

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Studi Pustaka

Penelitian audit kualitas daya listrik pada sebuah gedung sudah banyak dilakukan. Robby Davitra, dkk dalam jurnalnya yang berjudul dampak dari Total Harmonic Distortion pada transformator distribusi di Fakultas Teknik Universitas Riau. Metode yang dilakukan dalam penelitian ini adalah metode komparasi antara hasil pengukuran dengan standar IEEE 519-1992. kemudian menghitung losses dan derating yang terjadi pada transformator akibat pengaruh THD (total harmonic distortion). (Dhavitra, dkk, 2015)

Hadi Sugiarto dalam penelitiannya tentang “Kajian Harmonisa Arus Dan Tegangan Listrik di Gedung Administrasi Politeknik Negeri Pontianak”. Menurutnya kandungan harmonisa arus dan tegangan listrik pada penelitian ini, dapat diketahui dengan melakukan pengukuran menggunakan alat ukur Power Quality Analyzer Fluke 43B. Alat ukur ini digunakan untuk mengukur arus, tegangan, daya, faktor daya, harmonisa (THD) arus dan tegangan. Tampilan hasil pengukuran dari alat ukur Power Quality Analyzer Fluke 43B dapat berbentuk gelombang, spektrum yang terjadi pada tiap-tiap orde harmonisa dan dapat berbentuk teks. Kemudian hasil pengukuran dibandingkan dengan standar harmonik yang diperkenankan dan seterusnya dilakukan analisa. (Sugiarto, 2012)

Elih, Mulyana. dalam jurnalnya yang berjudul Pengukuran Harmonisa Tegangan dan Arus Listrik di Gedung Direktorat TIK Universitas Pendidikan Indonesia menyebutkan bahwa Peralatan-peralatan seperti komputer, printer, scanner, inverter, konverter, dan lain sebagainya merupakan beban non-linier. Beban non-linier adalah beban dimana hubungan antara arus dan tegangannya tidak linier. Keberadaan beban non-linier pada sistem tenaga listrik akan menimbulkan gangguan harmonisa. Tingkat harmonisa yang melewati standar dapat menyebabkan terjadinya peningkatan panas pada peralatan. Bahkan pada kondisi terburuk dapat terjadi gangguan (*hanging up*) bahkan kerusakan permanen pada beberapa peralatan elektronik yang sensitif termasuk. (Mulyana, 2008)

2.2. Landasan Teori

2.2.1. Pengertian Audit Kualitas Daya Listrik

Pada suatu bangunan instansi pemerintah, besarnya pemakaian energi di tiap-tiap bangunan gedung dapat dilakukan usaha penghematan apabila sudah diketahui jenis energi dan untuk apa energi tersebut digunakan.

Kegiatan untuk melakukan identifikasi jenis energi dan besarnya energi yang digunakan pada setiap bagian operasi suatu bangunan/pabrik, disebut audit energi. Audit energi bertujuan untuk menganalisis seberapa efisien penggunaan energi dari suatu bangunan dan sekaligus memberikan kemungkinan usaha penghematannya.

Kualitas Daya Listrik sudah menjadi bagian penting dari sebuah sistem tenaga. Didefinisikan oleh Ewald F.Fuchs dan Mohammad A.S. Masoum (2008), bahwa kualitas daya listrik yaitu kualitas daya yang umumnya dimaksudkan untuk mendefinisikan kualitas tegangan dan atau kualitas pada saat ini dan dapat didefinisikan sebagai: ukuran, analisis, dan peningkatan tegangan bus untuk mempertahankan bentuk gelombang sinusoidal pada tegangan dan frekuensi. Definisi ini mencakup semua fenomena sesaat (*momentary*) dan keadaan (*steady-state*).

Sedangkan menurut Roger C. Dugan, Mark F. McGranaghan, dan H. Wayne Beaty (2004) dalam bukunya yang berjudul *Electrical Power System Quality*, kualitas daya listrik didefinisikan sebagai suatu problem daya yang ditimbulkan berupa deviasi tegangan, arus, ataupun frekuensi yang mengakibatkan kegagalan atau tidak beroprasinya peralatan pelanggan.

Dari kedua pengertian diatas, dapat disimpulkan jika audit kualitas daya listrik adalah kegiatan untuk mengidentifikasi kualitas tegangan dan atau kualitas pada saat ini serta mencoba mengidentifikasi kemungkinan penghematan energi dari suatu problem daya yang ditimbulkan. Berupa deviasi tegangan, arus, ataupun frekuensi yang mengakibatkan kegagalan atau tidak beroprasinya peralatan pelanggan.

2.2.2. Daya

Pada sistem tenaga listrik, daya listrik didefinisikan sebagai banyaknya energi yang digunakan untuk melakukan usaha atau kerja per satuan waktu pada suatu rangkaian listrik tertutup. Seperti rumus dibawah ini:

$$P = \frac{W}{t} \quad (1)$$

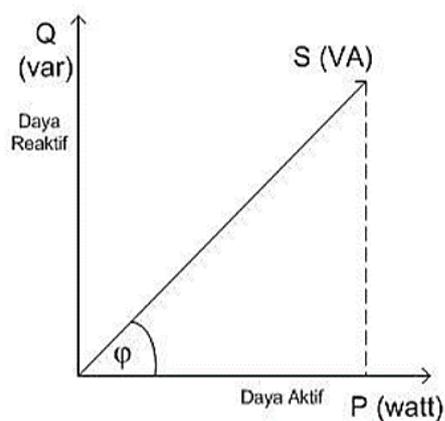
Biasanya daya listrik dinyatakan dalam satuan Watt, dimana 1 Watt memiliki daya yang setara dengan perkalian antara tegangan 1 Volt dengan arus 1 Ampere. Secara rumus dapat dinyatakan sebagai berikut:

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

Dalam sistem tenaga listrik, daya diklasifikasikan menjadi tiga jenis, yaitu daya semu, daya aktif, dan daya reaktif.

2.2.3. Segitiga Daya

Segitiga daya merupakan segitiga yang menggambarkan hubungan matematika antara daya aktif, daya reaktif, dan daya semu berdasarkan dengan konsep trigonometri seperti gambar 2.1 dibawah ini..



Gambar 2.1 Segitiga Daya

(Sumber: (Jonal Hontong, dkk , 2015)

Pada gambar 2.1 diatas menjelaskan bahwa daya semu (S) merupakan resultan dari dua komponen, yaitu daya aktif (P) dan daya reaktif (Q). Hubungan tersebut merupakan segitiga daya dan rumusnya didefinisikan sebagai berikut:

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

$$Q = V \times I \times \sin\varphi \quad (4)$$

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad (5)$$

Keterangan:

P = Daya aktif (Watt /kW)

Q = Daya reaktif (Volt Ampere Reaktan /VAR)

S = Daya semu (Volt Ampere)

φ = Beda sudut fasa (Rad/deg)

V = Tegangan (Volt)

I = Arus (Ampere)

2.2.4. Daya Aktif

Daya aktif merupakan daya listrik yang diperlukan oleh mesin- mesin listrik untuk melakukan kerja. Daya aktif dihasilkan oleh beban listrik yang bersifat resistif murni. Satuan yang digunakan oleh daya Aktif yaitu Watt atau kilo-Watt (kW), dimana merupakan hasil perkalian antara tegangan, arus, dan faktor daya yang dimiliki oleh beban. Secara teoritis dapat dinyatakan dengan persamaan berikut:

Untuk listrik satu fasa:

$$P = V \times I \times \cos \varphi \quad (6)$$

Untuk listrik tiga fasa:

$$p = \sqrt{3} \times V_L \times I \times \cos \varphi \quad (7)$$

Keterangan:

P = Daya aktif (killo-Watt/kW)

V = Tegangan listrik (Volt/V)

I = Arus Listrik (Ampere/A)

$\cos \varphi$ = Faktor daya

2.2.5. Daya Reaktif

Daya reaktif merupakan daya yang dibutuhkan untuk pembentukan medan magnet dan dihasilkan dari beban-beban yang bersifat reaktif. Daya reaktif merupakan perkalian antara tegangan, arus, dan faktor reaktif yang bersumber dari beban. Secara teoritis dapat dinyatakan dengan persamaan berikut:

Untuk listrik satu fasa:

$$Q = V \times I \times \sin \varphi \quad (8)$$

Untuk listrik tiga fasa:

$$Q = \sqrt{3} \times V_L \times I_L \times \sin \varphi \quad (9)$$

Keterangan:

Q = Daya reaktif (killo Volt Ampere Reaktan/ KVAR)

V = Tegangan listrik (Volt/V)

I = Arus Listrik (Ampere/A)

$\sin \varphi$ = Faktor reaktan

2.2.6. Daya Semu

Daya semu adalah hasil penjumlahan secara vektor antara daya aktif dan daya reaktif, dimana :

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad (10)$$

Daya semu berfungsi sebagai pembangkitan energi listrik pada transformator atau pada generator. Satuan dari daya semu yaitu Volt Ampere (VA), yang merupakan hasil perkalian antara besarnya tegangan dan arus yang

mengalir pada suatu penghantar transmisi atau distribusi listrik. Secara teoritis dinyatakan dengan persamaan:

$$S = V \times I \quad (11)$$

Keterangan:

S = Daya semu (Volt-Ampere/VA)

P = Daya aktif (kilo-Watt/kW)

Q = Daya reaktif (kilo Volt Ampere Reaktan/ kVAR)

V = Tegangan Listrik (Volt/V)

I = Arus listrik (Ampere/A)

2.2.7. Faktor Daya

Merupakan cosinus sudut yang dihasilkan dari perbandingan nilai daya aktif (P) dengan daya semu (S). Secara teoritis dapat dinyatakan dengan persamaan berikut:

$$\begin{aligned} \text{Faktor Daya (Pf)} &= \frac{\text{Daya Aktif (P)}}{\text{Daya Semu (S)}} \\ &= \frac{kW}{kVA} \\ &= \frac{V \times I \times \cos\phi}{V \times I} \\ &= \cos\phi \end{aligned} \quad (12)$$

PT. PLN (persero) selaku penyedia daya listrik memberikan batasan terhadap faktor daya, untuk bangunan gedung diberi batas sebesar 0.85. jika faktor daya rata-rata dibawah angka tersebut maka dikenakan denda Penalti oleh PLN. Penyebab faktor daya rendah pada suatu sistem jaringan listrik adalah beban induktif. Pada suatu rangkaian induktif murni, arus akan tertinggal sebesar 90° terhadap tegangan, perbedaan sudut fase ini yang akan menyebabkan faktor daya untuk mendekati nol. Beban-beban listrik yang menyebabkan rendahnya faktor daya antara lain motor induksi, unit-unit ballast dari lampu, dan alat-alat las busur listrik.

Efek lain yang ditimbulkan oleh rendahnya faktor daya selain terkena penalti dari penyedia layanan listrik (PLN) jika dibawah batas, yaitu:

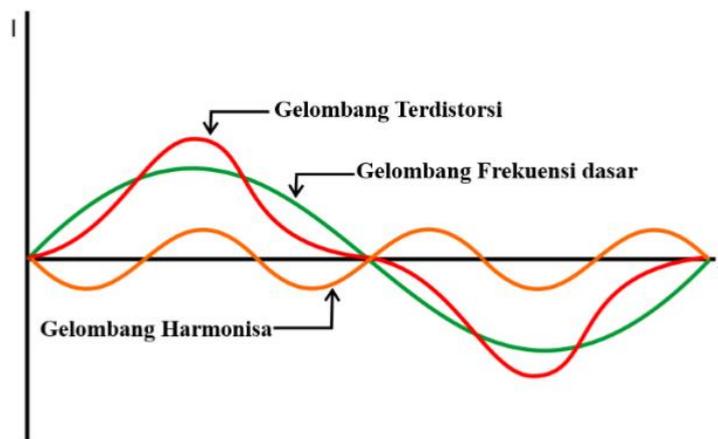
- a. Mengalami kerugian daya pada jalur penghantar, karena pada sebuah penghantar, kerugian yang timbul akibat arus yang mengalir adalah berbanding lurus dengan nilai arusnya. Jika suatu penghantar dialiri arus semakin besar, maka akan semakin besar pula losses pada jaringan tersebut.
- b. Ukuran penghantar harus lebih besar karena ketika faktor daya rendah, arus yang mengalir akan meningkat, dengan demikian untuk mengalirkan arus yang besar diperlukan kabel yang memiliki luas penampang yang semakin besar, dan biaya yang dibutuhkan besar.
- c. Mengakibatkan efisiensi rendah. Hal ini karena jika faktor daya rendah akan mengakibatkan drop tegangan yang cukup besar dan kerugian disepanjang penghantar.

2.2.8. Harmonik

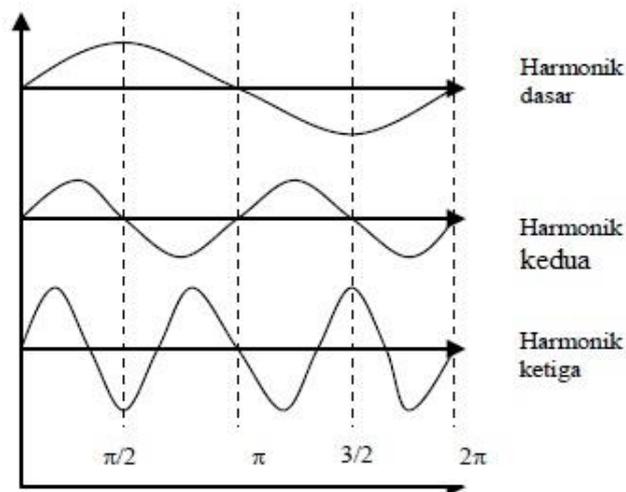
Harmonik merupakan sebuah permasalahan yang saat ini harus segera diatasi. Hal ini dikarenakan harmonik dapat menimbulkan banyak efek negatif pada sistem kelistrikan, baik itu sisi ekonomi maupun peralatan itu sendiri. Pada saat ini hampir semua peralatan listrik bersifat non-linear, seperti lampu hemat energi, ballast lampu, motor listrik, inverter, dan lainnya. Beban-beban non-linear tersebut penyebab terjadinya distorsi terhadap gelombang pada saluran daya listrik, padahal gelombang tegangan dan gelombang arus yang disalurkan serta dihasilkan dalam sistem listrik yang ideal adalah gelombang sinusoidal murni.

Definisi dari harmonik itu sendiri merupakan gangguan yang terjadi dalam sistem distribusi tenaga listrik akibat adanya distorsi gelombang tegangan dan gelombang arus. Gelombang akan terdistorsi karena adanya proses superposisi antara gelombang frekuensi dengan frekuensi dasar. Sehingga gelombang sinus pada sistem distribusi tidak lagi murni atau mengalami cacat riak-riak gelombang. Distorsi gelombang arus dan tegangan ini akan membentuk gelombang-gelombang yang frekuensinya merupakan kelipatan bulat bilangan

harmonik dengan frekuensi dasarnya (f , $2f$, $3f$, dst). Gelombang yang frekuensinya merupakan kelipatan bilangan bulat dengan frekuensi dasar merupakan orde ke- h harmonik. Di Indonesia frekuensi dasar pada sistem tenaga listrik adalah 50 Hz, maka untuk nilai frekuensi pada harmonik kedua (orde ke-2) yaitu 100 Hz, frekuensi harmonik ketiga (orde ke-3) 150 Hz dan seterusnya.



Gambar 2.2 Gelombang Harmonik
(Sumber: Antono, dkk, 1992)



Gambar 2.3 Gelombang Terdistorsi dan Hasilnya

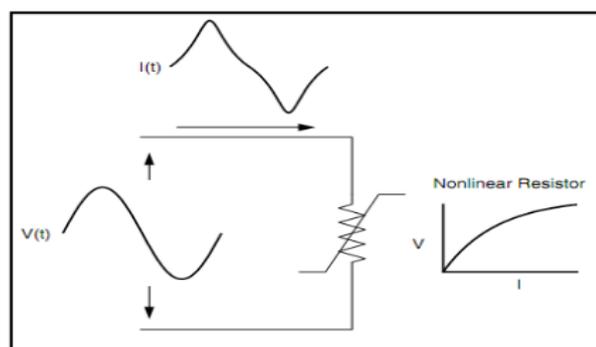
(Sumber: <http://bagionthink.blogspot.com/2016/01/harmonisa-gelombang-listrik.html>
diakses tanggal 26 Agustus 2019)

2.2.8.1. Penyebab Harmonik

Eward F. Fuchs dan Mohammad A.S. Masoum (2008) dalam bukunya yang berjudul *Power Quality in Power Systems and Electrical machines* menerangkan bahwa sumber penyebab utama dari harmonik dalam sistem tenaga listrik terbagi dua yaitu:

- a. Beban-beban industri yang bersifat non-linear seperti peralatan elektronika daya, contohnya *rectifier* dan inverter kemudian beban yang menghasilkan busur listrik contohnya mesin las.
- b. Beban-beban perumahan atau komersil dengan pengatur daya, seperti televisi, komputer, lampu *fluorescent*, dan lampu hemat energi.

Kemudian Roger C. Dugan (2004) dalam bukunya yang berjudul *Electrical Power System Quality* edisi kedua, menyebutkan bahwa distorsi harmonik disebabkan oleh peralatan non-linear dalam sistem tenaga listrik. Peralatan non-linear adalah peralatan yang arusnya tidak sebanding dengan tegangan yang diberikan. Gambar 2.4 dibawah ini mengilustrasikan konsep sebuah tegangan sinusoidal yang diterapkan pada sebuah resistor non-linear yang simpel, dimana arus dan tegangan bervariasi seperti yang ditampilkan pada kurva. ketika tegangan yang diberikan sangat baik, hasilnya arus akan terdistorsi. Menaikan nilai tegangan beberapa persen dapat menyebabkan arus meningkat hingga berlipat ganda, dan menjadi bentuk gelombang yang berbeda. hal tersebut merupakan penyebab terbanyak terjadinya distorsi harmonik



Gambar 2.4 Distorsi gelombang arus disebabkan oleh beban non-linear

(Sumber: Akhmad, 2012)

2.2.8.2. Total Harmonic Distortion

Total Harmonic Distortion (THD) merupakan sebuah ukuran harmonik yang paling umum digunakan untuk menunjukkan tinggi rendahnya kandungan dari jumlah harmonik pada suatu gelombang yang terdistorsi. THD merupakan sebuah perbandingan dari hasil penjumlahan komponen harmonik dengan komponen fundamental (dasar). THD dinyatakan dalam ukuran prosentase (%). Semakin besar nilai prosentase THD arus atau tegangan, maka akan semakin besar pula tingkat resiko kerusakan yang akan dialami oleh sistem kelistrikan. Untuk gelombang tegangan, nilai THD nya didefinisikan seperti berikut:

$$THD_V = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} V_h^2}}{V_1} \times 100\% \quad (13)$$

Sedangkan untuk gelombang arus, nilai THD nya didefinisikan sebagai berikut:

$$THD_I = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2}}{I_1} \times 100\% \quad (14)$$

Keterangan:

THD_V = Total Harmonic Distortion tegangan

THD_I = Total Harmonic Distortion arus

V_h = Nilai tegangan harmonik (V)

V_1 = Nilai tegangan fundamental (V)

I_h = Nilai arus harmonik (A)

I_1 = Nilai arus fundamental (A)

h = arus dan tegangan harmonik ke-h

2.2.8.3. Batas Standar Harmonik

Beberapa dokumen mengenai standar batasan harmonik pada sistem tenaga listrik telah dipublikasikan, diantaranya adalah standar IEEE 519-

2014, IEC 61000-3-4, IEC61000-3-6, dan lain lain. Standar IEC biasanya digunakan untuk daerah Eropa dan standar ANSI dan IEEE banyak digunakan di Amerika. Mengenai standar yang digunakan pada penelitian ini adalah standar IEEE 519 tahun 2014.

Eward F. Fuchs dan Mohammad A.S. Masoum (2008) menerangkan bahwa IEEE 519-2014 adalah praktik dan persyaratan yang direkomendasikan untuk mengendalikan harmonik dalam sistem tenaga listrik dan IEEE-519 lebih komprehensif dibandingkan dengan standar IEC. Standar harmonik tegangan memiliki acuan berdasarkan nilai tegangan yang digunakan pada sebuah sistem, sedangkan untuk acuan harmonik arus adalah nilai perbandingan dari arus hubung singkat dengan arus yang bekerja pada beban.

Tabel 2.1 Batas Total Harmonic Distortion tegangan

Nominal Voltage	Individual Harmonic Order	THD
$V \leq 69 \text{ KV}$	3,0 %	5,0 %
$69 \text{ KV} < V < 161 \text{ KV}$	1,5 %	2,5 %
$V \geq 161 \text{ KV}$	1,0 %	1,5 %

Tabel 2.2 Batas Total Harmonic Distortion arus

SCA/ I_L	Individual Harmonic Order (h) Current Distortion Limit					THD
	$h < 11$	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$h \geq 35$	
$V_{Supply} \leq 69 \text{ KV}$						
< 20	4,0 %	2,0 %	1,5 %	0,6 %	0,3 %	5,0 %
20 – 50	7,0 %	3,5 %	2,5 %	1,0 %	0,5 %	8,0 %
50 - 100	10,0 %	4,5 %	4,0 %	1,5 %	0,7 %	12,0 %
100- 1000	12,0 %	5,5 %	5,0 %	2,0 %	1,0 %	15,0 %
>1000	15,0 %	7,0 %	6,0 %	2,5 %	1,4 %	20,0 %

Tabel 2.3 Batas Total Harmonic Distortion arus (Lanjutan)

SCA/ I_L	Individual Harmonic Order (h) Current Distortion Limit					THD
	$h < 11$	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$h \geq 35$	
$69 \text{ KV} \leq V_{Supply} < 161 \text{ KV}$						
< 20	2,0 %	1,0 %	0,75 %	0,3 %	0,15 %	2,5 %
20 – 50	3,5 %	1,75 %	1,25 %	0,5 %	0,25 %	4,0 %
50 - 100	5,0 %	2,25 %	2,0 %	1,25 %	0,35 %	6,0 %
100- 1000	6,0 %	2,75 %	2,5 %	2,0 %	0,5 %	7,5 %
>1000	7,5 %	3,5 %	3,0 %	2,5 %	0,7 %	10,5 %
SCA/ I_L	Individual Harmonic Order (h) Current Distortion Limit					THD
	$h < 11$	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$h \geq 35$	
$V_{Supply} \geq 161 \text{ KV}$						
< 50	2,0 %	1,0 %	0,75 %	0,3 %	0,15 %	2,5 %
≥ 50	3,5 %	1,75 %	1,25 %	0,5 %	0,25 %	4,0 %

2.2.8.4. Efek Harmonik

Efek dari harmonik pada sistem tenaga listrik terbilang banyak, baik itu sisi penyuplai maupun pada sisi pengguna listrik. Selain mengakibatkan adanya kerusakan atau gangguan pada sistem distribusi listrik, efek harmonik juga dapat menimbulkan pengaruh ekonomis yang sangat signifikan. Dampak yang paling besar dari efek harmonik yaitu terjadinya peningkatan panas pada peralatan sistem tenaga listrik terutama pada transformator. Kenaikan panas ini disebabkan karena selain oleh arus pada frekuensi dasar, harmonik juga menghasilkan arus eddy (*Eddy current losses*). Peningkatan arus eddy ini juga dapat mengurangi umur transformator. Berikut ini adalah beberapa efek yang ditimbulkan oleh harmonik:

- a. Merusak kapasitor bank karena terjadinya resonansi harmonik.
- b. Meningkatnya panas *eddy current* , menimbulkan fluk harmonik dan fluk *density* pada transformator meningkat.
- c. Adanya arus pada kawat netral sehingga menyebabkan kabel menjadi panas.

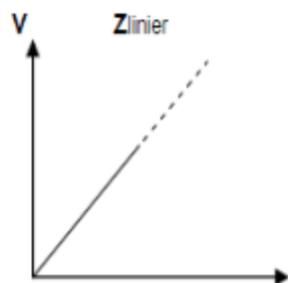
- d. Pemutus beban dapat bekerja dibawah arus pengenalnya atau mungkin tidak bekerja pada arus pengenal, sehingga menimbulkan kegagalan proteksi.
- e. Timbulnya getaran mekanik pada panel listrik yang merupakan getaran akibat resonansi mekanis akibat harmonik arus frekuensi tinggi.
- f. Harmonik dapat menimbulkan tambahan torsi pada kWh meter jenis elektromekanis yang menggunakan piringan induksi berputar, sehingga bisa mengakibatkan kesalahan penunjukan kWh meter karena piringan induksi tersebut dirancang hanya untuk beroperasi pada frekuensi dasar.

2.2.9. Jenis Beban-Beban Listrik

Jenis beban yang terpasang pada sistem kelistrikan dibedakan menjadi dua, yaitu beban linear dan beban non-linear.

2.2.9.1. Beban Linear

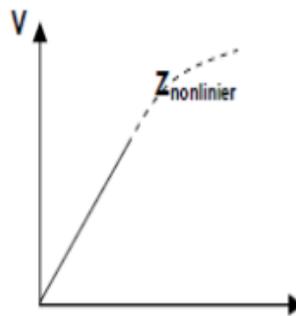
Beban linear merupakan jenis beban yang komponen arusnya proporsional terhadap tegangan dan memberikan bentuk keluaran yang linear sehingga arus yang mengalir sebanding dengan impedansi (Z) dan perubahan tegangan. Apabila tegangan sumber bentuknya sinusoidal, maka arus yang melewati beban juga harus sama sinusoidal. Gelombang arus yang dihasilkan oleh beban linear akan sama bentuknya dengan bentuk gelombang tegangan. Contoh yang termasuk kedalam jenis beban linear adalah resistor, lampu pijar, pemanas, dan lain-lain. berikut ini adalah gambar 2.5 yang menunjukkan hubungan antara gelombang tegangan dan arus yang dimiliki beban linear:



Gambar 2.5 Resultan beban linear
(Sumber: Putra & Ervianto, 2016)

2.2.9.2. Beban Non-Linear

Beban non-linear merupakan kebalikan dari beban linear, yaitu beban listrik yang komponen arusnya tidak proporsional terhadap komponen tegangannya, sehingga bentuk gelombang arusnya tidak sama dengan bentuk gelombang tegangan atau mengalami distorsi. Apabila tegangan sumber berbentuk gelombang sinusoidal, maka arus yang melewati beban tidak lagi sinusoidal, hal ini karena beban non-linear akan menyerap arus nonsinusoidal dan arus harmonik. Walaupun disuplai oleh tegangan sinusoidal. Contoh jenis beban non-linear adalah peralatan elektronik yang menggunakan bahan semi konduktor seperti dioda, transistor, silicon controller rectifier (SCR), dan lain-lain. Berikut adalah gambar 2.6 yang menunjukkan hubungan antara gelombang tegangan dan arus yang dimiliki beban non-linear:



Gambar 2.6 Resultan beban non-linear

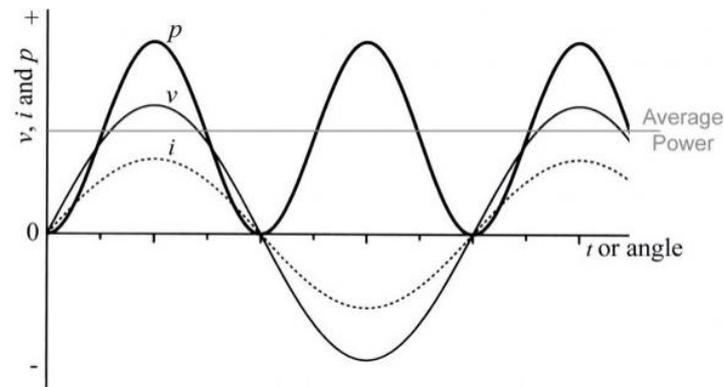
(Sumber: Putra & Ervianto, 2016)

2.2.10. Sifat Beban-Beban Listrik

Dalam sistem listrik arus AC (bolak balik), terdapat 3 sifat beban listrik, yaitu:

2.2.10.1. Beban Resistif

Beban resistif (R) yaitu beban yang terdiri dari komponen tahanan ohm saja (*resistance*). Beban jenis ini hanya mengkonsumsi daya aktif dan memiliki faktor daya sama dengan satu. Contoh dari beban resistif adalah pemanas dan lampu pijar. Berikut adalah gambar 2.7 yang mengilustrasikan gelombang beban resistif:

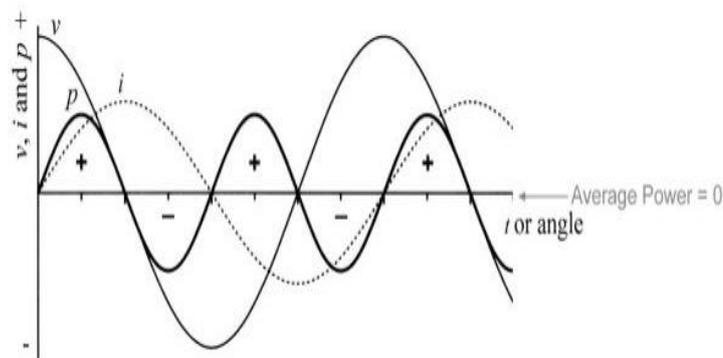


Gambar 2.7 Gelombang listrik AC dengan beban resistif

(Sumber: <https://artikel-teknologi.com/pengertian-beban-resistif-induktif-dan-kapasitif-pada-jaringan-listrik-ac/> diakses tanggal 26 Agustus 2019)

2.2.10.2. Beban Induktif

Beban induktif (L) adalah beban yang terdiri dari kumparan kawat yang dililitkan pada suatu inti besi, seperti *solenoida*, *transformator*, *coil*, dan lain lain. Beban induktif memiliki energi yang tersimpan berupa medan magnetis yang akan mengakibatkan pergeseran fasa (*Phase shift*). Fasa arus akan tertinggal sejauh 90° terhadap tegangan atau dikenal dengan istilah *lagging*. Jenis beban ini menyerap daya aktif dan daya reaktif. Contoh dari beban induktif adalah motor listrik.

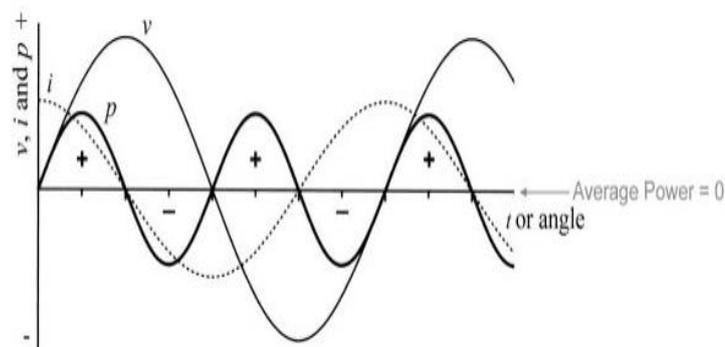


Gambar 2.8 Gelombang listrik AC dengan beban induktif

(Sumber: <https://artikel-teknologi.com/pengertian-beban-resistif-induktif-dan-kapasitif-pada-jaringan-listrik-ac/> diakses tanggal 26 Agustus 2019)

2.2.10.3. Beban Kapasitif

Beban kapasitif (C) adalah beban pada suatu rangkaian listrik yang memiliki kemampuan untuk menyimpan energi yang berasal dari pengisian elektrik (*Electrical discharge*). Beban ini memiliki pergeseran fasa arus yang mendahului tegangan sejauh 90° sehingga disebut leading. Jenis beban ini menyerap daya aktif dan mengeluarkan daya reaktif.



Gambar 2.9 Gelombang listrik AC dengan beban kapasitif

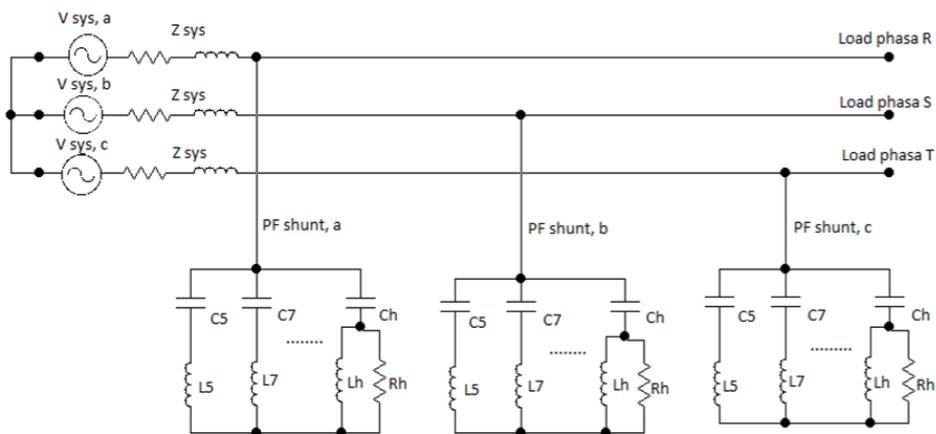
(Sumber: <https://artikel-teknologi.com/pengertian-beban-resistif-induktif-dan-kapasitif-pada-jaringan-listrik-ac/> diakses tanggal 26 Agustus 2019)

2.2.11. Filter

Salah satu cara untuk mengatasi permasalahan harmonik dari beban nonlinear adalah dengan memasang Filter pada sistem distribusi listrik. Filter yang digunakan dalam mengatasi permasalahan harmonik merupakan filter yang dapat menyaring atau memperbaiki frekuensi dari arus dan tegangan, sehingga didapatkan frekuensi yang diinginkan. Filter mampu mengkompensasi harmonik yang berasal dari beban non-linear seperti mengkompensasi arus fundamental, Selain itu juga mampu memperbaiki kualitas dari suplai listrik arus bolak balik seperti *sags*, *swells*, dan *spikes*. Filter biasanya dipasang dekat dengan titik yang terkena distorsi. Ewarld F. Fuchs dan Mohammad A.S. Masoum (2008) mengklasifikasikan jenis-jenis filter yang digunakan pada sistem untuk mereduksi harmonik menjadi filter pasif dan filter aktif.

2.2.11.1. Filter Pasif

Filter pasif adalah filter yang hanya terbuat dari element pasif saja, yaitu induktor (L), Kapasitor (C), dan Resistor (R). Filter pasif digunakan untuk mereduksi amplitudo dari arus dan tegangan serta digunakan untuk memberikan nilai kompensasi terhadap daya reaktif yang hilang akibat adanya harmonik. Dalam perancangan filter ini, haru diketahui dahulu nilai dari daya reaktif. daya reaktif yang dibutuhkan oleh sistem, digunakan untuk menentukan nilai dari kapasitor (C) dan Induktor (L). Pemasangan filter pasif harus berada pada titik yang paling dekat dengan beban non-linear yang menghasilkan harmonik karena filter ini memiliki sifat resonansi paralel yang berimpedansi tinggi sehingga ketika frekuensi yang mengandung harmonik dari beban non-linear akan menuju sumber daya akan dihalangi oleh filter ini. Dalam pemasangannya, filter pasif biasanya ketika akan menyaring harmonik di orde ke-h maka akan ditambahkan pula pada orde terendah sebelum orde ke-h tersebut. Filter ini dalam pemasangan dan pengontrolannya lebih susah dibanding filter aktif, oleh karena itu harga filter pasif lebih murah.

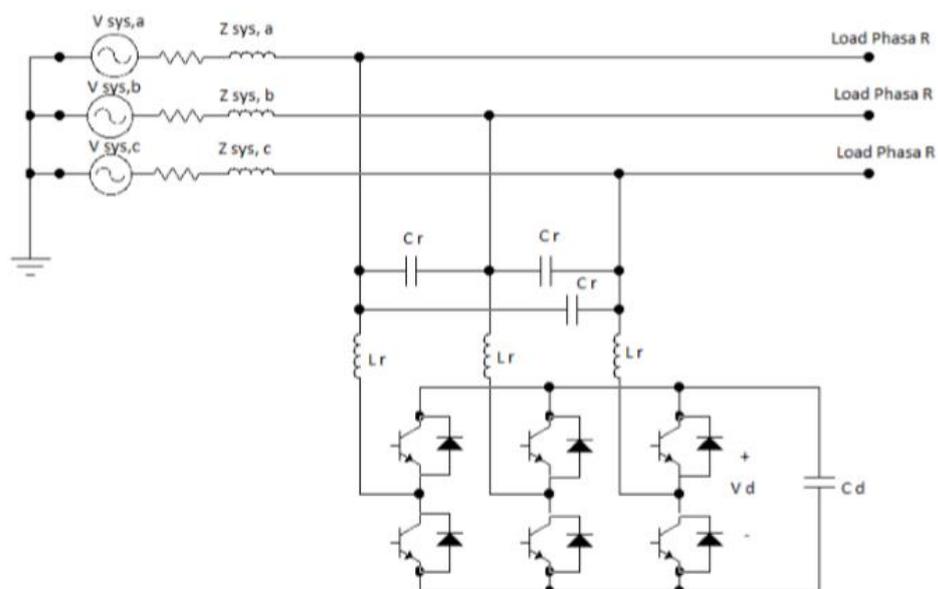


Gambar 2.10 Pemasangan filter pasif pada orde ke-5 dan ke-7 sistem tiga fasa

(Sumber: Nurohman, 2019)

2.2.11.2. Filter Aktif

Filter aktif adalah sebuah filter yang tersusun dari komponen elektronika daya yang rangkaian utamanya adalah inverter dan rangkaian pengontrol, selain itu juga ada kapasitor dan induktor untuk memperbaiki output yang stabil dari filter aktif. Konfigurasi penyusunan filter ini bisa secara seri ataupun paralel. Pada penggunaannya filter aktif digunakan untuk mengkompensasi sebuah rangkaian yang terdistorsi harmonik dari beban non-linear yang berubah ubah. Sebuah filter aktif dapat diimplementasikan ketika harmonik yang terjadi pada sebuah orde berubah. Perubahan harmonik di tiap orde dikarenakan perubahan jumlah beban non-linear yang mengeluarkan arus harmonik berubah tiap beberapa saat. Sehingga filter ini cocok untuk menanggulangi harmonik pada suatu sistem kelistrikan sebuah gedung dengan beban yang tidak stabil. Cara kerja dari filter aktif yaitu dengan menghasilkan harmonisa dari inverter. Harmonisa ini diatur sedemikian rupa oleh rangkaian kontrol elektronika yang berupa PID, limiter, dan komparator sehingga menghasilkan harmonisa yang nilainya sama dengan yang dihasilkan beban tetapi memiliki sudut fasa yang berbeda 180 derajat.



Gambar 2.11 Filter Aktif Shunt pada sistem tiga fasa

(Sumber: Nurohman, 2019)

2.2.12. Perhitungan Nilai Kapasitor dan Induktor

Dalam melakukan kompensasi daya reaktif yang bertujuan untuk memperbaiki nilai faktor daya dan perbaikan harmonik digunakanlah komponen elektronik yang bersifat kapasitif dan induktif. Komponen yang memiliki sifat kapasitif adalah kapasitor sedangkan yang memiliki sifat induktif adalah induktor. Kapasitor merupakan sebuah komponen elektronika yang dapat menyimpan muatan listrik. Struktur dari sebuah kapasitor terbuat dari 2 buah lempengan plat metal yang dipisahkan oleh suatu bahan dielektrik. Bahan dielektrik merupakan bahan isolator yang diletak diantara keping kapasitor, bahan dielektrik yang umumnya digunakan adalah vakum udara, keramik, kaca, kertas dan lain lain. Suatu kapasitor mampu menyimpan muatan elektron dalam level tegangan tertentu, kemampuan tersebut adalah kapasitansi kapasitor. Jika sebuah kapasitor memiliki muatan elektron sebesar 1 coloumb atau sebanding dengan $6,25 \times 10^{-18}$ elektron maka kapasitor tersebut memiliki nilai kapasitansi sebesar 1 Farad pada level tegangan 1 volt.

Induktor merupakan suatu komponen elektronik yang terbuat dari susunan atau lilitan kawat tembaga yang membentuk suatu kumparan. Kumparan tersebut ketika dilewati arus listrik akan menimbulkan medan magnet. Induktor dapat menyimpan energi listrik dalam sebuah kumparan magnet atau yang disebut dengan induktansi. Induktansi memiliki satuan yaitu Henry (H), sedangkan induktor sendiri dilambangkan (L) Berikut adalah rumus-rumus yang digunakan untuk menentukan nilai kapasitor, induktor dan resistor: Untuk menghitung nilai resistor digunakan rumus berikut:

$$R = \frac{V}{I} \quad (15)$$

Untuk menghitung nilai rating daya resistor digunakan rumus berikut:

$$P = V \times I \quad (16)$$

Keterangan :

R = Kapasitas resistor (ohm/ Ω)

V = Tegangan sistem (Volt)

I = Arus harmonisa orde ke-n (A)

P = Kapasistas daya pada resisitor (Watt)

Sedangan untuk mencari nilai Q faktor digunakan rumus sebagai berikut:

$$X_n = X_L = X_C \quad (17)$$

$$Q = \frac{X_n}{R} \quad (18)$$

Maka:
$$X_n = Q \times R \quad (19)$$

Keterangan:

Q = Faktor kualitas filter (30 – 100)

X_C = Reaktansi Kapasitif (ohm/ Ω)

X_L = Reaktansi Induktif (ohm/ Ω)

Untuk mencari nilai Induktor digunakan rumus berikut:

$$X_L = \omega \times L \quad (20)$$

$$L = \frac{X_L}{\omega} \quad (21)$$

Untuk mencari nilai kapasitor adalah:

$$X_C = \frac{1}{\omega \times C} \quad (22)$$

$$C = \frac{1}{\omega \times X_C} \quad (23)$$

Keterangan:

π = Phi 3,14

C = Kapasistansi kapasitor (F)

L = Kapasitansi Induktor (H)

2.2.13. Statistika

Statistika merupakan ilmu pengetahuan yang berhubungan dengan cara-cara pengumpulan dan penyusunan data, pengolahan data, dan penganalisisan data, serta penyajian data berdasarkan kumpulan dan analisis data yang dilakukan. Statistika dapat diartikan menjadi 2 macam yaitu dalam arti sempit dan dalam arti luas. Dalam arti sempit statistik dapat diartikan sebagai data. Sedangkan dalam arti luas statistik dapat diartikan sebagai alat, yaitu alat untuk analisis dan alat untuk membuat keputusan.

Statistik dapat dibedakan menjadi 2, yaitu (Sugiono, 2003):

a. Statistik Deskriptif

Statistik deskriptif merupakan statistik yang digunakan untuk menggambarkan atau menganalisis suatu statistic hasil penelitian, tetapi tidak digunakan untuk membuat kesimpulan yang lebih luas (generalisasi).

b. Statistik Induktif atau Inferensial

Statistik induktif atau inferensial merupakan statistik yang digunakan untuk menganalisis data sampel kemudian diambil kesimpulan, dan hasilnya akan digeneralisasikan untuk populasi dimana sampel itu diambil.

Terdapat 2 macam statistik induktif atau inferensial, yaitu:

1. Statistik parametris atau parametrik

Statistik parametris digunakan untuk menganalisis data interval atau rasio, yang diambil dari populasi yang berdistribusi normal.

Ciri-ciri statistik parametris adalah:

- 1) Data berskala interval atau rasio
- 2) Data tersebar secara normal, data diatas dan dibawah nilai rata-rata relatif seimbang jumlahnya.
- 3) Ukuran sampel cukup besar (>30 atau 5-10% dari jumlah populasi)

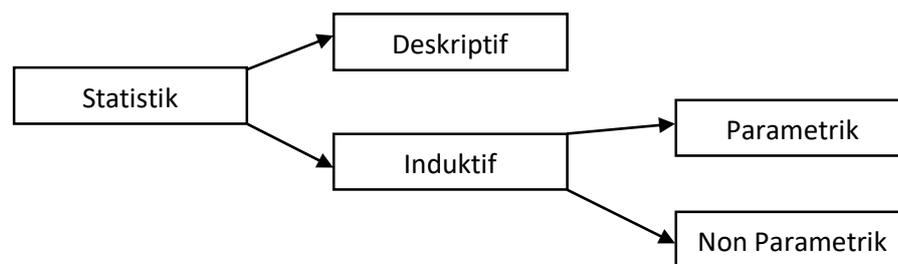
2. Statistik non parametris atau non parametrik

Statistik non parametris digunakan untuk menganalisis data nominal, dan ordinal dari populasi yang bebas distribusi (tidak harus normal).

Ciri-ciri statistik non parametris adalah:

- 1) Data berskala nominal atau ordinal
- 2) Data tidak menyebar secara normal
- 3) Ukuran sampel kecil (<30)

Macam-macam statistik dapat digambarkan sebagai berikut:



Gambar 2.12 Macam-macam statistik
(Sumber: Rahmawati A, dkk, 2019)

2.2.13.1 Jenis-jenis Data

Data merupakan kumpulan angka-angka yang berhubungan dengan observasi. Data dapat dibedakan menjadi:

a. Berdasarkan bentuk data dibedakan menjadi:

1. Data kuantitatif

Data kuantitatif merupakan data yang berupa angka-angka.

Contohnya: Harga beras Rp. 4.200,- per kilo, Nilai statistik 85, dll.

Data kuantitatif dibedakan menjadi 2 yaitu:

1) Data diskrit

Data diskrit merupakan data yang angka-angkanya mutlak, biasanya diperoleh dari hasil menghitung. Contohnya: Jumlah mahasiswa yang mengambil mata kuliah kalkulus ada 40 orang.

Data diskrit sering juga disebut dengan data nominal. Data nominal merupakan data dengan tingkatan paling rendah dalam suatu pengukuran data. Data nominal sering disebut juga data kategori, karena hanya menunjukkan satu-satunya kategori. Misalnya jenis kelamin seseorang, hanya laki-laki atau perempuan dan tidak mungkin berkelamin ganda. Dalam statistic pemberian angka pada data nominal hanyalah suatu proses kategori saja. Contoh: jenis kelamin laki-laki dikategorikan 1 dan perempuan 2. Angka tersebut hanyalah sebagai tanda, tetapi tidak dapat dilakukan operasi matematika seperti $1+2$ atau $1-2$ dan sebagainya.

2) Data kontinu

Data kontinu merupakan data yang angka-angkanya berkesinambungan, dan biasanya diperoleh dari hasil mengukur. Contohnya: Panjang kayu 2,44 meter.

Data kontinu dikelompokkan menjadi 3 yaitu:

a) Data ordinal

Data ordinal merupakan data yang berjenjang atau berbentuk peringkat. Oleh karena itu jarak satu data dengan yang lain mungkin tidak sama. Contohnya: Juara I, II, III; Golongan I, II, III.

b) Data interval

Data interval merupakan data yang jaraknya sama, tetapi tidak mempunyai nilai nol absolut (mutlak). Pada data ini, walaupun datanya nol, tetapi masih mempunyai nilai. Misalnya nol derajat celsius, ternyata masih ada nilainya.

c) Data rasio

Data rasio merupakan data yang jaraknya sama dan mempunyai nilai nol absolut. Jadi kalau datanya nol berarti tidak ada apa-apanya. Bila nol meter maka tidak ada panjangnya, demikian juga bila nol kilogram berarti tidak ada beratnya. Data

ini bias dibuat penjumlahan dan perkalian. Contohnya: 10 meter
+ 24 meter = 34 meter.

2. Data kualitatif

Data kualitatif merupakan data yang tidak berupa angka, tetapi berupa kata, kalimat, atau gambar. Contohnya: Harga beras murah sekali, sungai itu dalam sekali, dll.

b. Berdasarkan teknik pengumpulan data

- 1) Data sampel yaitu data yang diperoleh dari penelitian terhadap sampel.
- 2) Data sensus yaitu data yang diperoleh dari penelitian terhadap populasi.

c. Berdasarkan sumbernya

- 1) Data primer merupakan data yang dikumpulkan oleh peneliti dengan cara langsung dari sumbernya. Untuk memperoleh data primer, peneliti wajib mengumpulkannya secara langsung. Cara yang bias digunakan peneliti untuk mencari data primer yaitu observasi, diskusi terfokus, wawancara serta penyebaran kuisioner.
- 2) Data sekunder merupakan data yang didapat oleh peneliti dari semua sumber yang sudah ada dalam artian peneliti sebagai tangan kedua. Data sekunder bias didapat dari berbagai sumber misalnya biro pusat statistic yang biasanya disingkat dengan BPS, jurnal buku, laporan dan lain sebagainya.