

BAB II

TINJAUKAN PUSTAKA

A. Penelitian Terdahulu

Beberapa penelitian terdahulu telah mengkaji dampak beban non-linier terhadap parameter kualitas daya di berbagai gedung instansi. (Septiawan, 2023) mengawali kajian ini dengan menemukan bahwa pada sistem distribusi di Gedung FST Universitas Jambi, penggunaan beban-beban tertentu menyebabkan kondisi kualitas daya pada panel MDP tidak memenuhi standar SPLN, PUIL, maupun IEEE, yang menjadi indikasi awal adanya gangguan akibat beban non-linier.

Kondisi ketidakseimbangan beban sebagai salah satu dampak beban non-linier dipertegas oleh (Hermawan, 2023). Dalam penelitiannya di Fave Hotel, ditemukan bahwa meski parameter tegangan masih dalam batas standar SPLN, terjadi ketidakseimbangan arus yang sangat signifikan mencapai 64,15%, jauh melampaui batas IEEE Std 1159-2009 (maksimal 30%). Hal ini menunjukkan bahwa distribusi beban non-linier yang tidak merata dapat merusak stabilitas arus sistem.

Dampak yang lebih spesifik mengenai distorsi gelombang dilaporkan oleh (Davira, 2024). Hasil pengukurannya menunjukkan bahwa beban non-linier mengakibatkan lonjakan harmonisa arus (ITHD) hingga 37,7%, yang melampaui standar IEEE sebesar 15%. Selain itu, ditemukan anomali tegangan

yang melebihi batas SNI, yang memperkuat teori bahwa beban non-linier berpengaruh buruk pada fluktuasi tegangan dan arus secara simultan.

Disisi lain, (Nugroho, 2025) menekankan bahwa meskipun nilai harmonisa masih dalam batas toleransi, beban induktif dan non-linier yang dominan tetap menyebabkan tingginya daya reaktif dan penurunan efisiensi sistem. Penelitian tersebut menyimpulkan perlunya monitoring real-time dan penataan ulang pembagian beban untuk menjaga keandalan instalasi.

Upaya mitigasi melalui penggunaan komponen pendukung dianalisis oleh (Zulkarnaini, 2024). Pada Gedung Administrasi FTI Universitas Jayabaya, penggunaan kapasitas trafo yang besar (1600 kVA) dan capacitor bank terbukti mampu menekan nilai THDv hingga 2,4% dan memperbaiki faktor daya menjadi 0,98. Hal ini memberikan gambaran bahwa pengaruh buruk beban non-linier dapat dikendalikan dengan sistem kompensasi yang tepat.

B. Landasan Teori

1. Kualitas Daya Listrik

Karakteristik kualitas daya listrik secara umum mengacu pada tingkat kesesuaian parameter kelistrikan tegangan, arus, dan frekuensi listrik terhadap batas-batas yang dapat diterima serta tidak menimbulkan gangguan terhadap performa operasi peralatan listrik. Kualitas daya listrik dikatakan baik apabila karakteristik parameter kelistrikan berada pada batas normal. Selain itu, indikator lain yakni ketika peralatan beroperasi secara normal tanpa gangguan. Kualitas daya listrik menjadi suatu hal yang perlu

diperhatikan. Hal ini untuk mengurangi kemungkinan kerusakan-kerusakan peralatan sensitif tersebut. Beban-beban non-linier juga menjadi salah satu faktor penting yang mempengaruhi kualitas daya listrik. Beban tersebut merupakan sumber harmonik yang dapat menurunkan kualitas daya listrik.

2. Parameter kualitas daya listrik

Kualitas daya listrik merupakan aspek krusial dalam sistem kelistrikan yang mempengaruhi kinerja peralatan listrik. Terdapat beberapa aspek besaran kualitas daya listrik yang digunakan dalam sistem tenaga listrik.

a Arus

Arus listrik yaitu muatan yang mengalir melalui suatu material yang disebut penghantar. Arus listrik juga dapat disebut pergerakan atau aliran electron. Elektron ini dapat mengalir karena beda potensial (tegangan) antara kutub positif dan negatif. Arus listrik tidak dapat mengalir bila rangkaian dalam keadaan terbuka (Nugroho, 2025)

b Tegangan

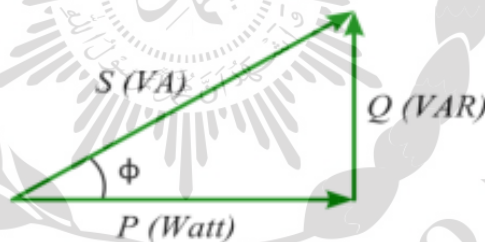
Tegangan adalah beda potensial listrik antar titik-titik pada suatu rangkaian listrik. Dengan adanya perbedaan potensial listrik tersebut mampu membangkitkan medan listrik sehingga timbul arus listrik. Perbedaan potensial antara ujung-ujung rangkaian listrik pada suatu rangkaian tertutup akan menjadikan suatu aliran listrik (Davira, 2024)

c Frekuensi

Frekuensi adalah ukuran jumlah putaran ulang per peristiwa dalam selang waktu yang diberikan. Satuan frekuensi dinyatakan dalam hertz (Hz) yaitu nama pakar fisika Jerman Heinrich Rudolf Hertz yang menemukan fenomena ini pertama kali. Disetiap Negara mempunyai tegangan listrik yang berbeda beda. Frekuensi tegangan listrik yang berlaku di Indonesia adalah 50 hz.

d Daya Listrik

Daya listrik adalah tingkat konsumsi energi dalam sebuah sirkuit atau rangkaian listrik. Daya listrik menyatakan banyaknya energi listrik yang terpakai setiap detiknya. Satuan daya listrik adalah Watt (Nugroho, 2025).



Gambar 2. 1 Segitiga Daya

(Sumber : (Davira, 2024)

1) Daya Nyata

Daya nyata merepresentasikan jumlah energi listrik yang secara langsung dimanfaatkan oleh beban untuk melakukan kerja (Nugroho, 2025).

Daya nyata dinyatakan dalam rumus :

Line to netral / 1 fasa $P = V \times I \times \cos \phi$(2.1)

Line to line / 3 fasa $P = \sqrt{3} \times V \times I \times \cos \phi$(2.2)

Keterangan :

P = Daya Nyata (Watt)

V= Tegangan (V)

I = Arus Yang Mengalir Pada Penghantar (Ampere)

$\cos \phi$ = Faktor Daya

2) Daya Reaktif

Daya reaktif cukup sulit untuk didefinisikan, secara sederhana daya reaktif adalah daya imajiner (khayal) yang menunjukkan adanya pergeseran arus dan tegangan listrik akibat adanya beban reaktif. Satuan daya ini adalah VAR (Volt Ampere Reactive)

Daya reaktif dinyatakan dalam rumus:

★ *Line to netral* / 1 fasa $Q = V \times I \times \sin \phi$(2.3)

Line to line / 3 fasa $Q = \sqrt{3} \times V \times I \sin \phi$(2.4)

Keterangan =

Q = Daya Reaktif (VAR)

V = Tegangan (V)

I = Arus Yang Mengalir Pada Penghantar (Ampere)

$\sin \phi$ = Faktor Reaktif

3) Daya Semu

Daya semu adalah daya yang dihasilkan oleh perhitungan listrik sebelum beban listrik diterapkan. Daya semu atau daya total (S) atau dalam bahasa Inggris daya semu adalah hasil dari perkalian tegangan efektif (V) dan arus efektif (I).

Daya Semu dapat dinyatakan dalam rumus :

$$\text{Line to netral / 1 Fasa } S = V \times I \dots\dots\dots(2.5)$$

$$\text{Line to line / 3 Fasa } S = \sqrt{3} \times V \times I \dots\dots\dots(2.6)$$

Keterangan :

S = Daya Semu

V= Tegangan (V)

I = Arus Yang Mengalir Pada Penghantar (Ampere)

e Faktor Daya

Ini biasa diartikan sebagai sudut fasa atau $\cos \phi$ yang merupakan perbandingan antara daya aktif (W) dan daya semu (VA) yang dimana arus didalam suatu rangkaian terhadap arus total yang masuk kedalam sebuah rangkaian. Sudut fasa ϕ adalah selisih fase antara fase tegangan dan fasa arus (Putra, 2020). Faktor daya menunjukkan besar efisiensi dalam menyalurkan daya yang akan digunakan.

Faktor daya dapat ditentukan dengan rumus:

$$\text{Cos } \phi = \text{Daya Nyata (Watt) / Daya Semu (S)} \dots\dots\dots(2.7)$$

Perhitungan koreksi Faktor Daya (Qc) :

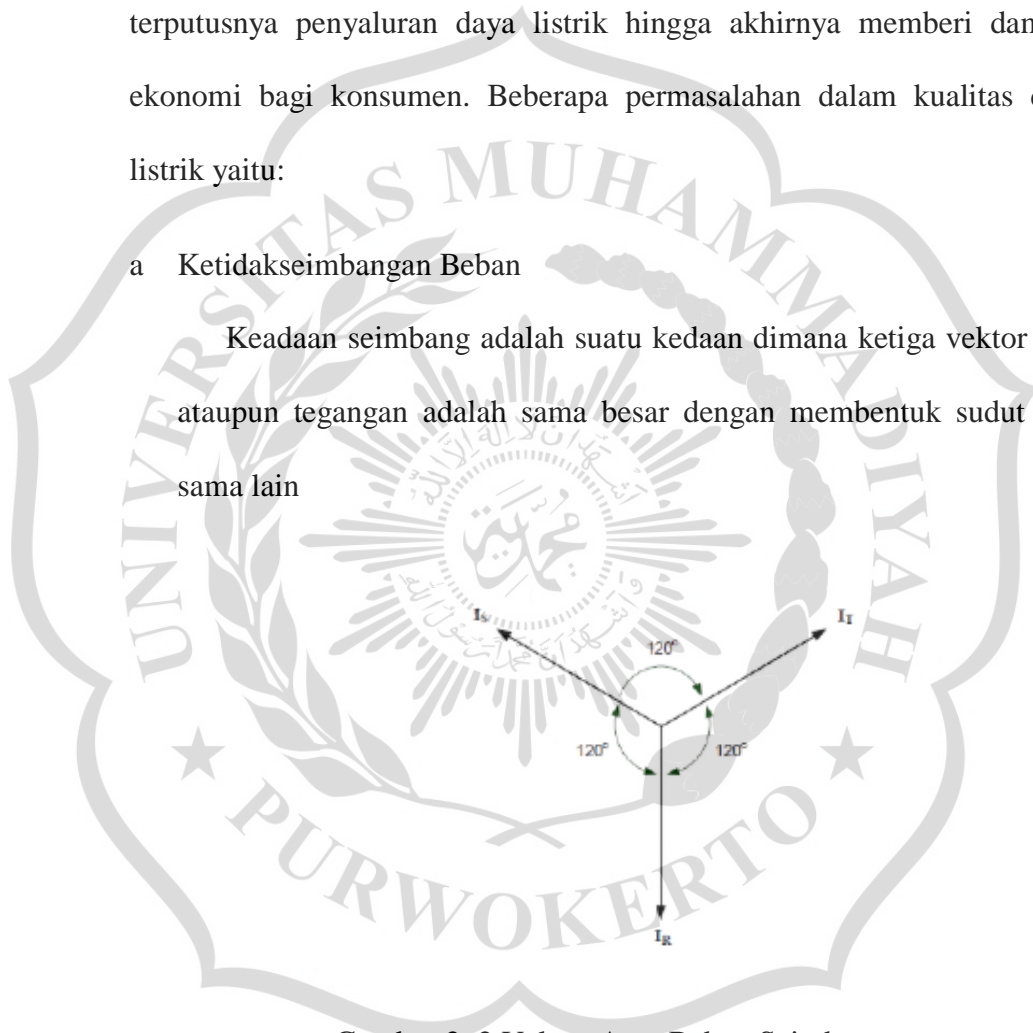
$$Qc = P \times (\text{Tan} (\text{Cos}^{-1}(\phi)) - \text{Tan} (\text{Cos}^{-1}(\phi))) \dots\dots\dots(2.8)$$

3. Permasalahan Kualitas Daya Listrik

Permasalahan kualitas daya pada umumnya selalu terkait dengan ketidaknormalan yang terjadi pada tegangan, arus dan daya serta dapat menyebabkan kegagalan operasi atau kerusakan pada peralatan listrik, terputusnya penyaluran daya listrik hingga akhirnya memberi dampak ekonomi bagi konsumen. Beberapa permasalahan dalam kualitas daya listrik yaitu:

a Ketidakseimbangan Beban

Keadaan seimbang adalah suatu keadaan dimana ketiga vektor arus ataupun tegangan adalah sama besar dengan membentuk sudut satu sama lain

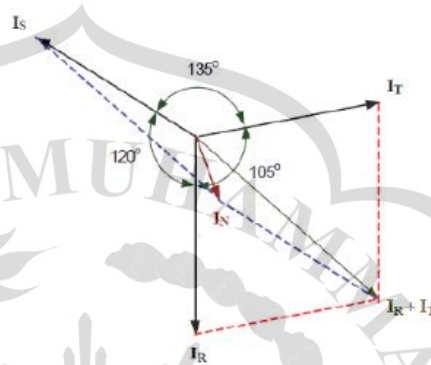


Gambar 2. 2 Vektor Arus Beban Seimbang

(Sumber : Pratama, 2020)

Gambar 2.2 menunjukkan vektor diagram arus dalam keadaan seimbang. Disini terlihat bahwa penjumlahan ketiga vektor arusnya (I_R, I_S, I_T) adalah sama dengan nol sehingga tidak muncul arus netral.

Sedangkan yang dimaksud dengan keadaan tidak setimbang adalah keadaan dimana salah satu atau kedua syarat keadaan setimbang tidak terpenuhi serta menyebabkan penurunan tegangan yang berbeda melalui impedansi saluran fasa.



Gambar 2. 3 Vektor Arus Beban Tidak Seimbang
(Sumber: Pratama,2020)

Gambar 2.3 menunjukkan vektor diagram arus dalam keadaan tidak setimbang. Disini terlihat bahwa penjumlahan ketiga vektor arusnya (I_R, I_S, I_T) adalah tidak sama dengan nol sehingga muncul suatu besaran yaitu arus netral (I_N) yang besarnya bergantung pada seberapa besar faktor pada ketidakseimbangannya.

Ketidakseimbangan beban dapat dinyatakan dengan :

$$I_{\text{rerata}} = \frac{I_R + I_S + I_T}{3} \dots\dots\dots(2.9)$$

Keterangan :

I_{rerata} = Arus rerata setiap fasa (A)

I_R = Arus fasa R (A)

I_S = Arus fasa S (A)

I_T = Arus fasa T (A)

Dimana besarnya arus fasa dalam keadaan setimbang maka sama dengan besarnya arus rerata, maka koefisien:

$$a = \frac{I_R}{I_{Rata-rata}} \dots\dots\dots(2.10)$$

$$b = \frac{I_S}{I_{Rata-rata}} \dots\dots\dots(2.11)$$

$$c = \frac{I_T}{I_{Rata-rata}} \dots\dots\dots(2.12)$$

Keterangan :

a = Koefisien fasa R

b = Koefisien fasa S

c = Koefisien fasa T

Dalam keadaan seimbang koefisien a b c sama dengan 1 maka rerata ketidakseimbangan beban dalam (%) adalah:

Ketidakseimbangan beban (%):

$$\frac{(|a-1|) + (|b-1|) + (|c-1|)}{3} \cdot 100\% \dots\dots\dots(2.13)$$

b Fluktuasi tegangan (Flicker)

Flicker adalah fluktuasi tegangan sesaat yang terjadi secara berulang, terutama disebabkan oleh penggunaan beban besar yang memerlukan daya tinggi dalam operasionalnya. Flicker memiliki masalah tersendiri, karena selain dapat mengganggu kinerja dan hasil kerja perangkat elektronik serta komputer, juga dapat menyebabkan perubahan intensitas cahaya pada lampu. Dalam kelistrikan nilai fluktuasi tegangan yang ditetapkan oleh PUIL 2011 dengan nilai +5% dengan nilai 231 Volt dan -10% dengan nilai 198 Vol.

Nilai presentase fluktuasi tegangan dapat dinyatakan dalam persamaan berikut:

$$\text{Fluktuasi Tegangan} = \frac{(V-220)}{220} \times 100\% \dots\dots\dots(2.14)$$

Keterangan:

V = Tegangan(V)

4. Harmonisa

Harmonisa adalah cacat/distorsi pada bentuk gelombang arus dan tegangan, yang diakibatkan penggunaan beban non linear sehingga bentuk gelombang arus dan tegangan tidak sinusoidal murni yang dinyatakan dalam nilai *Total Harmonic Distortion* (THD). Fenomena ini dianalisis menggunakan deret *Fourier* untuk menguraikan gelombang terdistorsi menjadi penjumlahan komponen sinusoidal dengan frekuensi kelipatan bulat atau biasa disebut orde harmonisa.

Deret *Fourier* yang merupakan landasan matematis yang merepresentasikan fungsi periodik terdistorsi sebagai penjumlahan dari

komponen sinusoidal yang disebut harmonisa. Dalam struktur deret ini, setiap suku penjumlahan secara langsung merepresentasikan orde harmonisa (n), yang merupakan kelipatan bilangan bulat dari frekuensi fundamental ($n = 1$). Keberadaan orde harmonisa ini muncul sebagai konsekuensi dari bentuk gelombang yang tidak lagi sinusoidal murni akibat pengaruh beban non-linear dalam sistem.

Secara matematis, hubungan tersebut didefinisikan melalui persamaan $f(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos[n\omega_0 t] + b_n \sin[n\omega_0 t])$ di mana indeks (n) menunjukkan identitas spesifik dari setiap orde harmonisa yang menyusun gelombang tersebut. Melalui analisis deret ini, kontribusi amplitudo dari setiap orde (a_n dan b_n) dapat dihitung untuk menentukan tingkat distorsi atau *Total Harmonic Distortion* (THD). Dengan demikian, deret *Fourier* tidak hanya berfungsi sebagai alat pemodelan, tetapi juga sebagai metode untuk membedah spektrum frekuensi guna mengidentifikasi komponen harmonisa yang harus dimitigasi dalam sistem tenaga listrik.

Tabel 2. 1 Nilai maksimum distorsi harmonik tegangan

<i>Bus Voltage (V) at Individual PCC</i>	<i>Individual Harmonic (%)</i>	<i>THD (%)</i>
$V \leq 1 \text{ kV}$	5,0	8,0
$1 \text{ kV} < V < 69 \text{ kV}$	3,0	5,0
$69 \text{ kV} < V < 161 \text{ kV}$	1,5	2,5
$161 \text{ kV} < V$	1,0	1,5

Untuk menganalisis kepatuhan Orde harmonisa Individual tegangan (IHDv), dapat dihitung menggunakan rumus berikut:

$$IHDv = \frac{V_h}{V_1} \times 100\% \dots\dots\dots(2.15)$$

dimana:

IHDv = Individual Harmonic Distortion Voltage (%)

V_h = Tegangan Harmonisa (V)

V₁ =Tegangan Fundamental (V)

Tabel 2. 2 Batas maksimum THDi

Isc/h	THD(%)
< 20	5
20 < 50	8
50 < 100	12
100 < 1000	15
> 1000	20

Menurut IEEE Standard 519 - 2022, untuk menentukan standar batas maksimum THDi pada utility, maka harus diketahui terlebih dahulu rasio hubung singkat (SC_{ratio}) (Dayera, 2024).Isc (Arus hubung singkat) dapat dicari dengan rumus:

$$I_{sc} = \frac{KVA \times 100}{\sqrt{3} \times KV \times Z(\%)} \dots\dots\dots(2.16)$$

Dimana, I_L (Arus beban maksimum) dapat dicari dengan rumus:

$$I_L = \frac{KW}{PF \times \sqrt{3} \times KV} \dots\dots\dots(2.17)$$

SC_{ratio} dapat dicari dengan menggunakan rumus:

$$SC_{ratio} = \frac{I_{SC}}{I_L} \dots\dots\dots(2.18)$$

Keterangan =

I_{SC} = Arus hubung singkat maksimum pada PCC

I_L = Arus pada beban maksimum

Z = Impedansi transformator

KW = Total daya aktif

Untuk menganalisis kepatuhan Orde harmonisa Individual arus (IHD_i), dapat dihitung menggunakan rumus berikut:

$$IHD_i = \frac{I_h}{I_1} \times 100\% \dots\dots\dots(2.19)$$

dimana:

IHD_i = *Individual Harmonic Distortion Current*(%)

I_h = Arus Harmonisa (A)

I_1 = Arus Fundamental (A)

5. Beban Listrik

Beban listrik adalah suatu perangkat alat yang dapat berfungsi jika dialiri arus listrik. Perangkat alat tersebut digunakan untuk merubah energi listrik menjadi energi lain seperti energi mekanik, energi panas energi cahaya, atau energi informatif (Zulkarnaini, 2024).

a Beban Linier

Beban linier dapat didefinisikan sebagai beban yang memiliki prinsip sistem *linear time-invariant* atau parameternya (resistansi, induktansi, kapasitansi) tidak berubah seiring berjalannya waktu. Beban ini bersifat linear karena hubungan antara tegangan dan arus berbanding lurus (proporsional). Beban ini bekerja dengan hanya merespons frekuensi yang diberikan oleh sumber. Jika tegangan masuk adalah sinus 50Hz, maka arus yang ditarik akan tetap sinus 50Hz tanpa mengubah bentuk gelombang karena impedansinya konstan. Contoh dari beban *linear time-invariant* ini adalah resistor murni (*heater*), induktor (koil), dan kapasitor, di mana arus akan selalu sinkron dan proporsional terhadap perubahan tegangan.

b Beban non linier

Beban non-linear adalah beban yang karakteristik impedansinya tidak konstan, dan secara fundamental melanggar prinsip superposisi dan homogenitas yang menjadi prinsip utama sistem linier. Arus total dari beban ini bukan merupakan penjumlahan linear dari masing-masing respon tegangan inputnya, dan perubahan skala pada tegangan input tidak diikuti dengan perubahan skala arus yang proporsional. Akibatnya, hubungan arus dan tegangan tidak berbanding lurus yang menyebabkan bentuk gelombang arus terdistorsi dan tidak lagi serupa dengan bentuk gelombang tegangan sinusoidalnya.

Mekanisme ini bekerja melalui komponen semikonduktor aktif seperti dioda atau transistor yang berfungsi sebagai sakelar, sehingga arus hanya ditarik pada titik operasional tegangan tertentu yang mengakibatkan aliran arus berbentuk pulsa tajam yang terdistorsi dan impedansi berubah secara drastis dalam satu siklus gelombang sehingga tidak hanya merespons frekuensi dasar dari sumber (misalnya 50Hz), tetapi juga menghasilkan frekuensi-frekuensi baru yang disebut harmonisa. Contoh utama beban non-linier yang umum ditemukan di lingkungan kampus adalah Rectifier pada komputer (*Switch Mode Power Supply*), *Uninterruptible Power Supply (UPS)*, *Variable Speed Drive (VSD)* pada motor AC, lampu hemat energi (LED dan CFL) serta sistem Pendingin (AC) dengan Kompresor Inverter

Ketika beban non-linier menarik arus non-sinusoidal dari sistem, arus ini mengalir melalui impedansi sistem (kabel, transformator, generator), menghasilkan penurunan tegangan (*voltage drop*) non-sinusoidal. Tegangan non-sinusoidal inilah yang diukur sebagai *Total Harmonic Distortion Voltage (THDv)*. Sementara itu, arus distorsi yang dihasilkan langsung diukur sebagai *Total Harmonic Distortion Current (THDi)*. THDi adalah fokus utama dalam analisis *power losses* karena arus harmonisa tidak berkontribusi pada transfer daya aktif yang berguna, tetapi secara signifikan meningkatkan I^2R (*losses*) di seluruh infrastruktur distribusi listrik, mempercepat penuaan peralatan, dan memicu risiko *overheating* kawat netral.