

# Analisis Kebutuhan Bank Kapasitor Untuk Perbaikan Faktor Daya di PT Beras Rajawali Menggunakan *Optimal Capacitor Placement* ETAP 19

Barik Irfani Al Firdausi<sup>1</sup>, M. A'an Auliq<sup>1</sup>, Fitriana<sup>1,\*</sup>

<sup>1</sup>Teknik Elektro, Universitas Muhammadiyah Jember, barikfirdausi@gmail.com; aan.auliq@unmuhjember.ac.id;

\*Korespondensi: fitriana@unmuhjember.ac.id

**Abstract** – Currently, the demand for electrical energy is continuously increasing due to growing needs, including in the industrial sector such as PT Beras Rajawali, which is continually expanding its production facilities to meet the rising demand. The increase in the number of production units will result in a decrease in power factor that needs to be addressed promptly. One way to mitigate or reduce power losses due to low power factor is by installing a capacitor bank, as demonstrated in this study. The installation of this capacitor bank is expected to operate effectively and efficiently, necessitating prior analysis through simulation before the actual installation of the capacitor bank. The analysis method employed in this research is *Optimal Capacitor Placement (OCP)* using ETAP software. Simulation results and calculations indicate that installing a capacitor bank on a bus with a decreased power factor successfully restores the power factor to normal levels. This is evident from the fact that, before the capacitor bank installation, the current on both buses reached 101.1 A and 111.4 A, whereas after the capacitor bank was installed, the current decreased to 67.9 A and 78.5 A.

**Keywords** – capacitor bank, ETAP 19, optimal capacitor placement, power factor

**Intisari** – Saat ini, permintaan energi listrik terus meningkat karena kebutuhan yang bertambah, termasuk di sektor industri seperti PT Beras Rajawali yang terus memperluas fasilitas produksinya guna memenuhi permintaan yang semakin tinggi. Adanya peningkatan jumlah unit produksi akan terjadi penurunan faktor daya yang perlu segera diatasi. Salah satu cara untuk mengatasi atau mengurangi kerugian daya akibat faktor daya yang rendah adalah dengan memasang bank kapasitor. Pemasangan bank kapasitor ini diharapkan dapat bekerja secara efektif dan efisien sehingga perlu dilakukan analisis terlebih dahulu melalui simulasi sebelum dilakukan pemasangan bank kapasitor secara *real*. Metode analisis yang digunakan pada penelitian ini yaitu *Optimal Capacitor Placement (OCP)* menggunakan *software* ETAP. Hasil simulasi dan perhitungan menunjukkan bahwa pemasangan bank kapasitor pada bus yang mengalami penurunan faktor daya berhasil mengembalikan faktor daya menjadi normal. Hal ini terlihat ketika sebelum dipasang bank kapasitor, arus pada kedua mencapai 101,1 A dan 111,4 A, sedangkan setelah dipasang bank kapasitor, besarnya arus menurun menjadi 67,9 A dan 78,5 A.

**Kata kunci** – capacitor bank, ETAP 19, optimal capacitor placement, faktor daya

## I. PENDAHULUAN

Dalam sistem ketenagalistrikan terdapat tiga jenis faktor daya yang dikenal, yaitu faktor daya *leading* (terdahulu), faktor daya *unity*, dan faktor daya *lagging* (terbelakang). Faktor daya *unity* terjadi ketika tegangan sefase dengan arus. Sementara itu, pada faktor daya *lagging*, fase arus tertinggal dari tegangan. Hal ini menggambarkan situasi di mana beban rangkaian bersifat induktif. Sedangkan pada faktor daya *leading*, fase arus mendahului tegangan yang merujuk pada kondisi di mana beban rangkaian bersifat kapasitif. Ketika terjadi penurunan faktor daya, perbaikan diperlukan bukan hanya untuk mengurangi rugi-rugi daya (*power loss*), tetapi juga untuk mengurangi biaya operasional listrik, mengurangi penurunan tegangan, dan meningkatkan kapasitas sistem [1].

Salah satu cara untuk mengurangi ataupun memperbaiki rugi-rugi daya (*power loss*) yang diakibatkan oleh faktor daya yang rendah adalah dengan melakukan pemasangan bank kapasitor [2]. Bank kapasitor ini dipasang pada beban induktif atau ketika fase arus berada dalam kondisi *lagging* [3]. Untuk beban yang bersifat kapasitif atau ketika fase arus berada dalam kondisi *leading*, diperlukan pemasangan induktor untuk menyelaraskan tegangan dan arus agar sefase atau *unity*. Penggunaan kapasitor ini dapat menghasilkan penghematan daya reaktif.

Pada penelitian yang dilakukan oleh Billahi [4], dilakukan pengamatan terhadap perubahan faktor daya sebagai akibat dari pemasangan bank kapasitor di unit *boiler* PPSDM Migas (Pusat Pengembangan Sumber Daya Manusia Minyak dan Gas Bumi) Cepu. Berdasarkan simulasi yang dilakukan, pemasangan bank kapasitor dengan nilai kapasitans 45 kVAR tersebut menyebabkan perubahan nilai faktor daya yang awalnya 89,0 menjadi meningkat menjadi 97,6 sesuai dengan target faktor daya yang diinginkan. Arus pada saluran bus juga mengalami penurunan dari yang sebelumnya 16,4 A menjadi 14,9 A .

Penelitian lainnya terkait penggunaan bank kapasitor juga pernah dilakukan oleh Nurmahandy [5]. Pada penelitian tersebut, peneliti mengaplikasikan metode *Fast Decoupled* dan ETAP untuk mensimulasikan perbaikan faktor daya menggunakan bank kapasitor pada Penyulang Barata PT PLN (Persero) Ngagel Surabaya.

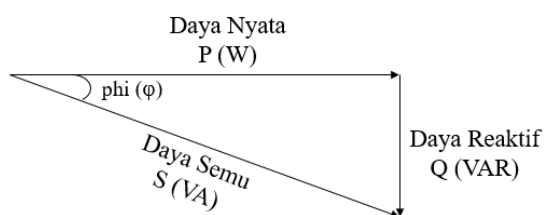
PT Beras Rajawali merupakan salah satu perusahaan yang bergerak dalam industri pengolahan pangan. Aktivitas industri yang dilakukan oleh PT Beras Rajawali banyak menggunakan motor listrik yang merupakan beban induktif. Namun, penggunaan motor listrik tersebut tidak diimbangi dengan beban kapasitif. Selain itu, PT Beras Rajawali juga belum menggunakan bank kapasitor. Kondisi tersebut menyebabkan terjadinya penurunan faktor daya (*power*

factor) yang di dalam sistem kelistrikan dikenal dengan nama  $\cos \phi$  ( $\cos \phi$ ). Faktor daya yang rendah dapat menimbulkan berbagai masalah diantaranya yaitu kerugian finansial, pemborosan energi, dan infrastruktur kelistrikan menjadi terbebani. Salah satu solusi untuk mengatasi ketidakseimbangan dalam penggunaan beban induktif dan kapasitif yaitu dengan menggunakan bank kapasitor. Keuntungan yang akan didapatkan dari penggunaan bank kapasitor diantaranya yaitu dapat menurunkan jatuh tegangan, mengurangi rugi-rugi daya, dan memperbaiki faktor daya. Berdasarkan latar belakang ini, maka pada penelitian ini dilakukan simulasi untuk mengetahui kebutuhan bank kapasitor di PT Beras Rajawali menggunakan metode *Adaptive Newton Raphson* dan *tool Optimal Capacitor Placement* (OCP) pada ETAP 19.0. Hal ini dilakukan untuk memastikan perhitungan kebutuhan bank kapasitor lebih akurat.

## II. TINJAUAN PUSTAKA

### A. Daya Listrik dan Segitiga Daya

Daya yaitu besarnya energi listrik yang diserap oleh suatu rangkaian setiap satuan waktu. Daya listrik dikelompokkan tiga bagian, daya real (P), daya semu (S), yang terakhir daya reaktif (Q) [6]. Hubungan antara ketiga daya tersebut dapat digambarkan melalui segitiga daya seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Segitiga daya

Berdasarkan Gambar 1, daya nyata (P), daya reaktif (Q) dan daya semu (S) dapat ditentukan menggunakan (1) – (3), dan perhitungan faktor daya mengacu pada (4) [7].

$$P = V \times I \times \cos \phi \quad (1)$$

$$S = V \times I \quad (2)$$

$$Q = V \times I \times \sin \phi = \sqrt{P^2 + S^2} \quad (3)$$

$$\cos \phi = \frac{P}{S} \quad (4)$$

Keterangan:

- P : daya nyata (watt)
- V : tegangan (volt)
- I : arus (A)
- $\cos \phi$  : faktor daya
- Q : daya reaktif (VAR)
- S : daya semu (VA)

### B. Faktor Daya

Faktor daya adalah rasio antara daya aktif dan daya semu [8]. Faktor daya, juga dikenal sebagai faktor kerja, mencerminkan sudut fase antara daya aktif dan daya semu dalam sistem listrik. Daya aktif digunakan untuk menggerakkan peralatan konsumen dalam jaringan listrik [9], sementara daya semu dihasilkan oleh generator pembangkit dan disalurkan ke pelanggan [10].

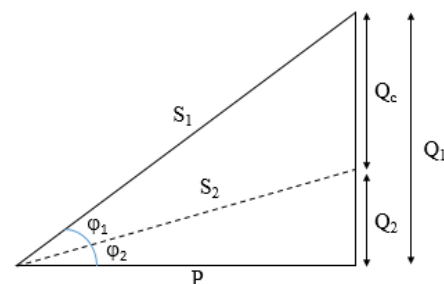
Penambahan daya reaktif akan mengakibatkan penurunan faktor daya listrik [11]. Salah satu cara sederhana untuk mencegah penurunan faktor daya listrik adalah dengan memilih peralatan konsumen yang memiliki faktor daya tinggi atau dengan memasang kapasitor. Kapasitor adalah komponen listrik yang menghasilkan daya reaktif ketika terhubung dalam jaringan listrik. Pemasangan kapasitor dapat meningkatkan faktor daya, dan ketika faktor daya ditingkatkan, daya reaktif dapat berkurang dan mendekati nilai daya aktif [10].

Sebuah peralatan dengan faktor daya 1.0 merupakan peralatan yang hanya memiliki resistansi murni dan merupakan pemakaian yang paling efisien dalam jaringan listrik. Sebaliknya, peralatan dengan faktor daya rendah (0,5) mengandung induktansi yang menyebabkan kerugian lebih tinggi dalam sistem pasokan tenaga listrik [7]. Faktor daya rendah terkait dengan perbedaan fase antara arus dan tegangan pada terminal peralatan. Biasanya, sudut fase rendah disebabkan oleh penggunaan peralatan induktif seperti transformator, motor induksi, lampu TL, dan peralatan elektronik lainnya.

Semakin kecil faktor daya yang digunakan maka akan semakin besar arus ke beban. Arus yang lebih tinggi dari yang diperlukan sangat tidak diinginkan karena semakin besar pula rugi-rugi daya pada saluran dan peralatan distribusi listrik yang lain.

### C. Perbaikan Faktor Daya

Sebuah kapasitor daya yang sering dinamakan bank kapasitor itu memiliki daya  $Q_c$  yang setara daya reaktif sistem yang diperbaiki oleh faktor daya [12]. Ketika sudah terpenuhi, bank kapasitor menaikkan faktor daya ke nilai maksimum yaitu  $\cos \phi = 1$ . Besarnya daya reaktif  $Q_c$  yang dibutuhkan untuk mengubah faktor daya dari  $\cos \phi_1$  menjadi  $\cos \phi_2$  bisa diilustrasikan melalui Gambar 2.



Gambar 2. Perbaikan faktor daya

Berdasarkan Gambar 2, besar daya reaktif kapasitif ( $Q_c$ ) dapat ditentukan menggunakan (5) [13].

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

Keterangan:

- P : daya nyata (watt)
- $\varphi_1$  : sudut sebelum perbaikan
- $\varphi_2$  : sudut setelah perbaikan
- $Q_c$  : besar daya reaktif yang dibutuhkan untuk memperbaiki faktor daya (VAR)

Selanjutnya, besar nilai dari kapasitor per fase yang diperlukan untuk perbaikan faktor daya dapat dihitung menggunakan (6).

$$\Delta C = \frac{Q_c}{3V^2 2\pi f} \quad (6)$$

Keterangan:

- $\Delta C$  : besar nilai kapasitor per fase
- $f$  : frekuensi (Hz)
- V : tegangan (V)
- $Q_c$  : besar daya reaktif yang dibutuhkan untuk memperbaiki faktor daya (VAR)

#### D. Perhitungan Arus dan Daya

Sistem kelistrikan tiga fase merupakan sistem kelistrikan yang terdiri dari tiga keluaran yang bersifat simetris, dengan perbedaan sudut  $120^\circ$  pada setiap fase. Persamaan daya yang digunakan yaitu (7)-(9).

$$P = S \times \cos \varphi \quad (7)$$

$$Q = S \times \sin \varphi \quad (8)$$

$$S = P + Q \quad (9)$$

Selanjutnya, dari rumusan tersebut dilakukan pengembangan perhitungan yang digunakan untuk menemukan nilai  $Q_L$  dan  $Q_C$ . Nilai-nilai ini diperlukan untuk menentukan kapasitor dan induktor yang akan digunakan dalam upaya perbaikan faktor daya. Perhitungan untuk menentukan induktor yang dibutuhkan dapat dilakukan dengan menggunakan (10)-(12).

$$S_1 = P / \cos \varphi \quad (10)$$

$$Q_L = \sqrt{S_1^2 - P^2} \quad (11)$$

$$L_{total} = Q_L / L \quad (12)$$

#### E. Bank Kapasitor

Dalam usaha untuk memperbaiki faktor daya dan mengatur tegangan dalam jaringan listrik, *engineer* menggunakan bank kapasitor yang menawarkan sistem

kompensasi daya reaktif. Pada saluran transmisi, beban yang bersifat induktif akan menyerap daya reaktif, yang pada gilirannya dapat menyebabkan penurunan tegangan di sisi penerima. Bank kapasitor berperan penting dalam kompensasi daya reaktif ini dan memastikan agar tegangan tetap pada level yang sesuai ketika beban mencapai puncaknya.

Pemasangan bank kapasitor merupakan langkah untuk menyediakan pasokan daya reaktif tambahan [14], yang pada gilirannya akan mengurangi penyerapan daya reaktif oleh sistem yang disebabkan oleh beban. Tujuan dari tindakan ini adalah untuk mengurangi penurunan tegangan dan kerugian dalam jaringan. Selain meningkatkan nilai tegangan, pengaturan tegangan dengan menggunakan bank kapasitor juga dapat meningkatkan faktor daya. Hal ini dikarenakan pemasangan bank kapasitor dapat mengurangi penyerapan daya reaktif oleh beban [15]. Dengan mengurangi penyerapan daya reaktif oleh beban dalam sistem, nilai faktor daya dapat ditingkatkan. Bank kapasitor memberikan manfaat yang signifikan dalam kinerja sistem distribusi, karena mampu mengurangi kerugian energi, meningkatkan kapasitas layanan, dan mengurangi penurunan tegangan [16].

#### F. Software ETAP (Electrical Transient and Analysis Program)

Dalam perancangan dan analisis sistem tenaga listrik, sangat penting memiliki perangkat lunak aplikasi untuk mencerminkan kondisi nyata sebelum sistem diimplementasikan. Salah satu aplikasi perangkat lunak yang digunakan untuk menyimulasikan sistem tenaga listrik adalah ETAP (*Electric Transient and Analysis Program*) *Power Station* 19.0. ETAP memiliki kemampuan untuk melakukan simulasi tenaga listrik dalam mode *offline*, serta dapat digunakan secara *online* untuk mengelola data secara *real-time* atau mengendalikan sistem secara langsung. Aplikasi ini menyediakan berbagai fitur, termasuk yang digunakan untuk menganalisis pembangkitan energi listrik, sistem transmisi, dan distribusi energi listrik [17].

Dalam analisis sistem tenaga listrik, diagram saluran tunggal (*single line diagram*) digunakan sebagai notasi yang disederhanakan untuk merepresentasikan sistem tenaga listrik tiga fase. Sebagai alternatif dari menggambarkan saluran tiga fase secara terpisah, digunakan sebuah konduktor tunggal. Pendekatan ini mempermudah pembacaan diagram dan studi rangkaian. Komponen listrik seperti pemutus rangkaian, transformator, kapasitor, *busbar*, dan konduktor lainnya dapat diwakili menggunakan simbol yang telah di standarisasi untuk diagram saluran tunggal.

#### G. Optimal Capacitor Placement Software ETAP (Electrical Transient and Analysis Program)

Simulasi OCP berfungsi memperbaiki level tegangan sistem dengan menambah kapasitor pada bus yang mengalami *drop voltage* secara otomatis. Artinya ETAP 19 akan menghitung berapa kapasitas kapasitornya dan berapa jumlah bank kapasitor minimal yang mampu memperbaiki

sistem sehingga kita tidak perlu menghitung secara manual. Pada penempatan kapasitor yang optimal dapat dilakukan dengan cara-cara sebagai berikut:

- 1) Memasukkan data pembangkit, data beban, jumlah bus dan data impedansi pada saluran ke dalam *software* ETAP.
- 2) Melakukan proses *load flow* dengan menggunakan metode *Newton Raphson* untuk mengetahui kondisi di sistem.
- 3) Menjalankan optimalisasi penempatan kapasitor pada *software* ETAP.
- 4) Kemudian lihat di mana lokasi dari kapasitor yang optimal dan kapasitas dari kapasitor hasil menjalankan optimalisasi penempatan kapasitor menggunakan ETAP.
- 5) Melakukan pemasangan bank kapasitor sesuai dengan hasil optimalisasi lalu jalankan program *load flow* kembali.

#### H. Metode Newton Raphson

Metode *Newton Raphson* dalam penyelesaian aliran daya menggunakan prinsip dari Deret Taylor untuk fungsi dengan dua variabel atau lebih. Metode ini digunakan untuk menyelesaikan permasalahan aliran daya dengan memanfaatkan persamaan non linier untuk mengestimasi tegangan dan sudut fase pada setiap bus. Daya injeksi pada bus  $i$  adalah seperti pada (13).

$$P_i - jQ_i = V_i * \sum Y_{ij} V_j n_j \quad (13)$$

Keterangan:

- $P_i$  : daya aktif ke- $i$
- $Q_i$  : daya reaktif ke- $i$
- $V_i$  : tegangan ke- $i$
- $Y_{ij}$  : admitans

Dalam hal ini dilakukan pemisahan daya nyata dan daya reaktif pada bus  $i$ . Pemisahan ini akan menghasilkan suatu set persamaan simultan non linier. Dalam koordinat kutub diketahui sesuai pada (14)-(16).

$$|V_i| \angle \delta_i = |V_i| e^{j\delta_i} \quad (14)$$

$$|V_j| \angle \delta_j = |V_j| e^{j\delta_j} \quad (15)$$

$$|V_{ij}| \angle \delta_{ij} = |V_{ij}| e^{j\delta_{ij}} \quad (16)$$

Karena  $e^{j(\delta_j - \delta_i + \theta_{ij})} = \cos(\delta_j - \delta_i + \theta_{ij})$  maka pemisahan daya pada bus  $i$  menjadi komponen real dan imajiner yaitu digunakan (17)-(18).

$$P_i - jQ_i = |V_i| \angle -\delta_i \sum Y_{ij} V_j \angle \theta_{ij} + \delta_j = n j = 1 \quad (17)$$

$$|V_i| e^{-j\delta_i} \sum Y_{ij} V_j \angle (e^{j(\delta_j - \delta_i + \theta_{ij})}) n j = 1$$

$$P_i = \sum |V_i V_j Y_{ij}| \cos(\delta_j - \delta_i + \theta_{ij}) n j = 1 \quad (18)$$

$$Q_i = \sum |V_i V_j Y_{ij}| \sin(\delta_j - \delta_i + \theta_{ij}) n j = 1 \quad (19)$$

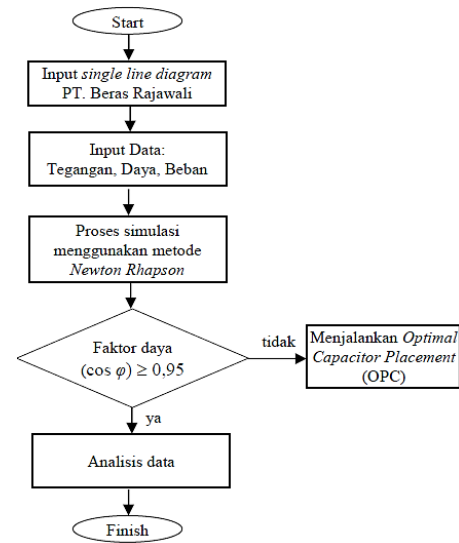
Nilai daya aktif ( $P_i$ ) dan daya reaktif ( $Q_i$ ) telah diketahui, tetapi nilai tegangan ( $V_i$ ) dan sudut ( $\delta_i$ ) tidak diketahui kecuali

pada *slack bus* [18]. Kedua persamaan non linier tersebut dapat diuraikan menjadi suatu set persamaan simultan linier dengan cara menyatakan hubungan antara perubahan daya nyata  $\Delta P_i$  daya reaktif  $\Delta Q_i$  terhadap perubahan *magnitude* tegangan  $\Delta V_i$  dan sudut fase tegangan  $\Delta \delta_i$ .

### III. METODOLOGI

#### A. Diagram Alir Penelitian

Diagram alir kegiatan simulasi pada penelitian ini dapat dilihat pada Gambar 3. Kegiatan simulasi dimulai dengan menggambar *single line diagram* pada ETAP 19 sebagai rekonstruksi sistem kelistrikan PT Beras Rajawali kemudian input data pembangkit generator (P gen, Q gen, Q max, Q min) dan *high voltage* Perusahaan Listrik Negara (PLN) (P PLN, Q PLN, Q max, Q min), data beban {V mag, sudut fase tegangan  $\delta$ , daya aktif (P), daya reaktif (Q)}, jumlah bus, dan data impedansi pada saluran ke dalam *software* ETAP 19. Selanjutnya dilakukan simulasi proses aliran beban menggunakan metode *Newton Raphson* untuk mengetahui sistem di PT Beras Rajawali. Jika faktor daya ( $\cos \phi$ ) terbaca kurang dari 0,95 maka dilakukan perbaikan faktor daya dengan fitur OCP pada ETAP 19 dan jika faktor daya terbaca lebih dari sama dengan 0,95 maka dilakukan analisis dan simulasi selesai.



Gambar 3. Flowchart simulasi perbaikan faktor daya

#### B. Sumber Data

Data awal pada penelitian ini diperoleh dari dua sumber utama, yaitu informasi yang tercatat dalam dokumen dan yang tercantum dalam spesifikasi komponen kelistrikan. Selanjutnya, guna memvalidasi dan memperkuat data tersebut, dilakukan wawancara dengan petugas atau teknisi kelistrikan yang berhubungan dengan unit alat penggilingan dan pengeringan beras. Berikut data awal yang digunakan untuk penelitian ini:

1) *Data Sumber Tenaga Listrik:* Sumber PLN merupakan pemasok utama tenaga listrik yang ada di PT Beras Rajawali. Tenaga listrik PLN mencakup seluruh beban listrik yang ada di pabrik. Tabel 1 merupakan data sumber tenaga listrik high voltage PLN pada PT Beras Rajawali:

Tabel 1. Data sumber tenaga listrik PLN pada PT Beras Rajawali

No.	Parameter	Keterangan
1	Daya (kVA)	197 kVA
2	Arus (A)	300 A
3	Tegangan (V)	380 V
4	Daya (kW)	157,6 kW

Selain menggunakan sumber tenaga listrik dari PLN, PT Beras Rajawali juga menggunakan sumber tenaga listrik dari genset. Genset ini merupakan cadangan sumber tenaga listrik apabila PLN mengalami pemadaman. Terdapat dua buah genset yang digunakan oleh PT Beras Rajawali yaitu Genset 1 untuk memenuhi beban listrik pada mesin penggiling padi sedangkan Genset 2 untuk memenuhi beban listrik pada empat unit mesin pengemas beras dan beban-beban lain seperti lampu, komputer dan kulkas. Data kedua genset tersebut dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 2. Data genset pada PT Beras Rajawali

No.	Parameter	Genset 1	Genset 2
1	Merek	Kadegen	Matsumoto
2	Tipe	KD-50 W	MDG-40 SSE/SSDV
3	Tegangan	220/380	220/380
4	Daya (kW/kVA)	44 kW/55 kVA	32 kW/40 kVA
5	Arus	73,4 A	60,7 A

2) *Data Transformator:* Transformator (Trafo) merupakan komponen yang memiliki peran cukup penting dalam proses pendistribusian yang terjadi pada tenaga listrik. Peran utama dari trafo adalah mengubah besaran listrik yang bersumber dari PLN. Tabel 3 menunjukkan data trafo yang digunakan pada penelitian ini.

Tabel 3. Data transformator

No.	Parameter	Trafo 1	Trafo 2	Trafo 3
1	Merek	Trafoindo	Trafoindo	Centrado
2	Daya	315 kVA	315 kVA	
3	Tegangan	20 kV-400 V	20 kV-400 V	400-220 V

3) *Data Beban:* Beban yang digunakan pada penelitian ini yaitu mesin penggiling dan mesin pengemas yang digunakan pada PT Beras Rajawali dengan spesifikasi seperti yang ditunjukkan pada Tabel 4.

Tabel 4. Spesifikasi beban

No.	Parameter	Mesin Penggiling	Mesin Pengemas
1	Merek	Wanma	OCPACK
2	Tipe	MNM-5 Rice Mill	OC-420AZ
3	Daya	25 W	5,5 kW / unit

### C. *Pemodelan Single Line Diagram*

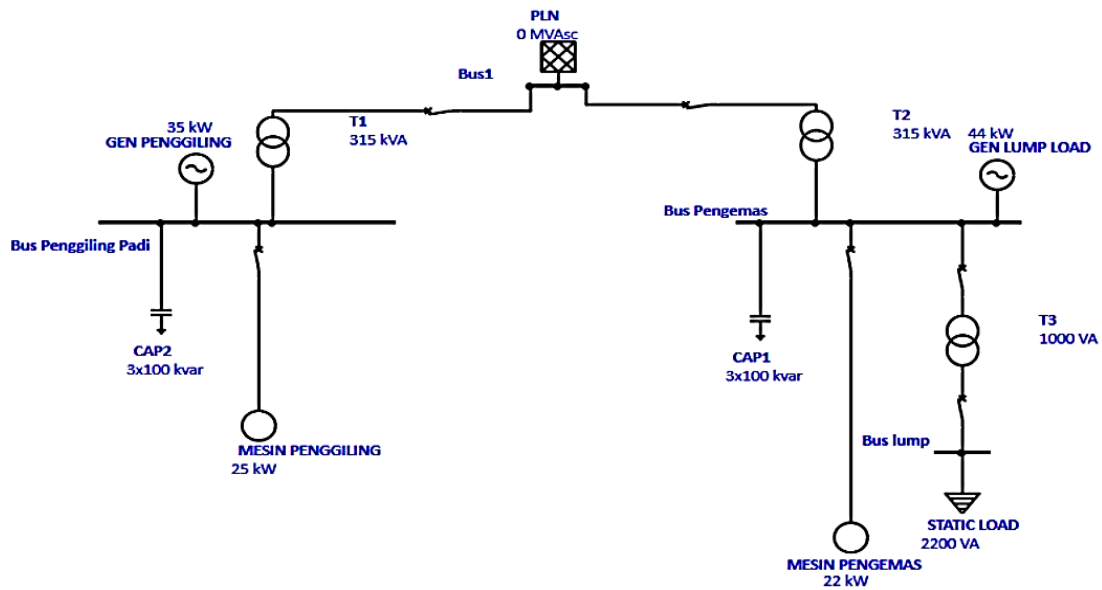
Gambar 2 menunjukkan pemodelan *single line diagram* yang digunakan pada penelitian ini. Dari gambar pemodelan tersebut sumber tenaga listrik yang digunakan adalah sumber tegangan PLN dan dua unit genset. Untuk sumber PLN dengan besar tegangan 197 kV dijadikan sebagai sumber utama yang mencakup segala proses produksi dan proses administrasi dalam pabrik. Sedangkan untuk dua unit genset berfungsi sebagai tenaga cadangan apabila terjadi pemadaman yang dilakukan oleh PLN. Penggunaan dua unit genset terbagi menjadi dua beban yang berbeda. Untuk Gen 1 dengan daya 32 kW untuk memenuhi kebutuhan satu unit mesin penggiling padi dengan daya beban sebesar 25 KW pada bus 2 dan Gen 2 pada bus dengan daya 44 kW untuk memenuhi kebutuhan dua beban sekaligus yakni empat unit mesin pengemasan dengan daya total sebesar 8 kW dan *static load* seperti lampu, komputer dan alat elektronik yang memiliki daya total sebesar 0,4 kW. Kemudian dari pemodelan tersebut bisa dilihat terdapat tiga unit transformator *step down*. Transformator 1 penghubung antara bus 1 dan bus 2, transformator 1 menurunkan dari tegangan 197 kV ke tegangan 30 kV. Begitu pun dengan transformator 2 yang menjadi penghubung bus 1 dan bus 3, transformator 2 menurunkan dari tegangan 197 kV ke tegangan 30 kV. Transformator 1 dan Transformator 2 digunakan untuk menghidupkan mesin penggiling dan pengemas. Kemudian transformator 3 merupakan trafo yang menurunkan tegangan dari bus 3 sebesar 30 kV menjadi 0,4 kV yang berada di bus 4 yang akan digunakan sebagai sumber tegangan beban statis.

## IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

### A. *Perbaikan Faktor Daya Sistem Tenaga Listrik*

Dalam studi kasus yang dilakukan di PT Beras Rajawali faktor daya yang didapatkan ketika seluruh beban (mesin penggiling dan mesin pengemas) dinonaktifkan, maka di dapat faktor daya sebesar 0,85. Besar faktor daya ini masih perlu diperbaiki karena dalam penelitian ini hasil faktor daya yang harus dicapai adalah lebih dari sama dengan 0,95. Tabel 5 merupakan data utama terkait sumber daya kelistrikan di PT Beras Rajawali.

Pada penelitian ini dilakukan pengukuran besar faktor daya yang terjadi apabila beberapa step bank kapasitor dimatikan secara bertahap. *Power bank controller* yang digunakan di PT Beras Rajawali menggunakan enam step bank kapasitor dengan total daya reaktif 600 kVAR berkapasitas 100 kVAR.



Gambar 2. Pemodelan *single line diagram* sistem kelistrikan pabrik beras PT Beras Rajawali menggunakan ETAP 19

Ketika dilihat secara langsung bahwa terdapat tiga step dengan masing-masing berukuran 100 kVAR diaktifkan. Hal ini dapat dijadikan perbandingan dengan hasil simulasi ETAP nantinya. Pengukuran data faktor daya dilakukan dengan mengaktifkan dua beban mesin. Untuk beban statis tidak terdapat bank kapasitor karena kecilnya daya reaktif yang di timbulkan. Data yang dihasilkan dari pengukuran ini seperti pada Tabel 6. Sesuai dengan Tabel 6 dapat diketahui bahwa dalam kondisi satu step bank kapasitor diaktifkan, maka kondisi faktor daya hanya mencapai 0,67 dengan arus yang cukup besar 106,57 A. Kemudian kondisi dua step bank kapasitor diaktifkan, maka kondisi faktor daya bertambah baik tapi belum mencapai sempurna hanya mencapai 0,75 dengan arus yang cukup baik tetapi masih tinggi yaitu 95,20 A. Ketika tiga step kapasitor diaktifkan, maka faktor daya berada di titik yang di inginkan yaitu 0,85 dan arus sudah stabil yaitu 60,7 A. Semakin besar arus dan semakin kecil faktor daya maka semakin besar nilai kerugian yang dialami oleh PT Beras Rajawali.

Tabel 5. Data sumber kelistrikan di PT Beras Rajawali

No.	Parameter	Keterangan
1	Daya Nyata Utama (kVA)	197 kVA
2	Cos phi	0,85
3	Daya Aktif Utama (kW)	167,45
4	Daya Aktif Keluar dari Trafo 1 (kW)	28,28
5	Daya Aktif Keluar dari Trafo 2 (kW)	30,85

Begitu pun juga dengan keadaan faktor daya yang pada mesin pengemas beras. Sesuai dengan Tabel 7 dapat diketahui bahwa dalam kondisi satu step bank kapasitor diaktifkan, maka kondisi faktor daya hanya mencapai 0,74 dengan arus yang cukup besar 108,11 A. Kemudian kondisi dua step bank kapasitor diaktifkan, maka kondisi faktor daya bertambah baik tapi belum mencapai sempurna hanya mencapai 0,792

dengan arus yang cukup baik tetapi masih tinggi yaitu 101,00 A dan ketika tiga step kapasitor diaktifkan maka faktor daya berada di titik yang di inginkan yaitu 0,85 dan arus sudah stabil yaitu 73,34. Selanjutnya dilakukan perhitungan faktor daya dalam kondisi terbaik.

Tabel 6. Data faktor daya yang berubah akibat pengurangan step bank kapasitor pada beban mesin penggiling padi (bus 2)

No.	Faktor Daya	Arus	Tegangan	Keterangan
1	0,67	106,57	0,4 kV	1 Step Terpasang
2	0,75	95,20	0,4 kV	2 Step Terpasang
3	0,85	70,7	0,4 kV	3 Step Terpasang

Dalam hal ini, peneliti akan menghitung faktor daya dengan faktor daya 0,95 atau lebih tinggi dari apa yang diterapkan pada PT Beras Rajawali. Kemudian untuk batasan titik terendah dari faktor daya yang akan diperbaiki sebesar 0,65. Tabel 8 merupakan hasil perhitungan kondisi besar arus dan kebutuhan step kapasitor pada bus 2 untuk beberapa nilai faktor daya.

Tabel 7. Data faktor daya yang berubah akibat pengurangan step bank kapasitor pada beban mesin pengemas beras (bus 3)

No.	Faktor Daya	Arus	Tegangan	Keterangan
1	0,74	108,11	0,4 kV	1 Step Terpasang
2	0,792	101,00	0,4 kV	2 Step Terpasang
3	0,85	73,34	0,4 kV	3 Step Terpasang

Tabel 8 menunjukkan kondisi faktor daya jika berada di angka 0,65 maka akan menghasilkan arus sebesar 108,77 A. Jika faktor daya menunjukkan angka 0,95 maka akan menghasilkan arus sebesar 74,42 A. Hal ini terjadi karena

semakin besar faktor daya dapat menghasilkan arus yang kecil. Ketika faktor daya berada di angka 0,65 dibutuhkan daya reaktif kapasitif 23,76 kVAR. Apabila faktor daya berada di angka 0,95, dibutuhkan daya reaktif kapasitif sebesar 0. Hal ini terjadi karena semakin besar faktor daya maka kebutuhan daya reaktif kapasitif akan semakin kecil. Ketika faktor daya berada diangka 0,65 maka membutuhkan 1 bank kapasitor yang akan di aktifkan untuk mendapatkan faktor daya yang maksimal. Apabila faktor daya berada di angka 0,95 maka membutuhkan 0 bank kapasitor yang akan di aktifkan. Saat arus berada diangka 108,77 A maka daya reaktif kapasitif adalah 23,76 kVAR. Apabila arusnya 74,42 A maka daya reaktifnya adalah 0 kVAR. Hal ini dapat disimpulkan bahwa semakin kecil arus maka semakin kecil juga daya reaktif kapasitif yang di gunakan. Ketika daya reaktif kondisi drop diangka 33,96 kVAR maka besar kebutuhan daya reaktif kapasitif berada diangka 23,76 kVAR.

Apabila daya reaktif kondisi drop berada pada angka 9,3 kVAR maka kebutuhan daya reaktif kapasitif 0 kVAR. Hal ini terjadi karena semakin kecil daya reaktif kondisi drop maka semakin kecil juga daya reaktif kapasitif yang diperlukan. Tabel 9 menunjukkan kondisi faktor daya jika berada di angka 0,65 maka akan menghasilkan arus sebesar 118,65 A. Jika faktor daya menunjukkan angka 0,95 maka akan menghasilkan arus sebesar 81,18 A. Hal ini terjadi karna semakin besar faktor daya dapat menghasilkan arus yang kecil. Jika faktor daya berada di angka 0,65 maka akan membutuhkan daya reaktif kapasitif 25,93 kVAR. Apabila faktor daya berada di angka 0,95 maka akan membutuhkan daya reaktif kapasitif sebesar 0. Hal ini terjadi karena semakin besar faktor daya kebutuhan daya reaktif kapasitif akan semakin kecil. Ketika faktor daya berada diangka 0,65 maka membutuhkan 1 bank kapasitor yang akan di aktifkan untuk mendapatkan faktor daya yang maksimal.

Tabel 8. Hasil perhitungan kondisi besar arus dan kebutuhan step kapasitor pada bus 2

Faktor Daya (PF)		Arus (A)	Daya Aktif (kW)	Besar Daya Reaktif Kondisi Drop (kVAR)	Besar Kebutuhan Daya Reaktif Kapasitif (kVAR)	Step Kapasitor yang Dibutuhkan
Sebelum Perbaikan	Setelah Perbaikan					
0,65	0,95	108,77	28,28	33,06	23,76	1 Steps Diaktifkan (1 steps x 100 kVAR)
0,70	0,95	101	28,28	28,85	19,55	1 Steps Diaktifkan (1 steps x 100 kVAR)
0,75	0,95	94,27	28,28	24,94	15,64	1 Steps Diaktifkan (1 steps x 100 kVAR)
0,80	0,95	88,38	28,28	21,21	11,91	1 Steps Diaktifkan (1 steps x 100 kVAR)
0,85	0,95	83,177	28,28	17,53	8,23	1 Steps Diaktifkan (1 steps x 100 kVAR)
0,9	0,95	78	28,28	13,70	4,40	1 Steps Diaktifkan (1 steps x 100 kVAR)
0,95	0,95	74,42	28,28	9,3	0	0 Steps Diaktifkan (0 steps x 100 kVAR)

Tabel 9. Hasil perhitungan kondisi besar arus dan kebutuhan step kapasitor pada bus 3

Faktor Daya (PF)		Arus (A)	Daya Aktif (kW)	Besar Daya Reaktif Kondisi Drop (kVAR)	Besar Kebutuhan Daya Reaktif Kapasitif (kVAR)	Step Kapasitor yang Dibutuhkan
Sebelum Perbaikan	Setelah Perbaikan					
0,65	0,95	118,65	30,85	36,07	25,93	1 Steps Diaktifkan (1 steps x 100 kVAR)
0,70	0,95	110,18	30,85	31,47	21,33	1 Steps Diaktifkan (1 steps x 100 kVAR)
0,75	0,95	102,83	30,85	27,21	17,07	1 Steps Diaktifkan (1 steps x 100 kVAR)
0,80	0,95	96,41	30,85	23,14	13,00	1 Steps Diaktifkan (1 steps x 100 kVAR)
0,85	0,95	90,74	30,85	19,12	8,98	1 Steps Diaktifkan (1 steps x 100 kVAR)
0,9	0,95	85,7	30,85	14,94	4,80	1 Steps Diaktifkan (1 steps x 100 kVAR)
0,95	0,95	81,18	30,85	10,14	0	0 Steps Diaktifkan (0 steps x 100 kVAR)

Apabila faktor daya berada di angka 0,95 maka membutuhkan 0 bank kapasitor yang akan di aktifkan. Saat arus berada diangka 118,65 A maka daya reaktif kapasitif adalah 25,93 kVAR. Apabila arusnya 81,18 A maka daya reaktifnya adalah 0 kVAR. Hal ini dapat disimpulkan bahwa semakin kecil arus maka semakin kecil juga daya reaktif kapasitif yang digunakan. Jika daya reaktif kondisi drop diangka 36,07 kVAR maka besar kebutuhan daya reaktif kapasitif berada diangka 25,93 kVAR. Apabila daya reaktif kondisi drop berada pada angka 10,14 kVAR maka kebutuhan daya reaktif kapasitif 0 kVAR. Hal ini terjadi karena semakin kecil daya reaktif kondisi drop maka semakin kecil juga daya reaktif kapasitif yang diperlukan.

#### B. Simulasi Load Flow saat Bank Kapasitor tidak Aktif Menggunakan ETAP 19

Simulasi menggunakan *software* ini berfungsi sebagai acuan untuk melihat kondisi sistem saat beban penuh. Kemudian melihat besaran arus yang ada pada masing-masing bus, melihat besaran daya aktif, besaran daya reaktif, dan melihat kondisi faktor daya. Kemudian hasil simulasi nanti akan dilakukan perbandingan dengan hasil perhitungan yang sudah dilakukan dengan persamaan sebelumnya. Gambar 3 merupakan keadaan sistem yang sedang disimulasikan dan tampak *load flow* pada saat beban puncak menunjukkan nilai-nilai pada setiap *busbar*.

Pada Gambar 3, *load flow* menunjukkan besarnya daya nyata dan besarnya tegangan yang ada pada setiap *busbar*. Dapat dilihat bahwa pada Bus Penggiling padi dan Bus pengemas berwarna merah. *Busbar* yang berwarna merah ini menunjukkan bahwa terjadi *undervoltage* dan bisa

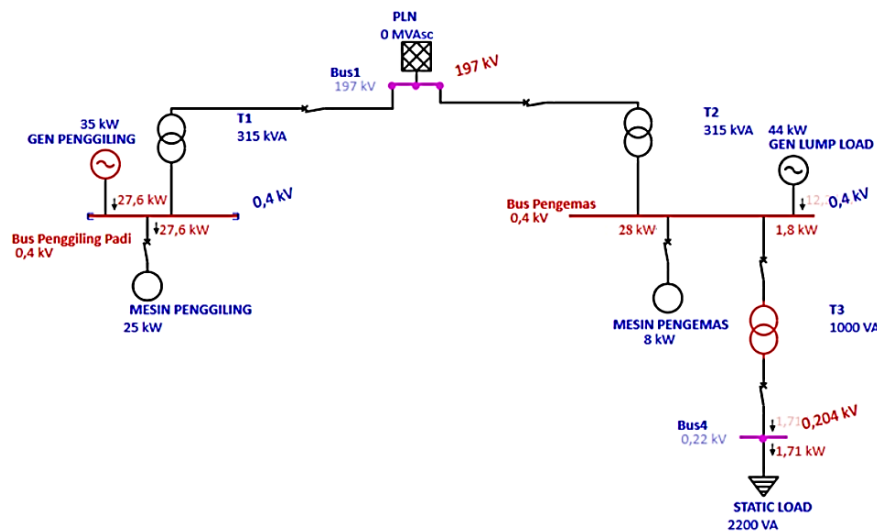
dikarenakan tingginya daya reaktif yang muncul akibat beban motor induksi. Untuk *busbar* yang berwarna ungu menunjukkan bahwa walaupun *undervoltage* tetapi masih dalam batas aman. Tabel 10 adalah tabel daya nyata yang ada pada setiap bus yang akan dibandingkan dengan hasil perhitungan menggunakan galat persentase.

Tabel 10. Daya aktif pada hasil simulasi ETAP 19

No.	Parameter	Keterangan
1	Daya Aktif Bus Penggilingan Padi (kW)	27,6
2	Daya Aktif Bus Pengemas (kW)	29,8
3	Daya Aktif Bus 4 (kW)	1,71
4	Tegangan Bus 1 (kV)	197
5	Tegangan Bus Penggiling Padi (kV)	0,4
6	Tegangan Bus Pengemas (kV)	0,4
7	Tenaga Bus 4 (kV)	0,204

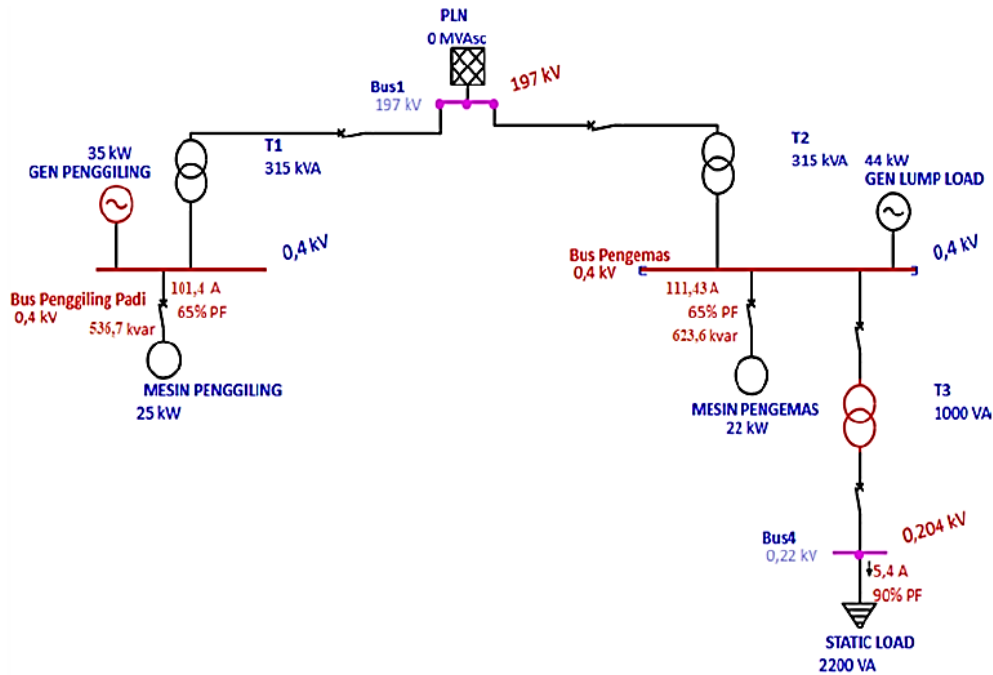
Setelah didapatkan hasil dari daya aktif pada setiap bus khususnya pada bus yang memiliki beban motor induksi, maka dilanjutkan menganalisis persentase error dari hasil perhitungan teori dengan hasil simulasi. Berdasarkan hasil perhitungan, seperti pada Tabel 11, diketahui bahwa ada selisih sebesar 0,68 kW pada bus penggiling padi dengan persentase error sebesar 2,4% dan selisih sebesar 1,05 pada bus pengemas dengan persentase error sebesar 3,4%. Dapat diambil keputusan dari hasil persentase error tersebut yang menunjukkan bahwa perhitungan dan simulasi memiliki nilai yang sangat dekat.

Setelah melihat yang terjadi dengan daya nyata, maka selanjutnya memperhatikan sistem kelistrikan yang terjadi dengan daya reaktif dan arus yang ditimbulkan akibat bank kapasitor tidak diaktifkan dan akibat beban motor induktif. Gambar 4 menunjukkan kondisi daya reaktif dan arus yang berada di bus penggiling dan bus pengemasan yang mengalami drop faktor daya ditandakan dengan bus berwarna merah.



Gambar 3. Simulasi ETAP 19 kondisi daya aktif saat beban penuh dan kondisi bank kapasitor dinonaktifkan





Gambar 4. Simulasi ETAP 19 kondisi arus dan daya reaktif saat beban penuh dan kondisi bank kapasitor dinonaktifkan

Tabel 11. Perbandingan hasil perhitungan daya aktif pada saluran bus 2 dan bus 3 dengan simulasi ETAP 19.0

Nama Saluran	Daya Aktif Perhitungan (kW)	Daya Hasil Simulasi ETAP(kW)	Selisih (kW)	Persentase
Bus Penggiling	28,28	27,6	0,68	2,4%
Bus Pengemas	30,85	29,8	1,05	3,4%

Pada Gambar 4, *load flow* menunjukkan besarnya arus dan besarnya daya reaktif yang ada pada setiap busbar yang diakibatkan bank kapasitor tidak terpasang. Kondisi ini sangat berbanding lurus dengan teori bahwa, semakin tinggi daya

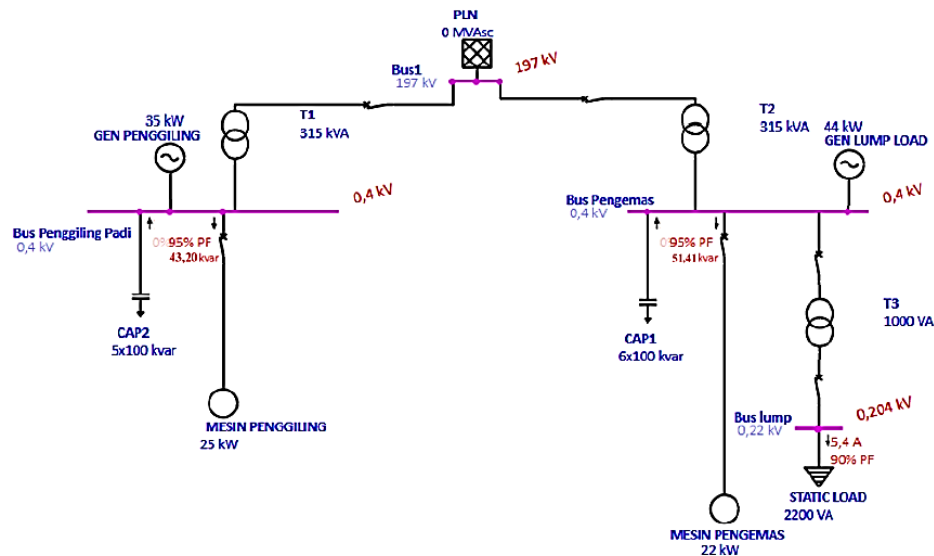
reaktif yang muncul akibat beban induktif mengakibatkan besarnya arus dan pastinya akan membuat besar pula rugi-rugi daya yang terjadi. Tabel 12 adalah tabel arus dan daya reaktif yang ada pada setiap bus.

Tabel 12. Arus dan daya reaktif hasil simulasi ETAP 19

No.	Parameter	Keterangan
1	Arus pada Bus Penggiling Padi (A)	101,4
2	Arus pada Bus Pengemas (A)	111,43
3	Arus pada Bus 4 (A)	5,4
4	Daya reaktif Bus Pengemas (kVAR)	536,7
5	Daya reaktif Penggiling Padi (kVAR)	623,6



Gambar 5. Hasil *running optimal capacitor placement*



Gambar 6. Hasil *running* OCP setelah dilakukan pemasangan bank kapasitor

Dari hasil simulasi ETAP 19 menggunakan modul atau *tools* OCP, didapat data yang bisa digunakan untuk melakukan perhitungan persentase error antara bus penggiling dan bus pengemas hasil ETAP dan hasil perhitungan teori. Data hasil *running* OCP pada bus penggiling padi menunjukkan besar kebutuhan step bank kapasitor yaitu lima unit dengan *rated* kVAR atau besar setiap stepnya sebesar 100 kVAR. Begitu pun juga dengan hasil *running* OCP pada bus penggiling padi menunjukkan besar kebutuhan step bank kapasitor yaitu enam unit dengan *rated* kVAR atau besar setiap stepnya sebesar 100 kVAR. Dengan ini antara perhitungan dan simulasi ETAP 19 tidak terdapat selisih atau 0% error pada *rated* kVAR (besar setiap step kapasitor) dan tidak terdapat selisih kebutuhan bank kapasitornya. Selanjutnya dilakukan simulasi yang memasukkan jumlah kapasitor dan *rate* kVAR kapasitor hasil dari OCP untuk melihat hasil akhir dari perbaikan faktor daya.

Gambar 6 menunjukkan hasil *running* OCP setelah dilakukan pemasangan bank kapasitor. Hasil simulasi setelah pemasangan bank kapasitor ini akan dibandingkan dengan hasil perhitungan setelah perbaikan faktor daya dan juga akan dibandingkan dengan hasil simulasi ETAP 19 sebelum pemasangan bank kapasitor. Dari Gambar 6 dapat diketahui perbandingan antara perhitungan arus dan daya reaktif setelah perbaikan faktor daya dengan hasil simulasi. Berdasarkan Tabel 13 hasil perhitungan arus setelah perbaikan faktor daya pada bus penggiling sebesar 74,42 A dan arus pada bus pengemas sebesar 81,18 A. Sedangkan dari hasil simulasi setelah perbaikan faktor daya didapatkan besarnya arus pada bus penggiling sebesar 67,9 A dan besar arus pada bus pengemas sebesar 78,5 A. Sehingga didapatkan persentase error hasil perhitungan dan hasil simulasi arus pada bus penggiling sebesar 8,7% dan persentase error hasil perhitungan dan hasil simulasi arus pada bus pengemas sebesar 3,3%.

Tabel 13. Perbandingan arus hasil dari perhitungan manual dan hasil simulasi di ETAP 19

No.	Jenis Saluran	Hasil Manual	Hasil ETAP	Error Persen
1	Bus penggiling	74,42 A	67,9 A	8,7%
2	Bus pengemas	81,18 A	78,5 A	3,3 %

## V. SIMPULAN

Penelitian yang dilakukan langsung di PT Beras Rajawali mengungkapkan adanya signifikansi nilai faktor daya terhadap sistem kelistrikan. Pada saat faktor daya mencapai 0,67, arus yang terukur mencapai 106,57 A, sementara pada faktor daya 0,85, arus menurun menjadi 70,7 A. Untuk mengatasi faktor daya yang menurun, dilakukan pemasangan bank kapasitor pada bus yang terkena dampak. Langkah ini berhasil mengembalikan faktor daya menjadi normal, menunjukkan efektivitas tindakan tersebut. Selanjutnya, saat melakukan OCP pada kondisi beban puncak, ditemukan penempatan optimal untuk kapasitor pada bus penggiling sejumlah lima step dengan daya reaktif kapasitif 500 kVAR. Begitu pula pada bus pengemas, dihasilkan penempatan optimal sejumlah enam step dengan daya reaktif kapasitif yang sama. Hasil pemasangan bank kapasitor pada kedua bus juga memberikan dampak positif. Sebelum pemasangan, besar arus di kedua bus mencapai 101,4 A dan 111,4 A. Setelah dipasang, angka tersebut menurun signifikan menjadi 67,9 A dan 78,5 A, menandakan bahwa bank kapasitor berhasil mengembalikan besar arus ke tingkat yang normal.

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] Lisiani, A. Razikin, dan Syaifurrahman, "Identifikasi dan Analisis Jenis Beban Listrik Rumah Tangga Terhadap Faktor Daya (Cos Phi)," *J. Untan*, vol. 1, no. 3, hal. 1–9, 2020.
- [2] D. Wibowo, Yusniati, R. Nasution, dan Z. Pelawi, "Analisis Perbaikan

- Faktor Daya Menggunakan Kapasitor Bank Di Masjid Agung Serdang Bedagai," *Cetak) J. Electr. Technol.*, vol. 8, no. 1, hal. 1–6, 2023.
- [3] F. A. Noor, "Pengaruh Penambahan Kapasitor Terhadap Tegangan, Arus, Faktor Daya, Dan Daya Aktif Pada Beban Listrik Di Minimarket," Universitas Negeri Semarang, 2017.
- [4] W. A. Billahi, "Analisis Perubahan Nilai Faktor Daya Terhadap Pemasangan Kapasitor Bank Pada Unit Boiler Pusat Pengembangan Sumber Daya Manusia Minyak Dan Gas Bumi Cepu," *J. Tek. Elektro*, vol. 10, no. 2, hal. 497–505, 2021.
- [5] K. D. Nurmahandy, "Analisis Perbaikan Faktor Daya Menggunakan Kapasitor Bank Pada Penyulang Barata PT PLN Ngagel Surabaya," *J. Tek. Elektro*, vol. 10, no. 1, hal. 261–270, 2021.
- [6] N. Setiaji, Sumpena, dan A. Sugiharto, "Analisis Konsumsi Daya Dan Distribusi Tenaga Listrik," *J. Teknologi Ind.*, vol. 11, no. 1, hal. 1–8, 2022.
- [7] J. Murianto, D. Febrianto, dan F. Azmi, "Rancang Bangun Alat Uji Pada Perbaikan Faktor Daya Dengan Kapasitor Bank," *JESCE (Journal Electr. Syst. Control Eng.*, vol. 4, no. 1, hal. 53–62, 2020.
- [9] Y. Marniati, "Analisis Penambahan Jurusan Gardu Distribusi I.598 Pada Penyulang Apel PT.PLN Rayon Rivai Palembang," *J. TEKNO*, vol. 19, no. 2, hal. 32–48, 2022.
- [10] G. Romadhona *et al.*, "Pengukuran dan Analisis Kualitas Daya Listrik di IGD dan IKBS Rumah Sakit Islam Purwokerto," *Cyclotr. J. Tek. Elektro*, vol. 6, no. 1, hal. 20–25, 2023.
- [11] B. Ferdiansah, A. Margiantono, dan F. Ahmad, "Analisis Pengaruh Kapasitor Bank Terhadap Nilai Faktor Daya Dan Nilai Jatuh Tegangan," *Jambura J. Electr. Electron. Eng.*, vol. 5, no. 2, hal. 234–241, 2023.
- [12] Y. P. Sudarmojo dan A. I. Weking, "Optimasi Pemasangan Kapasitor Dengan Metode Quantum Genetic Algorithm Untuk Meningkatkan Kualias Daya Pada Jaringan Distribusi Bali," Bali, 2019.
- [13] A. Nuwolo dan A. Kusmantoro, "Rancang Bangun Kapasitor Bank pada Jaringan Listrik Gedung Universitas PGRI Semarang," in *Prosiding SNST ke-6 Tahun 2015*, 2015, hal. 8–14.
- [14] A. N. Shafira, A. Soeprijanto, dan S. Anam, "Penentuan Letak dan Kapasitas Bank Kapasitor Secara Optimal Menggunakan Bee Colony Algorithm," *J. Tek. ITS*, vol. 5, no. 2, hal. A750–A751, 2016.
- [15] R. Pasangkunan, S. A. Karim, dan H. Hasrul, "Pengaruh Pemasangan Kapasitor Bank Terhadap Faktor Daya Pada Reefer Plug Di PT. Pelindo IV Cabang Makassar New Port," *J. Media Elektr.*, vol. 19, no. 1, hal. 26–30, 2021.
- [16] C. Elchrisa, L. K. Amali, dan A. I. Tolago, "Analisis Optimasi Penempatan Kapasitor Bank pada Jaringan Tegangan Menengah 20kV Feeder IS.03 Rayon Limboto untuk Memperbaiki Kualitas Tegangan," *Jambura J. Electr. Electron. Eng.*, vol. 1, no. 1, hal. 25–31, 2019.
- [17] M. A. I. Lubis, "Analisa Perhitungan dan Perencanaan Uprating Kabel Untuk Perbaikan Tegangan Jatuh Pada Sisi Jaringan Tegangan Rendah Di Gardu PR198 PT PLN (Persero) ULP Perbaungan," Medan: Universitas Pembangunan Panca Budi, 2021.
- [18] M. T. Hagh, T. Ahamadzadeh, K. M. Muttaqi, dan D. Sutanto, "Load flow analysis of radial and weakly meshed distribution systems including distributed generations," 2014.