran. Pada gambar tersebut juga ditunjukkan jika garis dari persamaan regresi terbentuk mengikuti sebaran *trend* data. Hal ini menunjukkan jika persamaan regresi yang terbentuk telah cocok secara grafis. Adapun nilai MAPE yang dihasilkan dari pencocokan kurva tersebut adalah 6,0001%. Nilai MAPE itu menunjukkan bahwa hasil evaluasi regresi linear telah berada pada kriteria sangat akurat berdasarkan interpretasi data MAPE Tabel 3.



Gambar 5. *Plot* pencocokan kurva persamaan regresi linear

4.3.3. Pengujian dan Validasi

Pengujian dan validasi dilakukan dengan data uji Tabel. 6. Model regresi linear dikatakan valid sebagai fungsi hampiran jika hasil pengujian menunjukkan nilai MAPE kurang dari 10%. Hasil pengujian dan validasi ditunjukkan pada Tabel 7.

Tabel 7. Hasil pengujian dan validasi MAPE

i	x_i	y_i	y'_i	$\frac{ y_i - y'_i }{y_i} \times 100\%$
1	17,334	26,49	26,133	1,3478
2	18,052	28,122	27,295	2,9398
3	18,507	28,805	28,032	2,6841
4	19,35	29,925	29,396	1,7661
MAPE (%)				2,1845

Berdasarkan hasil pengujian diatas ditunjukkan jika nilai MAPE yang dihasilkan oleh persamaan regresi linear dengan data uji adalah 2,1845% sehingga model terbentuk berada pada kriteria valid.

4.4. Pembuatan Skenario Pembebanan

Skenario pembebanan dibuat dengan *baseline* profil beban. Nilai persentase pembebanan tertinggi saat sistem mengalami masalah faktor daya pada penelitian ini adalah 15,190% yang terjadi pada pukul 02.00 PM. Oleh karena itu skenario pembebanan alternatif ditentukan pada nilai 25%, 50%, 75%, dan 100% dari kapasitas eksisting. Skenario alternatif dipilih lebih tinggi dari pembebanan tertinggi *baseline*. Nilai skenario ini dipilih untuk merepresentasikan seluruh kondisi operasi yang mungkin terjadi dari kapasitas eksisting dengan menggunakan 4 nilai. Parameter sistem saat beroperasi pada skenario pembebanan alternatif tersebut ditunjukkan pada Tabel 8. Cara menentukan parameter itu ditentukan

dengan diagram alir Gambar 3.

Tabel 8. Parameter operasi dari skenario pembebanan alternatif

No	Skenario persentase Pembebanan (%)	S (kVA)	P (kW)	Q (kVAR)	Faktor daya
1	25	49,250	31,614	37,764	0,642
2	50	98,500	62,038	76,508	0,630
3	75	147,750	92,462	115,243	0,626
4	100	197,000	122,886	153,974	0,624

Pada Tabel 8 ditunjukkan jika seluruh skenario persentase pembebanan alternatif juga mengalami masalah faktor daya.

4.5. Perencanaan Kapasitor Bank

Faktor daya diperbaiki dari persentase pembebanan terendah saat sistem mengalami masalah faktor daya pada *baseline* profil beban hingga skenario alternatif. Kapasitor bank pada penelitian ini direncanakan mampu beroperasi untuk memperbaiki faktor daya dari persentase pembebanan 4,388% hingga 100% dengan parameter operasi ditunjukkan Tabel 9.

Tabel 9. Parameter perbaikan faktor daya

No	Persentase pembebanan (%)	S (kVA)	P (kW)	Q (kVAR)	Faktor daya
1	4,388	8,645	6,852	5,271	0,797
2	4,586	9,034	6,877	5,859	0,787
3	7,813	15,391	10,471	11,281	0,693
4	9,669	19,047	12,957	13,961	0,691
5	9,744	19,196	12,969	14,152	0,682
6	11,205	22,074	14,677	16,487	0,666
7	13,447	26,490	17,334	20,032	0,654
8	14,275	28,122	18,052	21,564	0,642
9	14,622	28,805	18,507	22,072	0,643
10	15,190	29,925	19,350	22,827	0,647
11	25	49,250	31,614	37,764	0,642
12	50	98,500	62,038	76,508	0,630
13	75	147,750	92,462	115,243	0,626
14	100	197,000	122,886	153,974	0,624

Tahap awal perencanaan kapasitor bank yaitu menentukan faktor daya target sebagai referensi. Setelah itu menghitung kebutuhan kompensasi daya reaktif beban (Qc beban). Hasil perhitungan Qc beban dengan target referensi 1 ditunjukkan Tabel 10.

Tabel 10. Hasil perhitungan Qc beban

No	Persentase beban (%)	PF1	PF referensi	Qc Beban (kVAR)	No	Persentase beban (%)	PF1	PF referensi	Qc Beban (kVAR)
1	4,388	0,797	1	5,271	8	14,275	0,642	1	21,564
2	4,586	0,787	1	5,859	9	14,622	0,643	1	22,072
3	7,813	0,693	1	11,281	10	15,190	0,647	1	22,827
4	9,669	0,691	1	13,961	11	25	0,642	1	37,764
5	9,744	0,682	1	14,152	12	50	0,630	1	76,508
6	11,205	0,666	1	16,487	13	75	0,626	1	115,243
7	13,447	0,654	1	20,032	14	100	0,624	1	153,974

Q_c beban terendah dan tertinggi hasil perhitungan Tabel 10 adalah 5,271 kVAR dan 153,974 kVAR sehingga kompensasi daya reaktif kapasitor bank (Q_c kapasitor bank) yang sesuai berdasarkan skema *six stage binary switching* adalah 2,5 kVAR, 5 kVAR, 10 kVAR, 20 kVAR, 40 kVAR, dan 80 kVAR. Dengan demikian pola kompensasi daya reaktif (Pola Q_c kapasitor bank) terendah dan tertinggi yang dapat dihasilkan adalah 2,5 kVAR dan 157,5 kVAR. Selanjutnya proses otomatisasi *switching* pada perencanaan ini didasarkan Q_c beban. Q_c beban digunakan sebagai acuan untuk menentukan *on-off* kapasitor bank yang bekerja sehingga jika beban berubah maka kompensasi daya reaktif kapasitor bank secara otomatis menyesuaikan. Variasi *switching* kapasitor bank ditunjukkan Tabel 11.

Tabel 11. Variasi *switching* Kapasitor bank

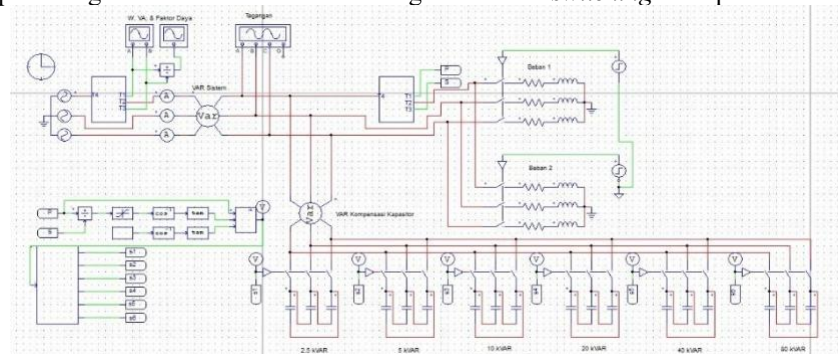
No	Q_c Beban (KVAR)	Pola Q_c Kapasitor Bank (KVAR)	Tahap Kapasitor Bank (Stage)					
			S1	S2	S3	S4	S5	S6
1	$2.5 \leq Q_c < 5$	2.5	1	0	0	0	0	0
2	$5 \leq Q_c < 7.5$	5	0	1	0	0	0	0
3	$7.5 \leq Q_c < 10$	7.5	1	1	0	0	0	0
4	$10 \leq Q_c < 12.5$	10	0	0	1	0	0	0
5	$12.5 \leq Q_c < 15$	12.5	1	0	1	0	0	0
6	$15 \leq Q_c < 17.5$	15	0	1	1	0	0	0
7	$17.5 \leq Q_c < 20$	17.5	1	1	1	0	0	0
8	$20 \leq Q_c < 22.5$	20	0	0	0	1	0	0
9	$22.5 \leq Q_c < 25$	22.5	1	0	0	1	0	0
10	$25 \leq Q_c < 27.5$	25	0	1	0	1	0	0
11	$27.5 \leq Q_c < 30$	27.5	1	1	0	1	0	0
12	$30 \leq Q_c < 32.5$	30	0	0	1	1	0	0
13	$32.5 \leq Q_c < 35$	32.5	1	0	1	1	0	0
14	$35 \leq Q_c < 37.5$	35	0	1	1	1	0	0
15	$37.5 \leq Q_c < 40$	37.5	1	1	1	1	0	0
16	$40 \leq Q_c < 42.5$	40	0	0	0	0	1	0
17	$42.5 \leq Q_c < 45$	42.5	1	0	0	0	1	0
18	$45 \leq Q_c < 47.5$	45	0	1	0	0	1	0
19	$47.5 \leq Q_c < 50$	47.5	1	1	0	0	1	0
20	$50 \leq Q_c < 52.5$	50	0	0	1	0	1	0
21	$52.5 \leq Q_c < 55$	52.5	1	0	1	0	1	0
22	$55 \leq Q_c < 57.5$	55	0	1	1	0	1	0
23	$57.5 \leq Q_c < 60$	57.5	1	1	1	0	1	0
24	$60 \leq Q_c < 62.5$	60	0	0	0	1	1	0
25	$62.5 \leq Q_c < 65$	62.5	1	0	0	1	1	0
26	$65 \leq Q_c < 67.5$	65	0	1	0	1	1	0
27	$67.5 \leq Q_c < 70$	67.5	1	1	0	1	1	0
28	$70 \leq Q_c < 72.5$	70	0	0	1	1	1	0
29	$72.5 \leq Q_c < 75$	72.5	1	0	1	1	1	0
30	$75 \leq Q_c < 77.5$	75	0	1	1	1	1	0
31	$77.5 \leq Q_c < 80$	77.5	1	1	1	1	1	0
32	$80 \leq Q_c < 82.5$	80	0	0	0	0	0	1
33	$82.5 \leq Q_c < 85$	82.5	1	0	0	0	0	1
34	$85 \leq Q_c < 87.5$	85	0	1	0	0	0	1
35	$87.5 \leq Q_c < 90$	87.5	1	1	0	0	0	1

Tabel 11. Lanjutan variasi *switching* Kapasitor bank

No	Qc beban (kVAR)	Pola Qc Kapasitor Bank (kVAR)	Tahap kapasitor bank (Stage)					
			S1	S2	S3	S4	S5	S6
36	$90 \leq Q_c < 92.5$	90	0	0	1	0	0	1
37	$92.5 \leq Q_c < 95$	92.5	1	0	1	0	0	1
38	$95 \leq Q_c < 97.5$	95	0	1	1	0	0	1
39	$97.5 \leq Q_c < 100$	97.5	1	1	1	0	0	1
40	$100 \leq Q_c < 102.5$	100	0	0	0	1	0	1
41	$102.5 \leq Q_c < 105$	102.5	1	0	0	1	0	1
42	$105 \leq Q_c < 107.5$	105	0	1	0	1	0	1
43	$107.5 \leq Q_c < 110$	107.5	1	1	0	1	0	1
44	$110 \leq Q_c < 112.5$	110	0	0	1	1	0	1
45	$112.5 \leq Q_c < 115$	112.5	1	0	1	1	0	1
46	$115 \leq Q_c < 117.5$	115	0	1	1	1	0	1
47	$117.5 \leq Q_c < 120$	117.5	1	1	1	1	0	1
48	$120 \leq Q_c < 122.5$	120	0	0	0	0	1	1
49	$122.5 \leq Q_c < 125$	122.5	1	0	0	0	1	1
50	$125 \leq Q_c < 127.5$	125	0	1	0	0	1	1
51	$127.5 \leq Q_c < 130$	127.5	1	1	0	0	1	1
52	$130 \leq Q_c < 132.5$	130	0	0	1	0	1	1
53	$132.5 \leq Q_c < 135$	132.5	1	0	1	0	1	1
54	$135 \leq Q_c < 137.5$	135	0	1	1	0	1	1
55	$137.5 \leq Q_c < 140$	137.5	1	1	1	0	1	1
56	$140 \leq Q_c < 142.5$	140	0	0	0	1	1	1
57	$142.5 \leq Q_c < 145$	142.5	1	0	0	1	1	1
58	$145 \leq Q_c < 147.5$	145	0	1	0	1	1	1
59	$147.5 \leq Q_c < 150$	147.5	1	1	0	1	1	1
60	$150 \leq Q_c < 152.5$	150	0	0	1	1	1	1
61	$152.5 \leq Q_c < 155$	152.5	1	0	1	1	1	1
62	$155 \leq Q_c < 157.5$	155	0	1	1	1	1	1
63	$157.5 \leq Q_c < 160$	157.5	1	1	1	1	1	1

4.6 Simulasi Perbaikan Faktor Daya

Hasil perencanaan kapasitor bank untuk perbaikan faktor daya disimulasikan menggunakan perangkat lunak PSIM. Rangkaian simulasi perbaikan faktor daya ditunjukkan Gambar 6. *On-off* kapasitor pada rangkaian tersebut dilakukan mengikuti variasi *switching* hasil perencanaan Tabel 11.



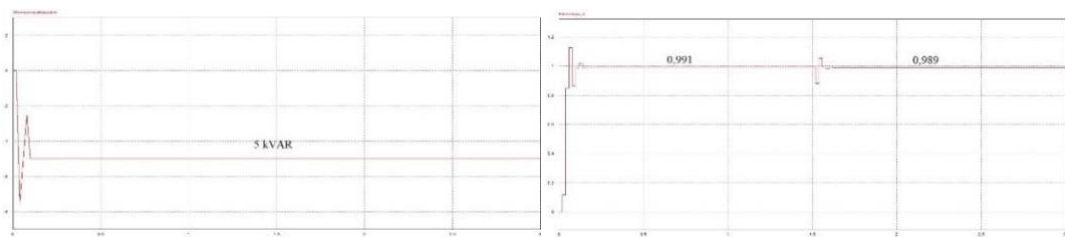
Gambar 6. Rangkaian simulasi perbaikan faktor daya pada PSIM

Simulasi perbaikan faktor daya dilakukan selama 3s dan setiap 1,5s beban dikondisikan mengalami perubahan, pengaturan perubahan beban diatur mengikuti konfigurasi Tabel 12.

Tabel 12. Konfigurasi perubahan beban simulasi

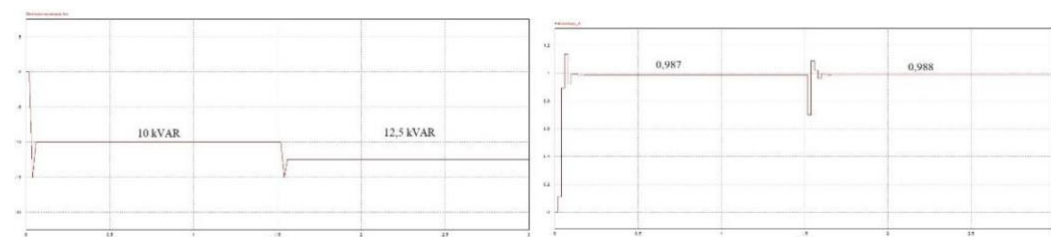
Simulasi ke-	Persentase pembebanan (%)		Simulasi ke-	Persentase pembebanan (%)	
	Beban 1	Beban 2		Beban 1	Beban 2
1	4,388	4,586	5	14,622	15,190
2	7,813	9,669	6	25	50
3	9,744	11,205	7	75	100
4	13,447	14,275			

Simulasi pertama dilakukan pada persentase pembebanan 4,388% dan 4,586%. Qc kebutuhan beban terhitung pada nilai 5,271 dan 5,859 kVAR. Tahap kapasitor bank aktif pada dua kondisi itu adalah tahap 2 dengan nilai 5 kVAR karena keduanya berada pada pola Qc kapasitor bank yang sama. Oleh karena itu Qc kebutuhan beban dan Qc tersedia dari pola Qc kapasitor bank berbeda nilai (tidak tepat) sehingga membuat faktor daya yang dihasilkan juga tidak tepat pada referensi yang ditetapkan. Kurva pola Qc kapasitor bank dan faktor daya yang dihasilkan ditunjukkan Gambar 7.



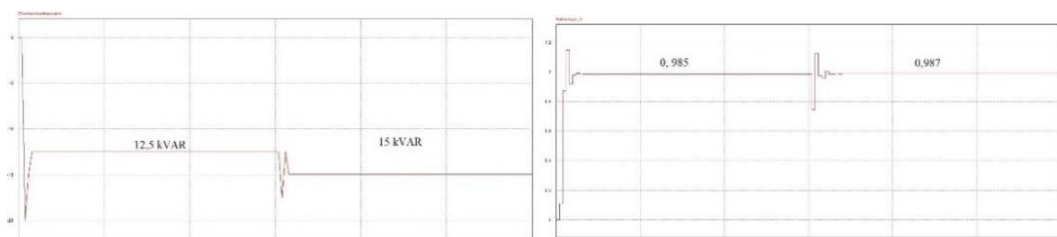
Gambar 7. Kurva Pola Qc kapasitor bank (kiri) dan faktor daya hasil perbaikan (kanan) pada persentase pembebanan 4,388% dan 4,586%

Simulasi kedua dilakukan pada persentase pembebanan 7,813% dan 9,669%. Keduanya memiliki Qc kebutuhan beban pada nilai 11,072 dan 17,737 kVAR. Tahap kapasitor bank yang aktif pada dua kondisi itu adalah tahap 3 serta 1 dan 3 sehingga pola Qc kapasitor bank yang dihasilkan 10 dan 12,5 kVAR. Qc kebutuhan beban dan Qc tersedia juga berbeda nilai sehingga faktor daya tidak dapat tepat pada referensi. Kurva Pola Qc kapasitor bank dan faktor daya yang dihasilkan ditunjukkan Gambar 8.



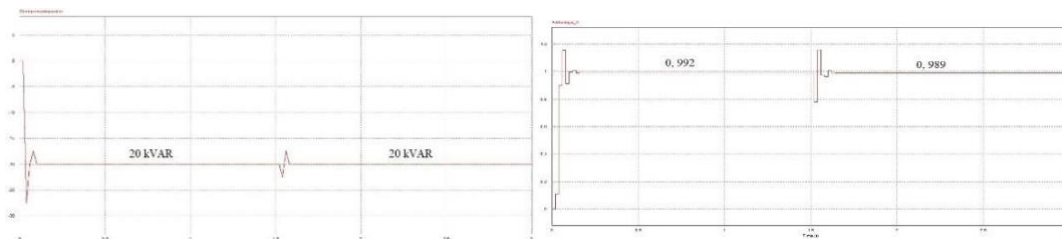
Gambar 8. Kurva Pola Qc kapasitor bank (kiri) dan faktor daya hasil perbaikan (kanan) pada persentase pembebanan 7,813% dan 9,669%

Simulasi ketiga dilakukan pada persentase pembebanan 9,744% dan 11,205%. Qc kebutuhan beban terhitung 14.152 kVAR dan 16.487 kVAR. Pola Qc Kapasitor bank yang dihasilkan yaitu 12,5 dan 15 kVAR. Kurva pola Qc kapasitor bank dan faktor daya yang dihasilkan ditunjukkan Gambar 9.



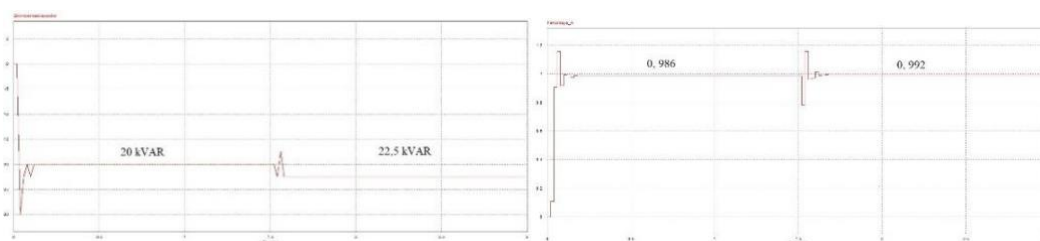
Gambar 9. Kurva Pola Qc kapasitor bank (kiri) dan faktor daya hasil perbaikan (kanan) pada persentase pembebanan 9,744% dan 11,205%

Simulasi empat dilakukan pada persentase pembebanan 13,447% dan 14,275%. Qc kebutuhan beban simulasi ini terhitung pada 20,032 kVAR dan 21,564 kVAR. Keduanya berada pada pola kompensasi yang sama. Oleh karena itu kapasitor yang aktif sama yaitu tahap 4 dengan nilai Pola Qc kapasitor bank 20 kVAR. Kurva Pola Qc kapasitor bank dan faktor daya yang dihasilkan ditunjukkan Gambar 9.



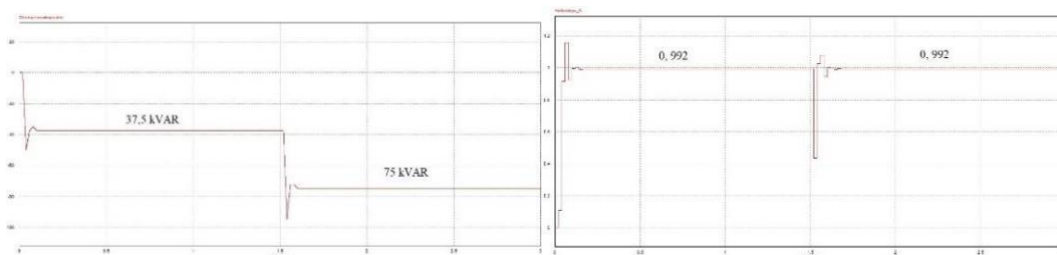
Gambar 9. Kurva Pola Qc kapasitor bank (kiri) dan faktor daya hasil perbaikan (kanan) pada persentase pembebanan 13,447% dan 14,275%

Persentase pembebanan pada simulasi kelima diatur pada nilai 14,662% dan 15,190%. Kebutuhan Qc beban pada simulasi ini terhitung pada 22,072 dan 22,827 kVAR dengan kapasitor aktif tahap 4 serta 1 dan 4. Pola Qc Kapasitor bank yang dihasilkan yaitu 20 dan 22,5 kVAR. Qc tersedia tersebut juga berbeda dengan kebutuhan sehingga faktor daya tidak tepat sesuai referensi. Kurva Pola Qc kapasitor bank dan faktor daya yang dihasilkan ditunjukkan Gambar 10.



Gambar 10. Kurva Pola Qc kapasitor bank (kiri) dan faktor daya hasil perbaikan (kanan) pada persentase pembebanan 14,662% dan 15,190%.

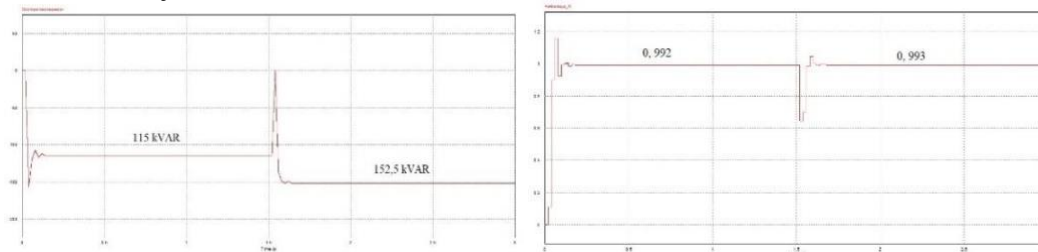
Simulasi enam dilakukan pada skenario alternatif. Persentase beban pada simulasi ini diatur pada nilai 25% dan 50%. Qc kebutuhan beban terhitung 37,714 dan 76,508 kVAR. Kapasitor aktif pada persentase beban 25% adalah tahap 1, 2, 3, dan 4. Untuk persentase beban 50% adalah tahap 2, 3, 4, dan 5. Pola Qc kapasitor bank yang dihasilkan yaitu 37,5 dan 75 kVAR. Kurva pola Qc kapasitor bank dan faktor daya yang dihasilkan ditunjukkan Gambar 11.



Gambar 11. Kurva Pola Qc kapasitor bank (kiri) dan faktor daya hasil perbaikan (kanan) pada persentase pembebanan 25% dan 50%

Simulasi terakhir dilakukan pada persentase pembebanan 75% dan 100%. Dua persentase pembebanan ini juga merupakan skenario pembebanan alternatif. Pada simulasi ini, Qc kebutuhan beban pada persentase pembebanan 75% terhitung pada nilai 115,243 kVAR dan pada persentase pembebanan 100% pada nilai 153,974 kVAR. Dengan demikian maka kapasitor bank yang aktif pada persentase pembebanan 75% adalah tahap 2, 3, 4, dan 6 serta pada persentase pembebanan 100% adalah tahap 1, 3, 4, 5, dan 6. Kapasitor bank tahap 1 hingga 6 masing-masing memiliki nilai 2,5 kVAR, 5 kVAR, 10 kVAR, 20 kVAR, 40 kVAR, dan 80 kVAR. Oleh sebab itu nilai pola Qc kapasitor bank yang dihasilkan pada simulasi ini yaitu 115 dan 152,5 kVAR. Qc tersedia dari pola Qc Kapasitor

bank dan Qc Kebutuhan beban juga tidak dapat tepat yang berakibat pada nilai faktor daya tidak bisa tepat pada referensi yang di tetapkan. Adapun Kurva pola Qc kapasitor bank dan faktor daya yang dihasilkan ditunjukkan Gambar 12.



Gambar 12. Kurva Pola Qc kapasitor bank (kiri) dan faktor daya hasil perbaikan (kanan) pada persentase pembebanan 75% dan 100%

Dari beberapa simulasi perbaikan faktor daya listrik yang telah dilakukan diatas, terlihat apabila faktor daya listrik hasil perbaikan hanya mendekati 1. Faktor daya hasil perbaikan tidak dapat tepat berada pada referensi yang telah ditetapkan. Hal itu terjadi karena Qc tersedia yang dihasilkan dari pola Qc kapasitor bank tidak bisa tepat sesuai Qc kebutuhan beban namun mengikuti pola dari skema *six stage binary switching*. Oleh karena itu faktor daya listrik hasil perbaikan tidak bisa tepat sesuai referensi yang telah ditetapkan namun hanya mendekati dengan nilai diatas regulasi PT PLN yaitu 0,85.

4.6. Rugi Daya Sebelum dan Setelah Perbaikan

Rugi daya awal sebelum dan setelah perbaikan dihitung pada bagian ini menggunakan persamaan 8. Hasil perhitungan rugi daya sebelum dan setelah perbaikan ditunjukkan Tabel 13 dan 14.

Tabel 13. Rugi daya pada *baseline* profil beban

No	Persentase	Rugi daya (PI (kW))		No	Persentase	Rugi daya (PI (kW))	
	Beban	Ploss1	Ploss2		Beban	Ploss1	Ploss2
1	4,388	1,755	0,007	6	11,205	7,373	0,089
2	4,586	1,924	0,055	7	13,447	9,166	0,017
3	7,813	4,725	0,084	8	14,275	10,068	0,072
4	9,669	5,886	0,091	9	14,622	10,283	0,130
5	9,744	6,104	0,118	10	15,190	10,564	0,019
Rata-Rata						6,785	0,068

Tabel 14. Rugi daya pada skenario alternatif

No	Persentase	Rugi daya (PI (kW))		No	Persentase	Rugi daya (PI (kW))	
	Beban	Ploss1	Ploss2		Beban	Ploss1	Ploss2
1	25	17,631	0,032	3	75	55,258	0,092
2	50	36,445	0,062	4	100	74,072	0,123
Rata-Rata						45,852	0,077

Ploss1 pada Tabel 13 dan 14 menunjukkan rugi daya awal sebelum perbaikan faktor daya, sedangkan Ploss2 rugi daya setelah faktor daya diperbaiki. Pada Tabel 13 dan 14 diperlihatkan jika rata-rata rugi daya sebelum perbaikan adalah 6,785 kW dan 45,852 kW. 6,785 kW merupakan rugi daya pada profil beban, sedangkan 45,852 kW rugi daya pada skenario alternatif. Setelah perbaikan faktor daya, rata-rata rugi daya pada profil beban dan skenario alternatif turun menjadi 0,068 kW dan 0,077 kW yang berarti ada pengurangan rugi daya mendekati 0 kW. Hal ini juga menandakan jika secara faktual, perbaikan faktor daya ini berhasil menurunkan rugi daya secara drastis dari rata-rata 6,785 kW menjadi 0,068 kW.

5. KESIMPULAN

Berdasarkan penelitian mengenai perencanaan perbaikan faktor daya pada industri otomotif ini, didapatkan kesimpulan bahwa untuk meningkatkan faktor daya dengan target referensi 1 dan mengurangi rugi daya pada PT Putra Agung Setia menggunakan kapasitor bank kompensasi terpusat hingga nilai pembebanan 100% maka diperlukan kapasitor bank dengan nilai 2,5 kVAR, 5 kVAR, 10 kVAR, 20 kVAR,

40 kVAR, dan 80 kVAR yang beroperasi secara otomatis mengacu skema *six stage binary switching*. Perbaikan faktor daya ini dapat meningkatkan rata-rata faktor daya mendekati satu dan mengurangi rugi daya mendekati 0 kW. Peningkatan faktor daya tidak dapat tepat sesuai dengan referensi yang telah ditetapkan karena kapasitor bank aktif secara bertahap mengikuti skema *six stage binary switching*.

REFERENSI

- [1] M. Kalhari, H. E. Bandara, dan S. Ediriweera, "Power factor improvement of industrial loads using a capacitor bank and a solar pv system," in *International conference on advances in technology and computing*, 2022, hal. 7–11, doi: 10.48084/etasr.17491.
- [2] Y. Panggei, Y. R. Pasalli, F. Y. S. Paisey, dan A. Rehiara, "Power factor correction for energy efficient at public hospital of manokwari," *J. Innov. Mater. Energy, Sustain. Eng.*, vol. 1, no. 1, hal. 20–34, 2023, doi: 10.61511/jimese.v1i1.2023.33.
- [3] M. B. Idris dan E. Shafee Mohammed, "The economics of power factor improvement," *Int. J. Innov. Res. Electr. Electron. Instrum. Control Eng.*, vol. 11, no. 9, hal. 1–4, 2023, doi: 10.17148/IJREEICE.2023.11901.
- [4] S. Saodah, I. M. W. Kastawan, E. Yusuf, B. P. Manunggal, dan M. Maryanti, "Simulation of effects of using capacitor for reactive power (VAR) compensation on electrical power supply quality," in *Proceedings of the 5th FIRST T1 T2 2021 International Conference (FIRST-T1-T2 2021)*, 2021, hal. 168–174. doi: 10.2991/ahe.k.220205.029.
- [5] N. M. Karmiathi dan I. K. A. Putra, "Technical analysis of power factor improvement using etap 12.6 at regent resort & holiday inn canggu," *Matrix J. Manaj. Teknol. dan Inform.*, vol. 12, no. 1, hal. 38–50, 2022, doi: 10.31940/matrix.v12i1.38-50.
- [6] C. M. Coman, A. Florescu, dan C. D. Oancea, "Improving the efficiency and sustainability of power systems using distributed power factor correction methods," *Sustain.*, vol. 12, no. 8, hal. 1–20, 2020, doi: 10.3390/SU12083134.
- [7] P. E. Pambudi, S. Kristiyana, M. Suyanto, dan D. Rahmadi, "Analisis tinjauan ekonomi teknis dalam pemasangan kapasitor bank untuk memperbaiki nilai faktor daya pada beban industri," *Avitec*, vol. 4, no. 1, hal. 137–150, 2022, doi: 10.28989/avitec.v4i1.1184.
- [8] S. A. Giha Yidi, V. Sousa Santos, K. Berdugo Sarmiento, J. E. Candelo-Becerra, dan J. de la Cruz, "Comparison of reactive power compensation methods in an industrial electrical system with power quality problems," *Electricity*, vol. 5, no. 3, hal. 642–661, 2024, doi: 10.3390/electricity5030032.
- [9] H. M. Yudha dan P. Risma, *Perencanaan Sistem Tenaga Listrik*. Palembang: Fakultas Teknik Universitas Tridianti, 2022.
- [10] M. Nahvi dan J. a. Edminister, *Schaum Outlines : Electric Circuits*, 4 ed. McGraw-Hill, 2003. doi: 10.1036/0071425829.
- [11] A. Wibowo, *Instalasi Listrik Industri*. Semarang: Yayasan Prima Agus Teknik, 2021.
- [12] U. Ilmi, "Studi persamaan regresi linear untuk penyelesaian persoalan daya listrik," *J. Tek.*, vol. 11, no. 1, hal. 1083–1088, 2019, doi: 10.30736/jt.v11i1.291.
- [13] D. Leherbauer dan P. Hehenberger, "Physics-based modeling and parameter tracing for industrial demand-side management applications: a novel approach," *Sustain.*, vol. 16, no. 5, 2024, doi: 10.3390/su16051995.
- [14] Epiwardi, Ruwahyoto, dan Heri sungkowo, "Perencanaan dan analisis kelayakan investasi proyek pemasangan kapasitor bank pada instalasi pemanfaatan energi listrik," *J. Tek. Ilmu Dan Apl.*, vol. 8, no. 1, hal. 77–82, 2020, doi: 10.33795/jtia.v9i1.16.
- [15] K. . Agrawal, *Industrial Power Engineering and Applications Handbook*. New Delhi: Planta Three, 2001.
- [16] I. S. Eyato, "Perbaikan faktor daya motor induksi penggerak pompa air mata air kanoman magelang menggunakan kapasitor bank," Universitas Tidar, 2024.
- [17] L. Zakaria dan U. Muharramah, *Pengantar Metode Numerik (Solusi Masalah Dengan Matematika)*. Bandar Lampung: Aura Publisher, 2023.
- [18] K. J. Berry, J. E. Johnston, dan P. W. Mielke, *The Measurement of Association: A Permutation Statistical Approach*. Switzerland: Springer International Publishing, 2018.
- [19] I. Amansyah, J. Indra, E. Nurlaelasari, dan A. R. Juwita, "Prediksi penjualan kendaraan menggunakan regresi linear: studi kasus pada industri otomotif di indonesia," *J. Soc. Sci. Res.*, vol. 4, no. 4, hal. 1199–1216, 2024, doi: 10.31004/innovative.v4i4.12735.
- [20] W. Ningrum, R. Boer, dan Apip, "Statistical assessment of high-resolution climate model rainfall data in the ciliwung watershed, indonesia," *Agromet*, vol. 37, no. 1, hal. 21–33, 2023, doi: 10.29244/j.agromet.37.1.21-33.
- [21] Á. García-Cerezo, L. Baringo, dan R. García-Bertrand, "Representative days for expansion decisions

- in power systems,” *Energies*, vol. 13, no. 2, hal. 1–18, 2020, doi: 10.3390/en13020335.
- [22] M. R. Herlando, S. H. Wijoyo, dan M. A. Akbar, “Analisis perbandingan machine learning untuk memprediksi harga minyak dengan regresi linear dan support vector regression,” *J. Pengemb. Teknol. Inf. dan Ilmu Komput.*, vol. 9, no. 6, hal. 2548–964, 2025.