

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Studi Pustaka

Rizkiani dan Mulyono yang sudah melakukan penelitian pada tahun 2012 tentang “Kualitas Daya Listrik di Rumah Sakit Haji Surabaya” dengan menggunakan metode MCDM-PROMETHEE mendapatkan kesimpulan bahwa nilai IKE 17.468 kWh/m²/bulan dengan standar yang berlaku cost perpasien 29,263 kWh/pasien. Untuk melakukan penghematan listrik pada penelitian tersebut maka dilakukan perubahan SOP di Rumah Sakit Haji Surabaya dan penerapan teknologi hemat listrik.

Ronilaya, Ferdian yang melakukan penelitian pada tahun 2007 tentang “Penilaian Kualitas Daya Sistem Kelistrikan PT SAI-PASURUAN”, dengan metode studi literatur tentang teori kualitas daya. Dalam penelitian tersebut beliau mengatakan Layanan keandalan dan kualitas daya sistem tenaga saat ini menjadi populer di industri karena energi biaya alasannya, tidak terkecuali untuk PT SAI. Perusahaan ini memanfaatkan proses unit kontrol untuk menghasilkan aluminium foil. Tujuan dari ini penelitian mengidentifikasi dan menganalisis kualitas daya PT SAI dan kemudian menemukan solusi yang tepat dan ekonomis untuk memadamkan sumber kualitas daya yang buruk. Setelah kami mengidentifikasi, kami menyimpulkan bahwa 65% beban adalah motor AC, 25% dari Motor DC, 8% pemanas dan 2% petir. Untuk tegangan berlebih dan di bawah tegangan, mengacu pada standar IEEE 519 - 1995, PT SAI memiliki 99% tegangan nominal. Tetapi untuk tegangan tidak seimbang, mengacu pada standar NEMA MG-1-1993, PT SAI miliki 1.22%. Untuk THD tegangan, PT SAI memiliki 1.98%. Namun untuk THD saat ini, PT SAI memiliki 34.47%. Saat memuat trafo antara 0.47% - 29.7%.

Sugiarto, Hadi (2011) dengan judul “Kajian Harmonisa Arus dan Tegangan Listrik di Gedung Administrasi Politeknik Negri Pontianak”. Dalam penelitian tersebut beliau mengatakan bahwa, harmonisa adalah gangguan yang terjadi pada sistem distribusi tenaga listrik akibat terjadinya distorsi gelombang arus dan tegangan. Distorsi gelombang arus dan tegangan ini disebabkan adanya pembentukan gelombang-gelombang dengan frekuensi kelipatan bulat dari frekuensi fundamentalnya. Gelombang-gelombang ini kemudian menumpang pada gelombang aslinya sehingga terbentuk gelombang cacat yang merupakan jumlah antara gelombang murni sesaat dengan gelombang harmoniknya. Sehingga bentuk gelombang tegangan dan arus tidak sinusoidal murni lagi. Beban-beban non linier adalah sebagai penyumbang harmonisa yang terjadi antara lain: static power converter (rectifiers atau inverters), pengisi baterai (bateray chargers), electronic ballast, variable frequency, electric arc furnace, thyristor ac power controllers, thyristor-controlled reactor (TCR), silicon controlled rectifier (SCR), dan adjustable speed drive (ASD). Akibat dari harmonik yang terjadi adalah komponen-komponen peralatan dalam sistem akan mengalami penurunan kinerja dan bahkan akan mengalami kerusakan. Salah satu dampak yang umum dari gangguan harmonisa adalah panas lebih pada kawat netral, menimbulkan rugi-rugi pada sistem dan transformator serta dapat menghasilkan arus netral yang lebih tinggi dari arus phase. Hasil penelitian menunjukkan bahwa di gedung Administrasi POLNEP terjadi harmonisa arus dan tegangan. Harmonisa arus yang terjadi sebesar 2.7% dan harmonisa tegangan sebesar 10,6 masih dibawah standar yang diperbolehkan. Namun beban terdistribusi tidak merata pada masing-masing fasa sehingga menimbulkan arus netral yang cukup besar yaitu melebihi arus fasa terendah (fasa R) dan menyebabkan rugi daya pada kawat netral.

Suhendar dkk (2013) melakukan penelitian kualitas daya energy listrik dengan judul Intentional Konsumsi Energi pada Gedung RSUD Cilegon. Dari penelitian yang telah dilakukan mendapatkan hasil kualitas daya energi listrik yang sangat efisiensi

dengan Intentias Konsumsi Energi sebesar 101,62 kWh/m² pertahun dengan standart yang telah ditetapkan oleh ASEAN_USAID sebesar 380 kWh/m².

Yadi Mulyadi, Sumarto dan Angga Rizki (2013) Pada penelitian Kualitas Daya Listrik dengan judul Analisis Audit Energi untuk Pencapaian Effisiensi Penggunaan Energi di Gedung FPMIPA JICA Universitas Pendidikan. Mendapatkan hasil kesimpulan bahwa kualitas daya listrik di gedung FPMIPA JICA Universitas Pendidikan Indonesia sangat effisiensi dengan pengaplikasian rekomendasi peluang penghemat energy dimungkinkan adanya penurunan rugi-rugi daya yang ditimbulkan oleh *power losses*.

2.2 Landasan Teori

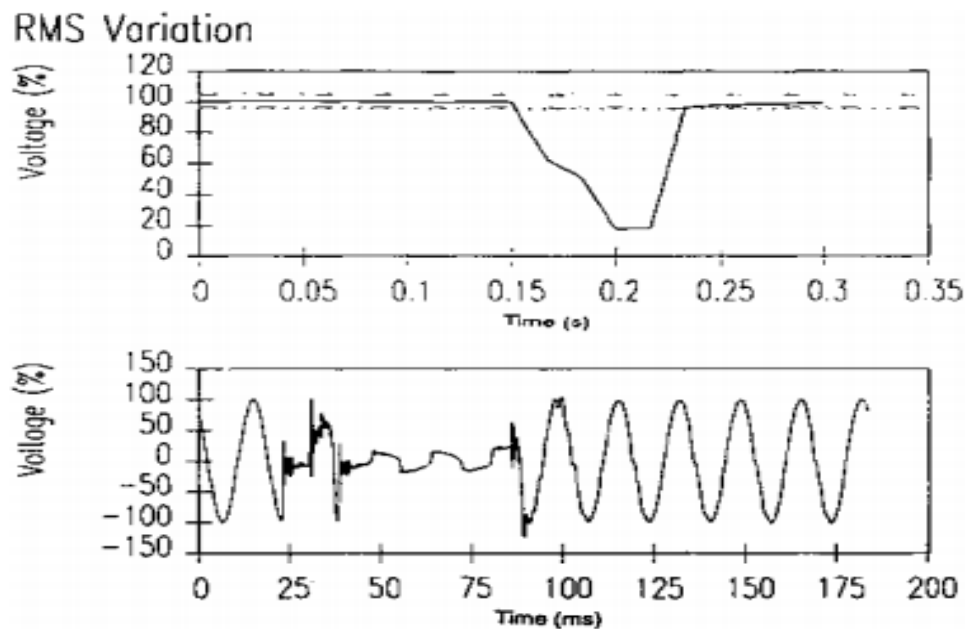
2.2.1 Kualitas Daya listrik (*Power Quality*)

Kualitas daya listrik merupakan suatu gambaran mengenai kondisi mutu dari daya listrik akibat dari gangguan-gangguan yang terjadi di bidang kelistrikan, kualitas listrik sendiri memiliki arti daya listrik yang berbentuk perubahan terhadap arus, tegangan dan frekuensi dimana perubahan tersebut menyebabkan kesalahan dalam operasi pada peralatan-peralatan kelistrikan.

Pentingnya masalah kualitas daya listrik (*power quality*) karena:

1. Kualitas peralatan yang dimiliki konsumen daya listrik lebih sensitive.
2. Pada system utilitas terjadi peningkatan level harmonic.
3. Banyaknya konnsumen daya listrik yang belum memiliki informasi yang cukup tentang kualitas daya listrik (*power quality*).
4. Kegagalan komponen pada system distribusi dan instalasi yang dapat menyebabkan kerusakan komponen tertentu.

Kualitas daya listrik dituntut oleh masing-masing peralatan berbeda antara peralatan satu dengan peralatan lainnya. Persoalan kualitas daya listrik (*power quality*) yang terjadi meliputi *SWELL & SAG* seperti gambar berikut:



Gambar 2.1 SWELL & SAG

(<http://repository.usu.ac.id/bitstream/handle/123456789/59298/Chapter%20II.pdf?sequence=3&isAllowed=y>)

2.2.2 Permasalahan Yang Terjadi Pada Kualitas Daya Listrik (*Power Quality*)

Perubahan yang terjadi pada arus, tegangan dan frekuensi dapat menimbulkan kegagalan pada system operasi dan peralatan-peralatan kelistrikan, berikut adalah beberapa permasalahan yang terjadi pada perubahan tersebut:

1. *Power Surges*

Power Surges yaitu naiknya pasokan daya yang terjadi secara tiba-tiba pada suatu beban. Terjadinya peristiwa seperti ini disebabkan oleh penggunaan alat listrik yang menggunakan daya besar secara spontan lepas dari jaringan.

2. *Voltage Sag*

Kejadian ini merupakan kebalikan dari *Power Sag* berupa penurunan tegangan yang tiba-tiba. Peristiwa ini terjadi karna jaringan ataupun peralatan yang membutuhkan arus awal besar ker jaringan.

3. *Under Voltage*

Under Voltage merupakan peristiwa penurunan tegangan yang terjadi secara berkepanjangan sehingga mengakibatkan pemanasan yang berlebih pada motor.

4. *Brownouts*

Brownouts terjadi akibat penurunan pasokan daya pada tegangan yang lebih rendah dari tegangan normal. Hal ini terjadi akibat permintaan pasokan daya tidak memenuhi dan tetap beroperasi pada tegangan yang lebih rendah untuk membatasi daya maksimum.

5. *Blackout*

Peristiwa ini terjadi karena tegangan nol yang berlangsung lebih dari 2menit yang berpusat di sisi jaringan seperti *circuit breaker* dalam keadaan *trip*.

6. *Transient* atau Interupsi

Interupsi pasokan daya terdapat arus hilang sama sekali untuk beberapa waktu.

7. *High-Voltages Spikes*

Merupakan suatu peristiwa naiknya tegangan secara tiba-tiba dalam kurun waktu yang sangat pendek.

8. *Frequency Variation*

Frekuensi yang menyimpang dari standart 50Hz terjadi akibat generator yang tidak stabil.

9. *Electrical Line Noise*

Keadaan yang mempengaruhi Radio Frequency Interface (RFI) dan Electromagnetic Interface (EMI) pada jaringan.

10. *Voltage Imbalance*

Fenomena ketidak seimbangan tegangan yang terjadi akibat ketidaksamaan sudut fasa setiap tegangan.

2.2.3 Besaran Kualitas Daya Listrik

Terdapat 3 istilah tentang besaran listrik yang biasanya digunakan dalam teknik tenaga listrik, yaitu beda potensial atau tegangan listrik, arus listrik dan frekuensi yang merupakan satuan pokok pembahasan masalah-masalah system ketenagaan listrik.

A. Beda Potensial atau Tegangan (*Voltase*)

Ketika suatu muatan listrik positif mengalami perpindahan lintasan dalam medan listrik, maka energy potensial elektrostatisnya adalah:

$$W = -q \int E \, dl \dots\dots\dots (2.1)$$

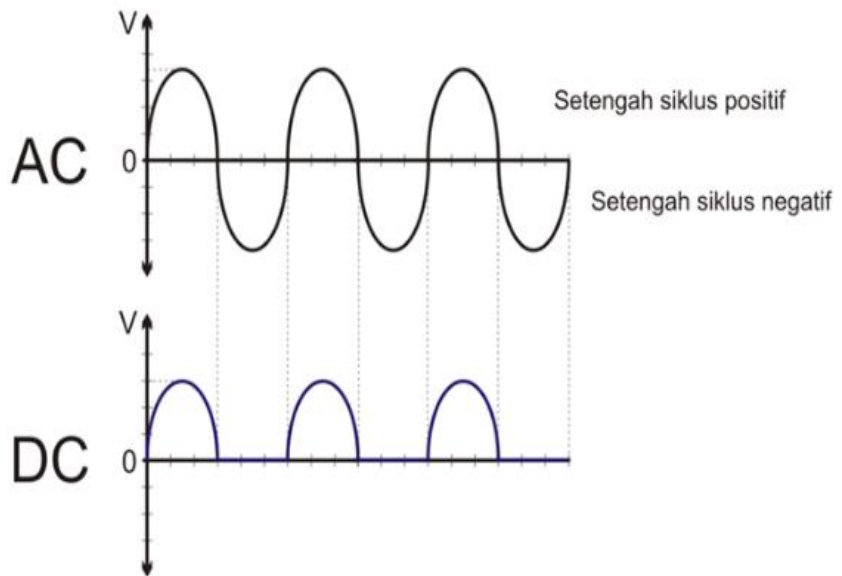
Beda potensial V sebagai kerja (sumber dari luar) yang digunakan untuk memindahkan muatan listrik positif dari satu titik ke titik yang lain adalah perubahan potensi energy potensial listrik yang sebanding dengan muatan listriknya:

$$V = \frac{w}{q} = -\int_{awal}^{akhir} E \, dl \dots\dots\dots (2.2)$$

Beda potensial biasanya dinyatakan dalam satuan Joule per Colomb yang didefinisikan sebagai volt, sehingga beda potensial sering juga disebut *voltase* atau tegangan.

Tegangan dibedakan menjadi 2 jenis, yaitu:

1. Tegangan AC, yaitu tegangan bolak-balik. AC merupakan *Alternating Current*.
2. Tegangan DC, yaitu tegangan searah. DC merupakan *Direct Current*.



Gambar 2.2 Rangkaian AC dan DC

Tegangan listrik memiliki persamaan sebagai berikut:

$$V = I \times R \dots\dots\dots (2.3)$$

Dengan keterangan:

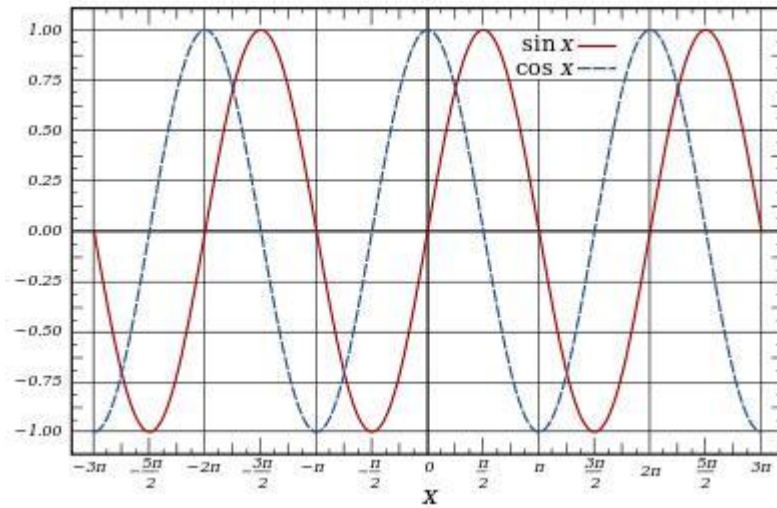
V = Tegangan (*voltz*)

I = Arus (*amphere*)

R = Hambatan (*ohm*)

B. Frekuensi (*Frequency*)

Frekuensi merupakan tegangan dan arus listrik yang digunakan pada system kelistrikan secara bolak-balik berbentuk sinusoidal.



Gambar 2.3 Gelombang Sinusoidal

Menurut *Jerman Heinrich Rudolf Hertz* frekuensi merupakan suatu ukuran yang jumlah putaran ulang peristiwanya dalam rentang waktu yang diberikan dengan satuan Hz. Dengan rumus seperti berikut ini:

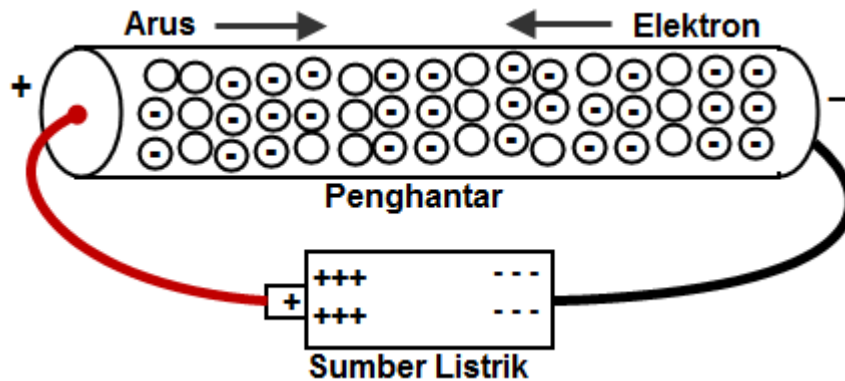
$$f = \frac{1}{T} ; f = \frac{n}{t} \dots\dots\dots (2.4)$$

dimana:

- f = Frekuensi
- T = Periode (detik)
- n = Jumlah getaran
- t = Waktu

C. Arus Listrik (*Electric Current*)

Muatan listrik yang mengalir melalui media konduktor dalam tiap satuan waktu disebut arus listrik (*electric current*). Muatan listrik yang dibawa oleh electron dan proton dalam sebuah atom dimana proton hanya bergerak dalam inti atom.

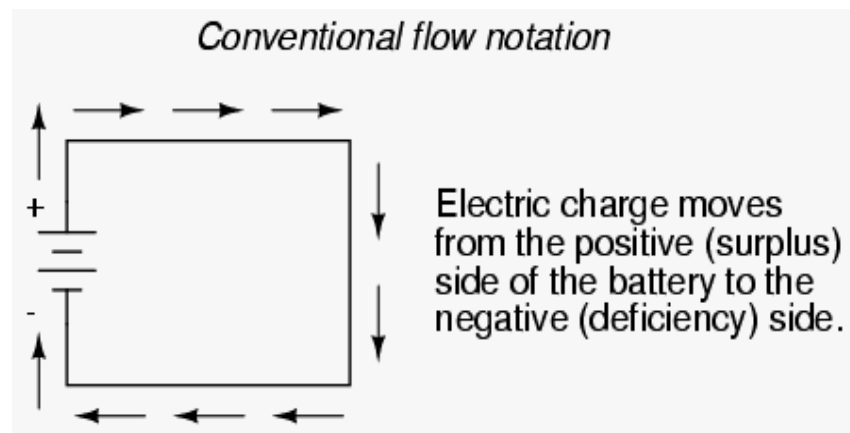


Gambar 2.4 perpindahan arus dari atom 1 ke atom lain
 (<http://repository.uinjkt.ac.id/dspace/bitstream/123456789/38194/1/Nur%20Amalia%20Hasti-FITK>)

Terdapat 2 teori tentang aliran arus listrik yaitu:

1. Aliran arus listrik konvensional (*conventional current flow*)

Secara konvensional aliran listrik dalam suatu rangkaian elektronika mengalir dari muatan positif (+) ke muatan negatif (-) ataupun potensial tinggi ke potensial yang rendah.



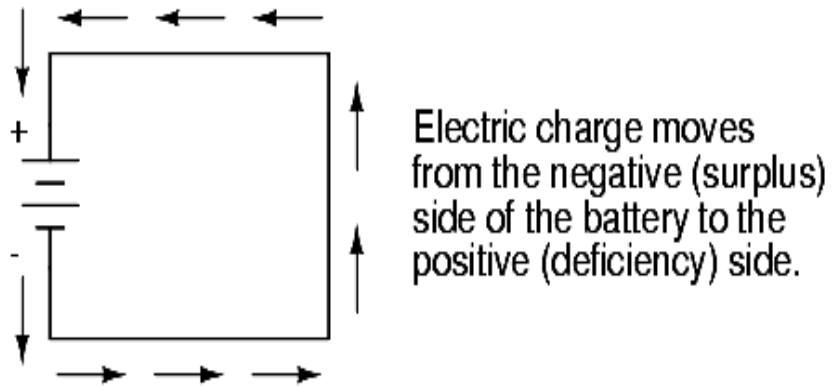
Gambar 2.5 Aliran arus listrik konvensional
 (<https://repository.unikom.ac.id/35790/1/Arus%2C%20Tegangan%2C%20Resistansi%2CDaya%20Listrik.ppt>)

2. Aliran arus electron (*electron flow*)

Arus electron ini berkebalikan dengan arus listrik konvensional, dimana aliran arus electron dalam suatu rangkaian elektronika tidak mengalir

dari muatan positif (+) ke negative (-), melainkan dari muatan negative (-) ke muatan positif (+).

Electron flow notation



Gambar 2.6 Aliran arus electron
 (<https://repository.unikom.ac.id/35790/1/Arus%20Tegangan%20Resistansi%2CDaya%20Listrik.ppt>)

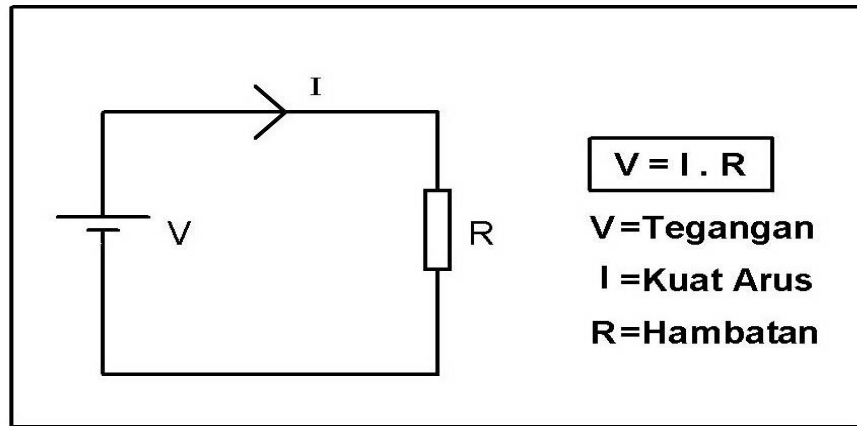
Arus listrik terbagi menjadi dua, yaitu:

- a. Kuat arus listrik, yang merupakan muatan listrik mengalir dari potensial tinggi ke potensial rendah dan diberi symbol A dengan satuan *Ampheere*. Persamaan mengenai kuat arus listrik dapat lihat dipenjas berikut:

$$I = \frac{q}{t} \quad \text{atau} \quad q = I \times t \quad \dots\dots\dots (2.5)$$

Dengan keterangan:

- I = Kuat arus listrik (amphere)
- q = Muatan listrik yang mengalir (coloumb)
- t = Waktu (second)



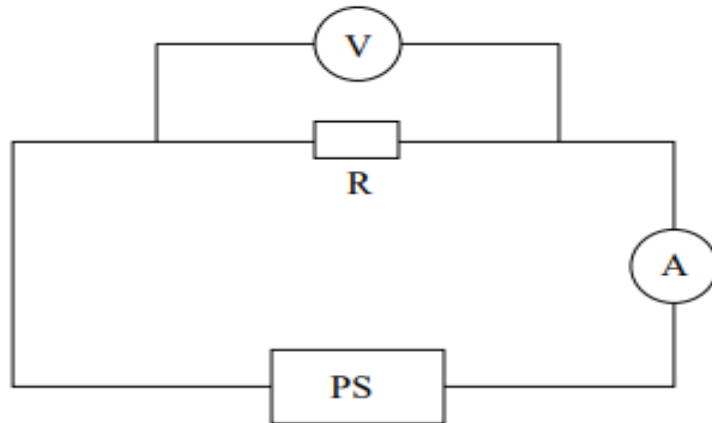
Gambar 2.7 Rangkaian sederhana kuat arus listrik

- b. Hambatan listrik, yang merupakan perbandingan antara tegangan listrik dengan komponen elektromagnetik yang dilalui oleh arus listrik.

$$R = \frac{v}{I} \dots\dots\dots (2.6)$$

Dengan keterangan sebagai berikut:

- R = Hambatan (*ohm*)
V = Tegangan (*voltz*)
I = Arus (*amphere*)

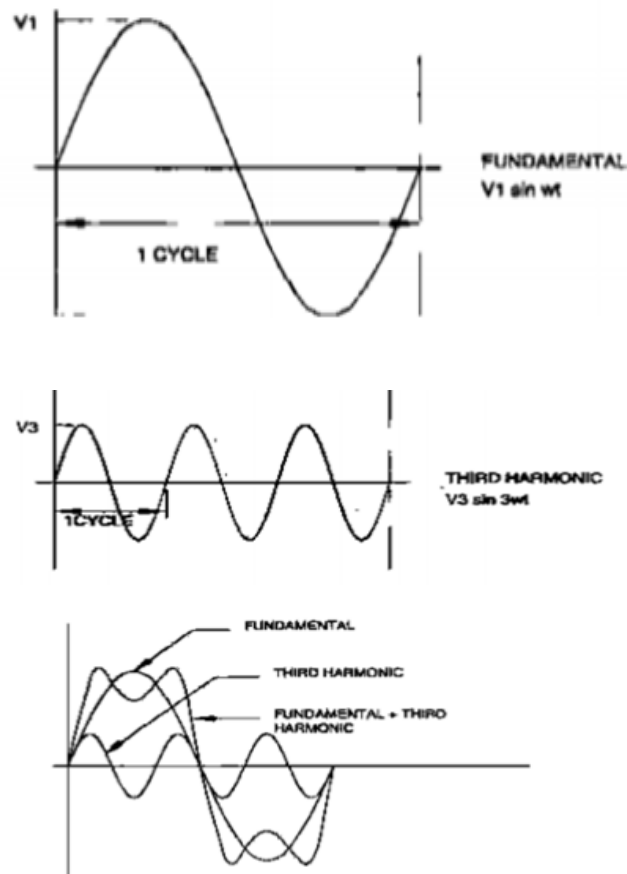


Gambar 2.8 Hambatan arus listrik

(http://file.upi.edu/Direktori/FPMIPA/JUR. PEND. FISIKA/195801071986031-SUTRISNO/Perkuliahan/Bahan_ajar/Modul_AKBID/Modul_Hambatan_Listrik.pdf)

2.2.4 Harmonik

Harmonik merupakan gelombang terdistorsi secara periodik yang terjadi pada gelombang tegangan, arus, atau daya yang terdiri dari gelombang-gelombang sinus yang frekuensinya merupakan kelipatan dari frekuensi dasarnya seperti (100Hz, 150Hz, 200Hz, dan seterusnya) sehingga bentuknya tidak sinusoidal.



Gambar 2.9 gelombang harmonisa terdistorsi
(<http://repository.usu.ac.id/bitstream/handle/123456789/64771/Chapter%20II.pdf?sequence=4&isAllowed=y>)

Tingkat harmonik 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 computer (personal computer). Selain itu juga dapat menyebabkan berkurangnya life time pada peralatan elektronik.

Hubungan frekuensi harmonic dan fundamental dapat ditulis sebagai berikut:

$$f_h = n f \dots\dots\dots (2.7)$$

Dimana:

f_h adalah frekuensi harmonik

n adalah kelipatan gelombang (bilangan bulat)

f_i adalah frekuensi fundamental

Gelombang harmonik ini akan menumpang pada gelombang fundamental sehingga akan membentuk gelombang yang terdisrosi. Hal ini disebabkan efek dari penjumlahan gelombang harmonisa dengan gelombang fundamental. Gelombang harmonisa ini dapat dijabarkan pada deret fourier berikut:

$$f(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{h=1}^{\infty} \{a_h \cos(h\omega t) + b_h \sin(h\omega t)\} \dots\dots\dots (2.8)$$

Dengan:

$$a_0 = \frac{1}{T} \int_0^T f(t) dt \dots\dots\dots (2.9)$$

$$a_h = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \cos(h\omega t) dt \dots\dots\dots (2.10)$$

$$b_h = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \sin(h\omega t) dt \dots\dots\dots (2.11)$$

Dimana a_0 adalah komponen DC, sedangkan a_h dan b_h adalah komponen AC.

Peran harmonisa pada system tenaga listrik cukup besar, terutama pada alat-alat yang terdapat pada system tenaga. Harmonisa akan menimbulkan beberapa dampak seperti panas berlebih pada generator dan transformator karena kecenderungan harmonisa mengalir ke tempat dengan impedansi yang lebih rendah.

Daftar table 2.1 standar distorsi tegangan harmonisa dalam % Nilai Fundamental
Yang digunakan berdasarkan standart IEEE
(<http://www.ristinet.com/index.php?ch=8&lang=&n=354&page=2>)

Distorsi Tegangan Harmonik dalam % Nilai Fundamental			
Sistem Tegangan	< 69 kV	69-138 kV	> 138 kV
T H D	5.0	2.5	1.5

2.2.4.1 Istilah Tentang Harmonisa

Berikut adalah beberapa persamaan serta penjelasan yang dapat dianalisis tentang harmonisa.

A. Komponen Harmonik

Komponen harmonisa yaitu gelombang sinusoidal yang mempunyai frekuensi perkalian bilangan bulat dengan frekuensi dasar.

B. Orde Harmonik

Perbandingan frekuensi harmonisa dengan frekuensi dasar yang dapat didefinisikan sebagai persamaan berikut:

$$n = \frac{fn}{F} \dots\dots\dots (2.12)$$

Dimana:

n = Orde Harmonisa

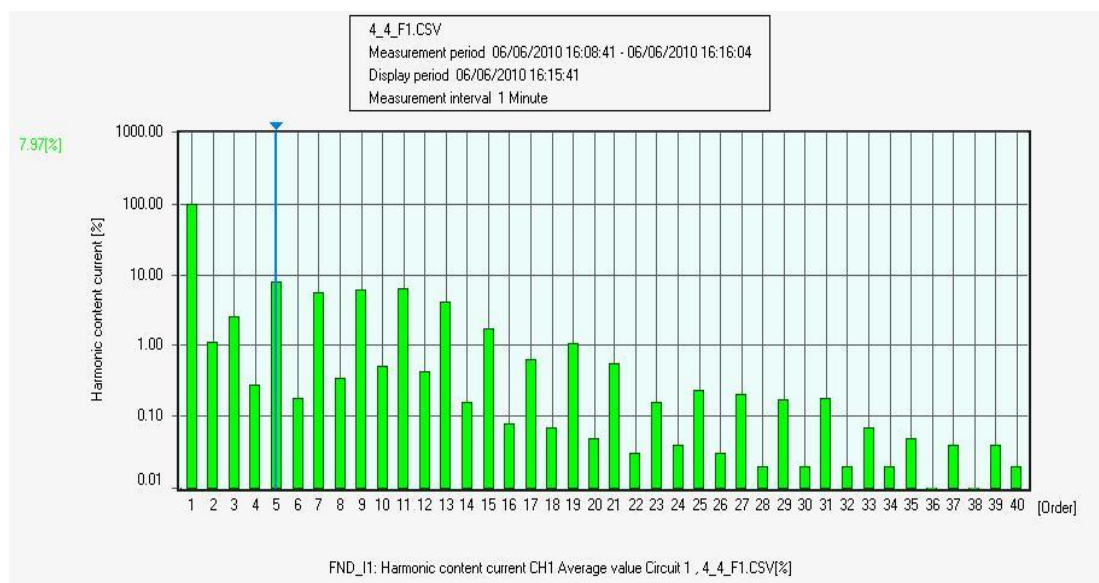
f_n = Frekuensi Harmonisa ke- n

F = Frekuensi dasar

Gelombang Frekuensi harmonisa dimulai dari orde ke-2 hingga n , sedangkan gelombang dasar tidak termasuk dalam orde harmonisa.

C. Spektrum

Spektrum merupakan distribusi semua amplitudo komponen harmonisa sebagai fungsi orde harmonisa dan diilustrasikan menggunakan histogram.



Gambar 2.10 gambar spectrum harmonisa menggunakan histogram (<https://docplayer.info/47839663-Studi-pengaruh-korona-pada-kubikel-model-terhadap-distorsi-harmonisa-arus-dan-tegangan-sumber-listrik-ac-skripsi.html>)

D. Total Harmonic Distortion (THD)

Total Harmonic Distortion (THD) merupakan distorsi yang ditimbulkan oleh semua komponen harmonisa dan difenisikan sebagai persamaan berikut:

$$\text{THD} = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{n=\infty} M_n^2}}{M_1} \dots\dots\dots (2.13)$$

Dimana:

THD = *Total Harmonic Distortion*

M_n = Nilai *rms* arus atau tegangan harmonisa ke- n

M_1 = Nilai *rms* arus atau tegangan pada frekuensi dasar

D. *Total Demand Distortion* (TDD)

Tingkat distorsi harmonisa bias dihitung dengan persamaan nilai THD namun ada beberapa hal yang membuat hitungan tersebut salah saat diinterpretasikan. Arus yang kecil memiliki nilai THD yang tinggi tetapi tidak menjadi satu alasan kegagalan operasi ataupun kerusakan pada alat kelistrikan. Untuk memperkecil kesalahan perhitungan THD dilakukannya analisis arus beban puncak frekuensi dasar sehingga didapatkannya persamaan TDD (*total demand distortion*) yang masuk dalam daftar IEE 519-1992, tentang “*Recommended Practices and Recuirements for Harmonic Control in Electrical Power System*”.

TDD dapat didefenisikan melalui persamaan sebagai berikut:

$$\text{TDD} = \sqrt{\frac{\sum_{n=2}^{h \max} I_n^2}{I_L}} \dots\dots\dots (2.14)$$

Dimana:

TDD = Total Demand Distorsi

I_n = Arus harmonisa orde ke- n

I_L = Arus beban puncak pada frekuensi dasar

E. Nilai *rms*

Tegangan harmonik dapat diketahui dengan menggunakan persamaan berikut:

$$r_{ms} = \sqrt{\sum_{h=1}^{h_{max}} M_h^2} = M_1 \sqrt{1} THD^2 \dots\dots\dots (2.15)$$

dimana:

M_h = Nilai *rms* arus atau tegangan ke-h

F. Standar Yang Ditetapkan IEEE Untuk Harmonisa Arus dan Tegangan

Harmonisa arus dan harmonisa tegangan telah ditetapkan standar internasional untuk menjaga batasan-batasan yang dapat dianggap aman pada perhitungan suatu rangkaian.

Table 2.2 Batasan untuk harmonisa arus IEEE

$I_E < I_t$	$h < 11$	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 28$	$28 \leq h < 35$	$35 \leq h$	TDD
$v \leq 69 \text{ kV}$						
<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
$69 \text{ kV} < v \leq 161 \text{ kV}$						
<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
500<100	5.0	2.25	2.0	0.75	0.35	6.0
100<1000	6.0	2.75	2.5	1.0	0.5	7.5
>1000	7.5	3.5	3.0	1.25	0.7	10.0
$v > 161 \text{ kV}$						
<50	2.0	1.0	0.75	0.3	0.15	2.5
≥ 50	3.5	1.75	1.25	0.45	0.22	3.75

Table 2.3 Batasan untuk harmonisa tegangan IEEE

Bus Voltage at PCC	Individual Voltage Distortion (%)	Total Voltage Distortion THD (%)
69 kV and below	3.0	5.0
>69 kV ≤161 kV	1.5	3.5
>161 kV	1.0	1.5

Table 2.4 Ketidak seimbangan beban menurut standar IEEE

Parameter	Maksimum
Regulasi keadaan	+5%, -10% s/d 10%, -15%
Gangguan tegangan drop	-25% s/d 30% tidak lebih dari 0.5s
Tegangan sementara	-100% dengan lama 4ms s/d 20ms
Tegangan lebih transient	+150% s/d 200% tidak lebih dari 0.2ms
Distorsi tegangan harmonic	3-5% (beban linier)
Noise	Tidak ada standar
Variasi frekuensi	50Hz ± 0.5Hz s/d 1Hz
Perubahan frekuensi	1Hz
Ketidakseimbangan beban	5% s/d 20% (pada tiap fasa)
Ketidakseimbangan tegangan	2.5% s/d 5%
Factor daya	0.18 s/d 0.9
Kapasitas beban	0.75 s/d 0.85 (beban terpasang)

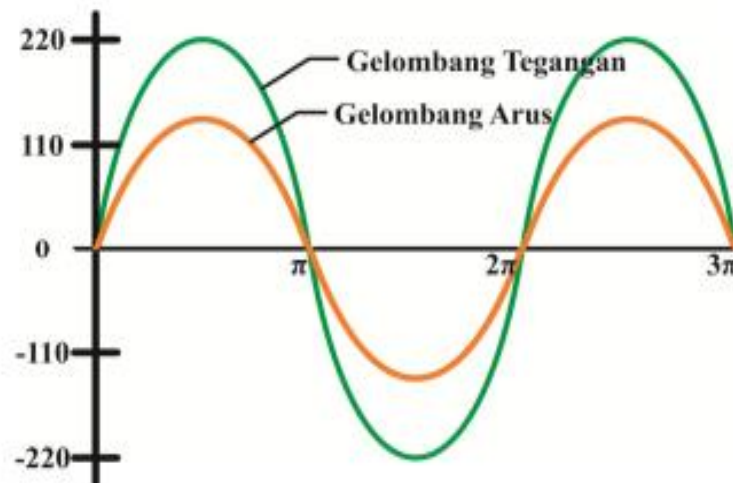
2.2.4.2 Penyebab Terjadinya Harmonik

Harmonik terjadi akibat adanya pemakaian beban *linier* dan beban *non-linier*, sehingga menimbulkan pengaruh yang buruk untuk komponen-komponen rangkaian listrik bahkan dapat menyebabkan dampak negative terhadap lingkungan seperti *noisemekanik dan interferensi* terhadap system telekomunikasi.

Penyebab terjadinya harmonisa secara garis besar yaitu peralatan yang memiliki kondisi saturasi dan peralatan elektronika daya. Peralatan yang memiliki kondisi saturasi bersifat magnetik seperti mesin-mesin listrik, transformator, power supply, dan magnetic ballast. Pada peralatan elektronika daya yang menggunakan komponen-komponen elektronika daya seperti converter static, inverter, dan sebagainya. Peralatan rumah tangga sebagian besar termasuk beban *non-linier* seperti kipas angin, *Air Conditioner*, televisi, computer, dan lain-lain.

2.2.4.2.1 Beban *Linier*

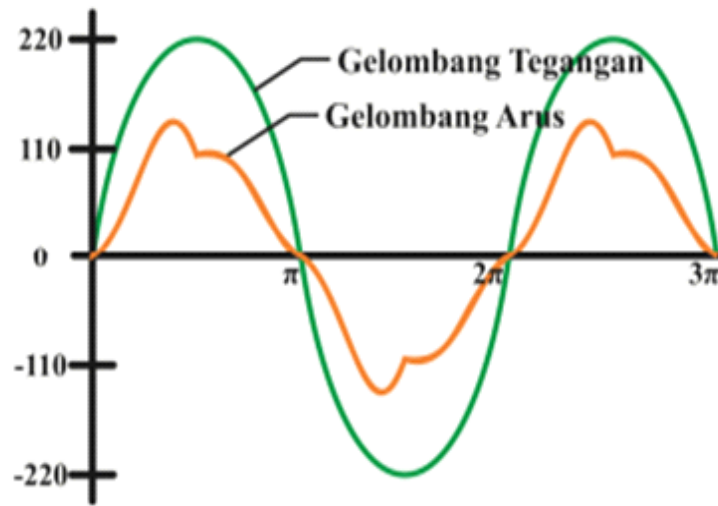
Beban linier merupakan beban yang memberikan bentuk gelombang keluaran yang linier artinya arus yang mengalir sebanding dengan impedansi dan perubahan tegangan.



Gambar 2.11 Gelombang Pembebanan *Linier*

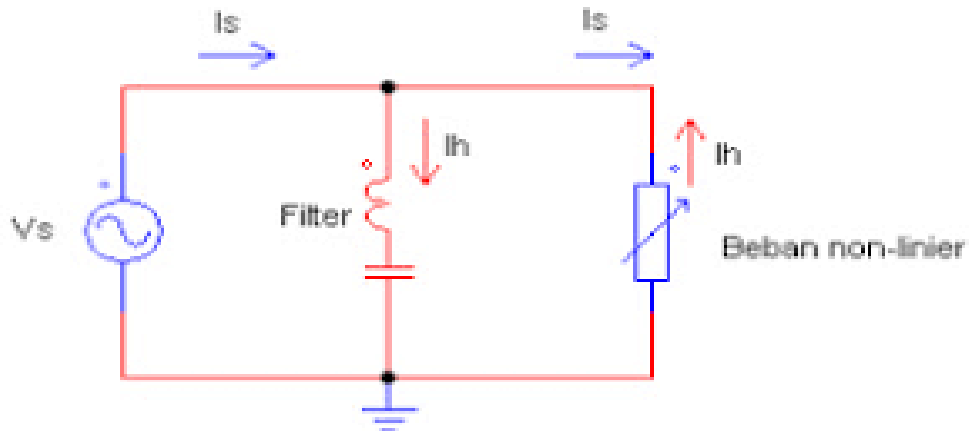
2.2.4.2.2 Beban *Non-Linier*

Beban non linier adalah bentuk gelombang yang keluarannya tidak sebanding dengan tegangan dalam setiap setengan siklus, sehingga bentuk gelombang arus maupun tegangan keluarannya tidak sama dengan gelombang masukannya.



Gambar 2.12 Gelombang Pembebanan *Non-Linier*

Pembebanan beban *non-linear* dimodelkan seperti pada gambar berikut:



Gambar 2.13 pemodelan beban *non-linier* model gelombang dasar
https://simdos.unud.ac.id/uploads/file_penelitian_1_dir/061a20cbed4be4f6d2a947e3c9734216.pdf

2.2.4.3 Rugi-Rugi Daya (*Power Losses*) Akibat Ketidak Seimbangan Beban

Menghitung rugi-rugi daya (*power losses*) setiap fasa di panel SDV pusat dan MVDP dapat menggunakan persamaan berikut:

$$\Delta P_R = \sum_{k=1}^{25} 0.524 \times I k_R^2 \dots\dots\dots (2.16)$$

$$I_{N1} = \sqrt{\frac{IR1^2 + IS1^2 + IT1^2 - (IR1 \times IS1) - (IS1 \times IT1) - (IR1 \times IT1)}{}} \dots\dots\dots (2.17)$$