

Perbaikan Faktor Daya Beban Induktif di Industri dengan Menggunakan Kapasitor Shunt

¹Basuki Rudianta, ²Muhammad Hafizhuddin, ³Abdul Syakur

¹PT. PLN (Persero) UPDL Pandaan, Surabaya, Indonesia

^{2,3}Departemen Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro, Semarang, Indonesia

E-mail: ¹basukirudianta@gmail.com, ³syakur@elektro.undip.ac.id

Abstrak

Pada era industri 4.0 kebutuhan akan listrik berkembang dengan pesat, oleh karenanya perusahaan penyedia listrik harus dapat menyediakan listrik yang memiliki kualitas yang baik dan handal, salah satu parameter kualitas daya listrik yang baik adalah memiliki nilai faktor daya diatas 0,85, faktor daya yang rendah banyak disebabkan oleh beban non-linear yang cenderung induktif seperti motor listrik, lampu hemat energi, dan lain lain, salah satu cara untuk memperbaiki nilai faktor daya adalah dengan menempatkan kapasitor secara *shunt*/parallel dengan beban induktif pada sistem. Analisa ini menggunakan simulasi *software PSIM* dengan kapasitor yang diubah variasi nya antara 0,05 uF sampai dengan 0,25 uF, didapatkan bahwasanya kapasitor yang dihubungkan secara parallel dengan beban induktif yang diwakilkan dengan resistor sebesar 2000 ohm dan inductor sebesar 10 H pada simulasi dapat meningkatkan nilai faktor daya, yang pada awalnya ketika menggunakan kapasitor dengan kapasitas 0,05 uF didapatkan nilai faktor daya 0,592, kemudian ketika menggunakan kapasitor dengan nilai 0,25 uF terjadi peningkatan nilai faktor daya menjadi 0,718, yang artinya menempatkan kapasitor pada sistem secara parallel dapat meningkatkan nilai faktor daya.

Kata kunci: faktor daya, kapasitor shunt, beban induktif

Abstract

In the industrial era 4.0, the need for electricity is proliferating. Therefore, electricity supply companies must be able to provide excellent and reliable-quality electricity. One of the parameters of good electrical power quality is having a power factor value above 0.85. Many low power factors are caused by non-linear loads that tend to be inductive, such as electric motors and energy-saving lamps. One way to improve the power factor value is to place a shunt/parallel capacitor with an inductive load on the system. This analysis uses PSIM software simulation with a capacitor whose variation changed between 0.05 uF to 0.25 uF. It is found that a capacitor connected in parallel with an inductive load represented by a resistor of 2000 ohms and an inductor of 10 H in the simulation can increase the power factor value, which initially, when using a capacitor with a capacity of 0.05 uF, the power factor value was 0.592. When using a capacitor with a value of 0.25 uF, there was an increase in the power factor value to 0.718, which means placing a capacitor in the system in parallel can increase the power factor value.

Keywords: power factor, shunt capacitor, inductive load

I. PENDAHULUAN

Energi listrik dibutuhkan manusia untuk dimanfaatkan, menyalakan peralatan listrik baik dirumah tangga maupun kegiatan yang proses produksi. Pada proses produksi terutama industri menggunakan energi listrik dari Perusahaan Listrik Negara (PLN). Energi listrik yang besar untuk menyalakan motor-motor listrik yang digunakan untuk menjalankan proses produksi dari mulai awal sampai dengan akhir produksi, motor listrik memiliki karakteristik beban yang bersifat

induktif yang menyebabkan faktor daya menjadi *lagging* atau gelombang sinus tegangan tertinggal dari gelombang sinus arus. Perusahaan Listrik Negara (PLN) memiliki standar nilai faktor daya yang harus dipenuhi oleh pelanggan yaitu sebesar 0,85 jika pada instalasi listrik pelanggan memiliki nilai faktor daya dibawah 0,85 maka pelanggan akan dikenakan denda penggunaan KVARh ini dikarenakan Nilai faktor daya yang rendah dapat menyebabkan sistem tersebut tidaklah efisien karena menyebabkan penggunaan daya semu

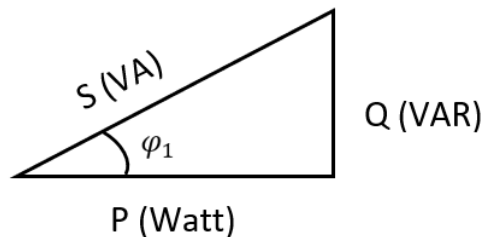
semakin besar sedangkan komponen biaya listrik yang dihitung PLN adalah daya aktif, kemudian seiring kenaikan daya semu maka meningkat pula arus listrik pada sistem yang menyebabkan kerugian disepanjang kabel penghantar sehingga membutuhkan diameter kabel penghantar yang semakin besar untuk mengurangi rugi rugi. Pada umumnya pelanggan listrik menggunakan kapasitor sebagai kompensator daya reaktif untuk memperbaiki nilai faktor daya karena sifat dari kapasitor yang merupakan beban kapasitif.

II. LANDASAN TEORI

Untuk memberikan landasan dalam kajian perbaikan faktor daya menggunakan kapasitor shunt dengan beban induktif, dibutuhkan beberapa konsep dasar meliputi, segitiga daya, faktor daya, dan perbaikan faktor daya

2.1. Segitiga Daya

Segitiga daya menggambarkan hubungan antara daya aktif, daya reaktif dan daya semu menggunakan prinsip trigonometri.



Gambar 1. Segitiga Daya

2.1.1 Daya Semu

Daya semu (*apparent power*) biasa disebut juga daya nyata merupakan perkalian antara arus dan tegangan dalam suatu jaringan, daya semu adalah daya yang sebenarnya harus di suplai ke beban dengan satuan volt ampere, persamaan daya semu dalam sistem 1 fasa adalah

$$S = V \times I \quad (1)$$

Jika dalam sistem 3 fasa

$$S = V \times I \times \sqrt{3} \quad (2)$$

Dimana:

S = Daya semu (VA)
 V = Tegangan efektif (Volt)
 I = Arus efektif (Ampere)
 φ = Sudut antara daya semu dengan daya nyata ($^{\circ}$).

2.1.2 Daya Aktif

Daya aktif adalah daya yang sesungguhnya terpakai untuk melakukan kerja terhadap suatu beban, satuan dari daya aktif adalah Watt yang merupakan perkalian antara tegangan, arus dan juga \cos dari sudut antara daya aktif dan daya semu pada segitiga daya. Berikut rumus daya aktif pada sistem 1 fasa

$$P = V \times I \times \cos \varphi \quad (3)$$

Jika dalam sistem 3 fasa

$$P = V \times I \times \cos \varphi \times \sqrt{3} \quad (4)$$

Dimana:

P = Daya aktif (Watt)
 V = Tegangan efektif (Volt)
 I = Arus efektif (Ampere)
 φ = Sudut antara daya semu dengan daya nyata ($^{\circ}$)

2.1.3. Daya Reaktif

Daya reaktif adalah jumlah daya yang diperlukan untuk menciptakan suatu medan magnet. Dari pembentukan medan magnet akan terbentuk *fluks* medan magnet. Contoh daya yang menimbulkan daya reaktif adalah transformator, motor, lampu pijar, dan lain-lain. Yang memiliki satuan daya yaitu VAr, rumus daya reaktif yaitu

$$Q = V \times I \times \sin \varphi \quad (5)$$

Jika dalam sistem 3 fasa

$$Q = V \times I \times \sin \varphi \times \sqrt{3} \quad (6)$$

Dimana:

Q = Daya reaktif (VAr)
 V = Tegangan efektif (Volt)
 I = Arus efektif (Ampere)
 φ = Sudut antara daya semu dengan daya nyata ($^{\circ}$)

2.2 Faktor Daya

Faktor daya merupakan beda sudut fasa antara tegangan dan arus, faktor daya disimbolkan dengan $\cos \varphi$ dengan rentang antara 0 sampai 1, semakin mendekati angka 1 berarti faktor daya pada sistem semakin baik, dan juga sebaliknya. Untuk mendapatkan nilai faktor daya dapat menggunakan perbandingan antara daya aktif dengan daya semu seperti pada persamaan berikut:

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

Maka sudut φ adalah:

$$\varphi = \arccos\left(\frac{P(\text{watt})}{S(\text{VA})}\right) \quad (8)$$

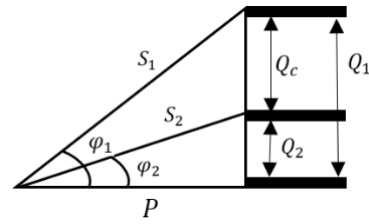
Dimana:

$\cos \varphi$ = Faktor daya

P = Daya aktif (Watt)

S = Daya semu (VA)

φ = Sudut antara daya semu dengan daya nyata ($^\circ$)



Gambar 4. Prinsip Perbaikan Faktor Daya

$$Q_c = Q_1 - Q_2 \quad (9)$$

Dimana:

Q_c = Daya reaktif kompensator

Q_1 = Nilai daya reaktif sebelum diperbaiki

Q_2 = Target daya reaktif setelah diperbaiki

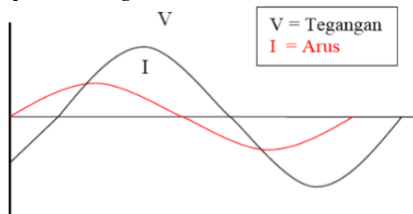
Perbaikan faktor daya tidak mempengaruhi nilai daya aktif, namun akan mempengaruhi komponen daya reaktif dan daya semu yang akan semakin mengecil menyebabkan sistem semakin efisien karena arus yang mengalir pada sistem akan berkurang.

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

Untuk mengkaji perbaikan faktor daya menggunakan kapasitor shunt dengan beban induktif, dilakukan simulasi menggunakan software *Power Simulation* atau lebih dikenal dengan nama **PSIM** untuk mensimulasikan rangkaian beban induktif yang diparalelkan dengan sebuah kapasitor yang nilai nya diubah ubah untuk melihat pengaruh kapasitor pada beban induktif, Gambar 5 merupakan rangkaian percobaan pada *software PSIM*.

2.2.1 Faktor Daya Leading

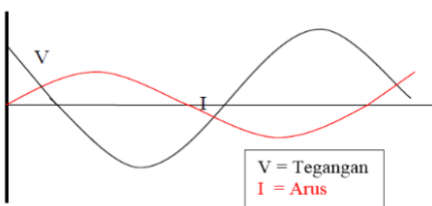
Faktor daya *leading* disebabkan oleh sifat beban non-linear yang cenderung kapasitif, pada kondisi ini gelombang sinus arus mendahului gelombang sinus tegangan oleh karena nya kondisi ini disebut faktor daya *leading*, berikut gambar 2 gelombang sinus arus dan tegangan dari faktor daya *leading*



Gambar 2. Gelombang Sinus Pada Faktor Daya Leading

2.2.2 Faktor Daya Lagging

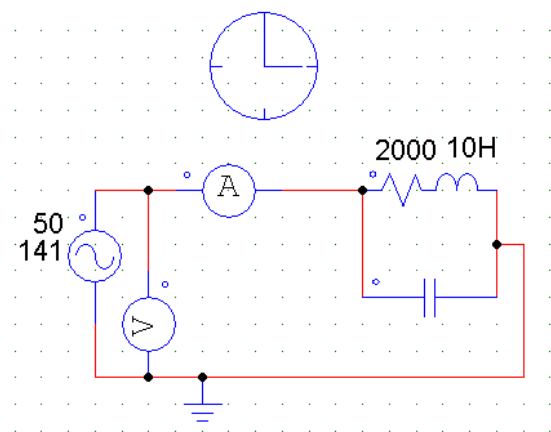
Faktor daya *lagging* disebabkan oleh sifat beban non-linear yang cenderung induktif, pada kondisi ini gelombang sinus arus tertinggal oleh gelombang sinus tegangan, oleh karena nya kondisi ini disebut faktor daya *lagging*, berikut gambar gelombang sinus arus dan tegangan dari faktor daya *lagging*



Gambar 3. Gelombang Sinus Pada Faktor Daya Lagging

2.3 Perbaikan Faktor Daya

Dalam menentukan kapasitansi kapasitor yang diperlukan untuk memperbaiki nilai faktor daya, harus diketahui terlebih dahulu berapa kebutuhan kompensasi daya reaktif yang dibutuhkan dengan cara menghitung nilai daya reaktif kompensator dengan menggunakan persamaan.



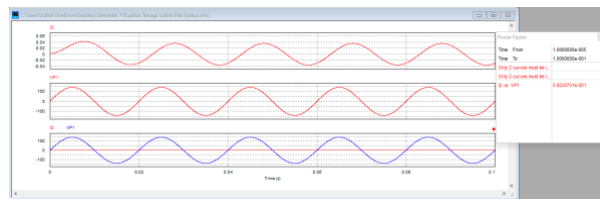
Gambar 5. Rangkaian PSIM Perbaikan Faktor Daya Dengan Kapasitor Paralel/Shunt Dengan Beban Induktif

Setelah memvariasikan nilai kapasitas kapasitor pada rangkaian di gambar 1 dengan nilai resistansi sebesar 2000 ohm, induktansi 10 Henry, Vrms 100 Volt, dan *Frekuensi* 50 hz yang tidak divariasikan, dari hasil simulasi didapatkan data pada tabel 1 dengan memvariasikan 5 kapasitas kapasitor mulai dari 0,05uF sampai dengan 0,25 uF

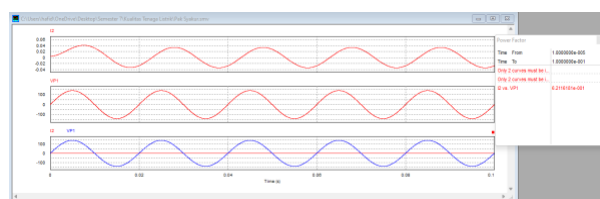
Tabel 1. Data Simulasi Perbaikan Faktor Daya

Arus (mA)	C (uF)	P (Watt)	S (VA)	Faktor Daya
27.0	0,05	1.44	2.69	0.59
24.4	0,1	1.44	2.43	0.62
23.2	0,15	1.44	2.30	0.65
22.0	0,2	1.44	2.18	0.68
20.8	0,25	1.44	2.06	0.71

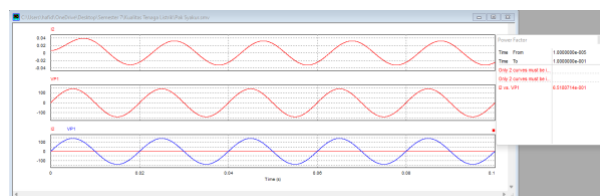
dari hasil simulasi juga didapatkan bentuk gelombang sinus arus dan gelombang sinus tegangan yang ditunjukkan dari gambar 6 hingga gambar 10, dapat diamati bahwasanya seiring dengan meningkatnya nilai kapasitor maka selisih fasa gelombang sinus arus (I_2) dengan gelombang sinus tegangan (V_{p1}) akan semakin mengecil yang artinya nilai faktor daya semakin membesar.



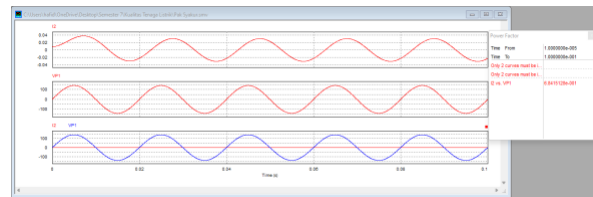
Gambar 6. Percobaan 1 Dengan C = 0,05 uF



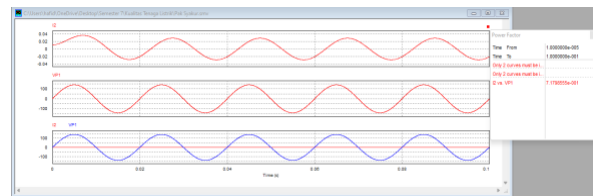
Gambar 7. Percobaan 2 Dengan C = 0,10 uF



Gambar 8. Percobaan 3 Dengan C = 0,15 uF



Gambar 9. Percobaan 4 Dengan C = 0,20 uF



Gambar 10. Percobaan 5 Dengan C = 0,25 uF

Dari hasil simulasi didapatkan bahwasanya peningkatan kapasitas kapasitor berbanding lurus dengan peningkatan faktor daya yang diilustrasikan pada grafik 1 yang dapat dibuktikan dengan perhitungan berikut, menggunakan variasi 1 dan 5 maka target faktor daya adalah 0,718 yang sebelumnya adalah 0,592

mencari sudut φ ketika faktor daya 0,592

$$\begin{aligned} \cos \varphi_5 &= 0,592 \\ \varphi_5 &= \cos^{-1}(0,592) \\ \varphi_5 &= 53,70^\circ \end{aligned}$$

mencari sudut φ ketika faktor daya 0,718

$$\begin{aligned} \cos \varphi_5 &= 0,718 \\ \varphi_5 &= \cos^{-1}(0,718) \\ \varphi_5 &= 44,11^\circ \end{aligned}$$

mencari arus ketika faktor daya 0,718

$$I_5 = \frac{P_5}{V_1 \cos \varphi_5} = \frac{1.44}{100 \cdot \cos(44.11^\circ)} = 0,02005A = 20,05mA$$

mencari arus Resistor kondisi awal dan akhir

$$\begin{aligned} I_{R5} &= I_5 \sin \varphi_5 = 20,05mA \cdot \sin (44,11^\circ) \\ &= 13,9556mA \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} I_{R1} &= I_1 \sin \varphi_1 = 27,0mA \cdot \sin (53,70^\circ) \\ &= 21,7600mA \end{aligned}$$

mencari arus pada kapasitor

$$\begin{aligned} I_{C5} &= I_{R1} - I_{R5} = 21,760 mA - 13,955 mA \\ &= 7,85 mA \end{aligned}$$

mendapatkan Impedansi Kapasitor baru

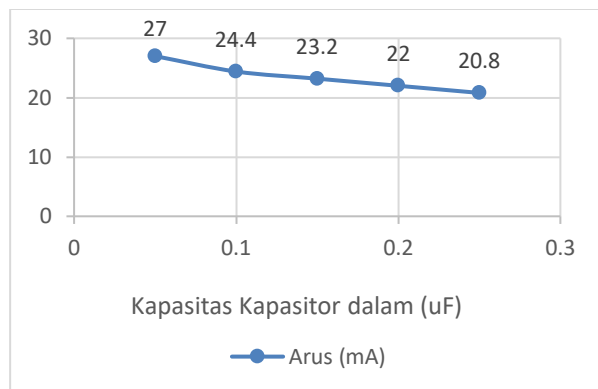
$$|X_c| = \frac{V}{I_{C5}} = \frac{100}{7,85 \text{ mA}} = 12738,8535 \Omega$$

mendapatkan kapasitas kapasitor

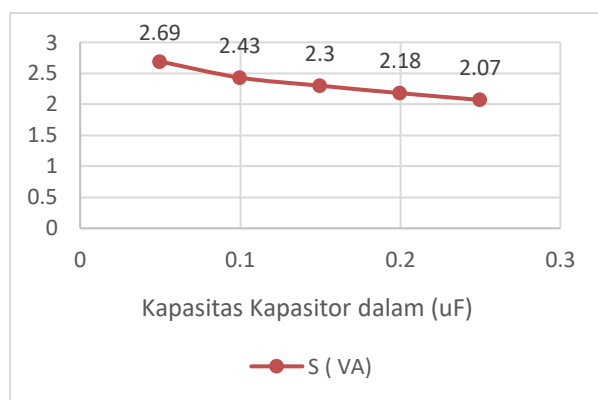
$$C_5 = \frac{1}{\omega X_c} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 12738,8535}$$

$$C_5 = 0,249873 \mu F = 0,25 \mu F$$

Dibuktikan dari hasil perhitungan maupun simulasi dibutuhkan kapasitor sebesar 0,25 uF untuk menaikkan faktor daya yang awalnya 0,592 menjadi 0,718. Kemudian untuk membuktikan seluruh data percobaan dapat dilakukan perhitungan sesuai dengan tahap di atas pada seluruh data percobaan.



Gambar 11. Grafik Hubungan Arus dengan Kapasitor



Gambar 12. Grafik Hubungan S dengan Kapasitor

Besar kapasitas kapasitor berbanding terbalik dengan daya semu, juga arus ini dapat diilustrasikan pada gambar 11 dan 12, maka daya semu dan juga arus pada sistem akan menurun

seiring dengan kenaikan kapasitor yang mempengaruhi besar faktor daya.

Menurut permen ESDM No 28 tahun 2016 dinyatakan bahwasanya nilai faktor daya minimal pada golongan industry adalah 0.85, jika dibawahnya maka akan dikenakan biaya kelebihan penggunaan KVARh dari nilai maksimal KVARh, dengan permisalan perhitungan penggunaan energi listrik dalam 1 tahun yaitu sebesar 100 KWh dengan kondisi faktor daya seperti pada table 1 no 5 yaitu 0,718, dihitung berapa denda yang harus dibayarkan dengan cara berikut :

Mencari KVARh Ketika faktor daya 0,85 dengan penggunaan energi sebesar 100 KWh

$$S_{pf\ 0,85} = \frac{P}{\cos 31,7^\circ} = 117,535 \text{ KVAh}$$

$$Q_{pf\ 0,85} = \sqrt{S_{pf\ 0,85}^2 - P^2} = \sqrt{117,535^2 - 100^2} = 61,761 \text{ KVARh}$$

Maka ditentukan bahwasanya dalam waktu 1 tahun penggunaan KVARh hanya dizinkan sebesar 61,761 KVARh, kemudian Ketika pf = 0,718 maka KVARh adalah:

$$S_{pf\ 0,718} = \frac{P}{\cos 44,11^\circ} = 139,275 \text{ KVAh}$$

$$Q_{pf\ 0,718} = \sqrt{S_{pf\ 0,718}^2 - P^2} = \sqrt{139,275^2 - 100^2} = 96,940 \text{ KVARh}$$

Kelebihan Penggunaan KVARh yang harus dibayar adalah :

$$Q_c = Q_{pf\ 0,718} - Q_{pf\ 0,85} = 96,940 - 61,761 = 35,179 \text{ KVARh}$$

Industri harus membayar kelebihan penggunaan daya KVARh dari batas maksimal yaitu 61,761 KVARh sebesar 35,179 KVARh dikali dengan Rp 1200/KVARh pada golongan I3

Denda yang harus dibayar pada industri golongan I3:

$$\text{Denda} = 35,179 \text{ KVARh} \times \text{Rp } 1.200/\text{KVARh} = \text{Rp } 42.214.-$$

Biaya Pokok pada industry golongan I3 dengan penggunaan pada luar waktu beban puncak :

$$\text{Biaya pokok} = 100 \text{ KWh} \times \text{Rp } 1.115/\text{KWh} = \text{Rp } 111.500.-$$

Didapatkan bahwasanya ada penambahan pembayaran sebesar 37,86 % jika faktor daya sebesar 0,718 tidak diperbaiki hingga 0,85 menurut standar PLN, tentu penambahan pembayaran tersebut merupakan jumlah yang sangat besar dan akan sangat merugikan industri, oleh karenanya instalasi kompensator daya reaktif sangat dibutuhkan untuk menghindari denda, salah satunya dengan menggunakan *capacitor bank* yang dihubungkan secara parallel (*shunt*) dengan sistem.

IV. KESIMPULAN

Setelah dilakukan simulasi menggunakan software PSIM dan juga dilakukan perhitungan analisa perbaikan faktor daya menggunakan kapasitor, dapat disimpulkan bahwa:

1. Semakin besar nilai kapasitor, maka arus dan daya semu yang mengalir pada sistem akan semakin mengecil.
2. Hasil perhitungan menunjukkan jika factor daya lebih kecil dari 0,85 akan ada penambahan pembayaran. Untuk factor daya sebesar 0,718 ada penambahan pembayaran sebesar 37,86% jika factor daya tidak diperbaiki hingga menjadi 0,85.
3. Efisiensi penggunaan listrik salah satu parameternya adalah faktor daya, jika faktor daya rendah konsumsi energi akan semakin membesar dan juga sebaliknya.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Rofi A, Ferdinan R. Analisa Penggunaan Kapasitor Bank Dalam Upaya Perbaikan Faktor Daya. Universitas 17 Agustus 1945. 2018.
- [2] Dani A, Hasanuddin M. Perbaikan Faktor Daya Menggunakan Kapasitor Sebagai Kompensator Daya Reaktif (Studi Kasus STT Sinar Husni). Seminar Nasional Royal (SENAR). Asahan. 2018. 1: 673 – 678.
- [3] Lestari AD, Sunarto, Tohir T. Analisis Pengaruh Variasi Nilai Kapasitor Bank Terhadap Kinerja Motor Induksi Tiga Fasa Menggunakan ETAP. *Prosiding The 13th Industrial Research Workshop and National Seminar (IRWNS)*. Bandung. 2022. 13: 317 – 322.
- [4] Noor AF, Ananta H, Sunardiyo S. “Pengaruh Penambahan Kapasitor Terhadap Tegangan, Arus, Faktor Daya, dan Daya Aktif Pada Beban Listrik di Minimarket”. Universitas Negeri Semarang. 2017.
- [5] Peraturan Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral No. 28 Tahun 2016. Tarif Tenaga Listrik. 2016.
- [6] Bhattacharyya, S., A. Choudhury, dan H.R. Jariwala. 2011. Case Study On Power Factor Improvement. *International Journal of Engineering Science and Technology (IJEST)* 3(12): 8372-8378.
- [7] Mohan N, Undeland TM, Robbins WP. *Power Electronics*. New York: John Wiley & Sons. 2005.
- [8] F. R. Islam, A. Lallu, K. A. Mamun, K. Prakash, and N. K. Roy. Power Quality Improvement of Distribution Network Using BESS and Capacitor Bank. *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*. 2021; 9(3): 625-631.
- [9] Lopez-Martin, V. M., Azcondo, F. J., & Pigazo, A. 2018. Power quality enhancement in residential smart grids through power factor correction stages. *IEEE Transactions on industrial electronics*. 2018. 11: 8553-8564.