

BAB II

DASAR TEORI

2.1 Tinjauan Pustaka

Fahrurozi, Firdaus, Feranita (2014) melakukan analisa ketidakseimbangan beban terhadap arus netral dan *losses* pada transformator distribusi di gedung Fakultas Teknik Universitas Riau dan dipatkan hasil Persentase ketidakseimbangan pembebanan terbesar terjadi saat pengukuran di hari libur nasional 15/05/2014 yaitu mencapai 39,39% pada pukul 07:00 Wib. Persentase keseimbangan pembebanan terbaik terjadi saat hari senen perkuliahan 12/05/2014 yaitu 3,77% pada pukul 13:00 Wib. *losses* akibat arus netral terbesar terjadi saat pengukuran di hari libur nasional 15/05/2014 yaitu mencapai 0,45% pada pukul 07:00 Wib. Persentase *losses* akibat arus netral terbaik terjadi saat pengukuran di hari minggu 11/05/2014 yaitu 0,001% pada pukul 04:00 Wib. Ketidakseimbangan pembebanan terjadi karena pembebanan pada tiap fasa yang tidak merata, sebab waktu penggunaan listrik yang tidak bersamaan. sementara persentase *losses* akibat arus netral terbaik terjadi saat pengukuran di hari minggu 11/05/2014 yaitu 0,001% pada pukul 04:00 Wib.

Tri novita sari (2017) melakukan audit energi untuk efisiensi listrik di blok A gedung keuangan negara Yogyakarta didapatkan hasil dari penelitian ini menunjukkan bahwa kondisi kualitas daya listrik pada blok A gedung keuangan negara Yogyakarta secara umum dalam kondisi yang kurang baik. Kondisi tersebut meliputi rendahnya nilai faktor daya, *unbalanced load* (ketidakseimbangan arus), dan harmonisa. Ketidakseimbangan arus pada gedung tersebut mencapai 52,90% pada panel SDP dan 103,58% pada panel SDP AC. Sedangkan kondisi harmonisa arus pada panel SDP AC baik, namun pada SDP kurang baik karena melebihi batas toleransi standar IEE No. 519-1992 sebesar 15%. Adanya ketidakseimbangan beban dan harmonisa mengakibatkan kerugian *power losses* yang harus ditanggung oleh GKN sebesar Rp30.646.667,52 setiap

tahunnya. Selain itu, untuk tingkat pencahayaan dan pendingin ruangan hasilnya belum memenuhi standar.

Tamammul Abrar (2017) melakukan analisis ketidakseimbangan beban dan rencana penyeimbangan beban dengan metode “*All Reconnecting*” di gardu distribusi PT. PLN (Persero) cabang flores bagian barat didapatkan hasil *losses* akibat adanya arus netral pada penghantar netral trafo dan *losses* akibat arus netral yang mengalir ke tanah. persentase ketidakseimbangan pada gardu distribusi MR 001 sebelumnya adalah 32% (WLBP) dan 21,63% (WBP) tetapi setelah dilakukan rencana penyeimbangan beban persentasenya menjadi 4% untuk (WLBP) dan 4% juga untuk (WBP). Setelah dianalisis, diperoleh bahwa bila terjadi ketidakseimbangan beban yang besar, maka arus netral yang muncul juga besar, dan *losses* akibat arus netral yang mengalir ke tanah semakin besar pula.

Fikri herian hazli (2018) melakukan audit energi listrik gedung AR Fachrudin A dan B Universitas Muhammadiyah Yogyakarta dan didapat hasil pengamatan dan pengukuran yang telah dilakukan terhadap panel SDPA dan SDPB frekuensi rerukur, yaitu 49,77 sampai 50,280 Hz, nilai tegangan yang terukur masih dalam toleransi, +5% dan -15%. Nilai harmonisasi tegangan masih dalam toleransi 3% sampai 5%, Nilai toleransi ketidak seimbangan beban antar fasa sebesar 5 s/d 20% maksimal. Toleransi ketidakseimbangan beban rata-rata pada fasa T panel SDP A sebesar 62,9% dan pada panel SDP B sebesar 41,2% pada fasa S dan 44,3% pada fasa T sehingga toleransi ketidakseimbangan beban pada gedung tidak sesuai standar. Nilai arus SDPA dan SDPB tidak sesuai standar karena nilai arus THD lebih dari 5%. Hasil pengukuran nilai *cosphi* pada jaringan distribusi listrik pada gedung AR Fahrudin A dan B kurang baik, karena minimal faktor daya yang diijinkan 0,81 sampai 0,9. Nilai unbalanced tegangan dalam kondisi baik karena dalam nilai standar yang ditetapkan yaitu 3%. Nilai ketidakseimbangan arus terukur tidak sesuai standar karena melebihi dari 20%.

Hafidz Wahyu (2018) melakukan analisis rugi – rugi daya (*losses*) akibat ketidakseimbangan beban pada jaringan distribusi 20 KV Rayon Bantul.

Penelitian ini dilakukan guna mengetahui berapa arus netral dan rugi – rugi daya yang diakibatkan ketidakseimbangan beban pada masing – masing penyulang di jaringan distribusi 20 KV Rayon Bantul. Analisis dilakukan dengan menghitung arus netral yang ditimbulkan dari beban 3 fasa yang tidak seimbang yang kemudian nilai arus tersebut digunakan untuk menghitung rugi – rugi daya (*losses*) arus netral selama kurun waktu 3 bulan. Dari perhitungan tersebut diketahui bahwa penyulang yang memiliki tingkat kerugian tertinggi akibat adanya arus netral yang ditimbulkan ketidakseimbangan beban adalah pada penyulang BNL 11 yaitu dengan total *losses* pada jam 10.00 sebesar 3.255.703,95 watt dan pada jam 19.00 sebesar 10.445.998,91 watt.

2.2 Dasar Teori

2.2.1 Sistem Distribusi Tenaga Listrik

Berdasarkan sumber energinya, sistem kelistrikan pada bangunan gedung dibagi menjadi dua sumber yaitu Sumber Listrik dari PLN dan Sumber Listrik dari Genset, di mana sumber listrik gedung ini memprioritaskan PLN sebagai sumber utama dan genset sebagai cadangan (*back up*). Bagian-bagian dari sistem kelistrikan pada bangunan gedung antara lain :

1. Kubikal tegangan menengah

Kubikal (Panel) Tegangan Menengah atau *Medium Voltage Distribution Panel* (MVDP) adalah panel yang berfungsi sebagai pemutus (PMT) dan pemisah (PMS) daya listrik dari PLN. MVDP pada umumnya terdiri dari *circuit breaker* (CB) dan *disconnection switch* (DS) untuk tegangan menengah. Daya listrik yang telah melalui MVDP kemudian didistribusikan ke *Transformator Step Down*.



Gambar 2.1 Kubikal tegangan menengah
(Sumber : <http://binateknik.indonetwork.co.id/> diakses pada 2 Januari 2019)

2. *Step Down Transformers*

Transformator (trafo) step down berfungsi menurunkan tegangan. Dalam hal ini menurunkan tegangan menengah 20 KV menjadi tegangan rendah 380 V. Trafo *step down* dibedakan menjadi 2 menurut lokasi pemasangan yaitu tipe pemasangan luar (*outdoor*) dan tipe pemasangan dalam (*indoor*). Trafo outdoor pada umumnya dipasang di gardu tiang listrik. Sedangkan trafo indoor dipasang diruangan khusus infastruktur listrik untuk bangunan gedung tertentu (pabrik, hotel, rumah sakit dan lain-lain). Trafo step down langsung terhubung dengan kubikal tegangan menengah dan panel utama tegangan rendah.



Gambar 2.2 Step Down Transformator
(Sumber : <https://www.indotrading.com/product/trafo-distribusi-p352542.aspx> diakses pada 2 Januari 2019)

3. Genset (*Generator Set*)

Sumber energi listrik selain PLN berasal dari unit *Generator Set* (genset). *Generator Set* (genset) berfungsi sebagai pensuplai daya listrik cadangan yang dapat bekerja apabila daya listrik utama dari PLN terputus. Genset terhubung dan dikontrol dengan Panel Kontrol Genset (PKG). PKG terhubung dengan unit Panel Utama Tegangan Rendah (LVMDP). PKG akan menghidupkan genset dan mensuplai tegangan ke LVMDP bilamana terjadi gangguan pada sumber PLN, sehingga akan memberikan pelayanan yang kontinyu terhadap ketersediaan sumber tenaga listrik dan diharapkan dengan sistem tersebut kehandalan sistem energi listrik akan terpenuhi.



Gambar 2.3 Genset (*Generator Set*) Merk CAT

Sumber : (https://www.cat.com/id_ID/products/new/power-systems/electric-power-generation/diesel-generator-sets.html diakses pada 2 Januari 2019)

4. Panel Utama Tegangan Rendah

Panel Utama Tegangan Rendah atau *Low Voltage Main Distribution Panel* (LVMDP) berfungsi sebagai gerbang utama masuknya daya listrik ke suatu bangunan gedung. Pada LVMDP, dipasang circuit breaker utama untuk seluruh kebutuhan listrik bangunan gedung. LVMDP menerima daya listrik dari trafo dan/atau genset untuk selanjutnya didistribusikan ke panel-panel distribusi tegangan rendah. Pada LVMDP, dipasang komponen-komponen proteksi listrik yang berfungsi melindungi seluruh peralatan listrik maupun elektronik dalam bangunan gedung terhadap gangguan-gangguan yang beresiko merusak peralatan; seperti petir, hubung singkat dan lain-lain.



Gambar 2.4 Panel Utama Tegangan Rendah

Sumber : (<https://en.indotrading.com/product/panel-utama-tegangan-p411719.aspx> diakses pada 2 Januari)

5. Panel Distribusi

Panel distribusi adalah panel yang tersambung langsung dengan beban listrik, seperti lampu, kotak kontak, AC, dan lain-lain. Pada panel distribusi, dipasang satu circuit breaker berkapasitas besar sebagai pemutus utama, dan beberapa circuit breaker berkapasitas kecil sebagai pemutus yang dihubungkan langsung ke beban listrik.

Pada panel-panel untuk kebutuhan tertentu seperti pompa transfer air bersih dan motor-motor, dipasang komponen-komponen kontrol sesuai dengan kebutuhan.



Gambar 2.5 Gambar 2.5 Panel Distribusi

Sumber : (<http://utakatikmikro.wordpress.com/> diakses pada 2 Januari 2019)

2.2.2 Pengertian Audit Kualitas Daya Listrik

Pada suatu bangunan instansi pemerintah atau pun swasta besarnya pemakaian energi listrik di tiap – tiap gedung bangunan dapat dilakukan usaha

penghematan apabila jenis energi apa dan untuk apa energi itu digunakan. Kegiatan untuk melakukan identifikasi jenis energi dan besarnya energi yang digunakan pada setiap bagian operasi suatu bangunan/pabrik, kegiatan ini disebut dengan audit energi. Audit energi bertujuan untuk menganalisis seberapa efisien penggunaan energi dari suatu bangunan/pabrik dan sekaligus memberikan solusi untuk melakukan penghematan energi.

kualitas daya listrik merupakan suatu konsep yang memberikan gambaran tentang baik atau buruknya mutu daya listrik akibat adanya beberapa jenis gangguan yang terjadi pada sistem kelistrikan.

Terdapat beberapa alasan utama, mengapa para ahli dan praktisi di bidang tenaga listrik memberikan perhatian lebih pada isu kualitas daya listrik (Roger C.Dugan, 1996), yaitu:

1. Meningkatkan perhatian yang ditekankan pada efisiensi sistem daya listrik secara menyeluruh, sehingga menyebabkan terjadinya peningkatan penggunaan peralatan yang mempunyai efisiensi tinggi, seperti pengaturan kecepatan motor listrik dan penggunaan kapasitor bank untuk memperbaiki faktor daya. Penggunaan peralatan tersebut dapat meningkatkan harmonik pada sistem distribusi daya listrik.
2. Meningkatkan kesadaran bagi para pengguna energi listrik terhadap masalah kualitas daya listrik. Para konsumen energi listrik harus lebih pandai dan bijaksana mengenai persoalan seperti interup, sags dan peralihan transisi dan merasa berkepentingan untuk meningkatkan kualitas distribusi daya listrik.
3. Sistem tenaga listrik yang saling berhubungan dalam suatu jaringan interkoneksi, dimana sistem tersebut memberikan suatu konsekuensi bahwa kegagalan dari setiap komponen dapat mengakibatkan kegagalan pada komponen yang lain.

Kualitas daya listrik adalah setiap masalah daya listrik yang terbentuk penyimpangan tenaga, arus atau frekuensi yang mengakibatkan kegagalan ataupun

kesalahan operasi pada peralatan – peralatan yang terjadi pada konsumen energi listrik (Roger C. Dugan, 1996). Daya adalah suatu nilai dari energi listrik yang dikirimkan dan didistribusikan, dimana besarnya daya listrik tersebut sebanding dengan perkalian dengan perkalian besarnya tegangan dan arus listriknya. Sistem suplai daya listrik dapat dikendalikan oleh kualitas dari tegangan, dan tidak dapat dikendalikan oleh arus listrik karena arus listrik berada pada sisi beban yang bersifat individual, sehingga pada dasarnya kualitas daya adalah kualitas pada tegangan itu sendiri (Roger C, Dugan, 1996).

2.2.3 Permasalahan Kualitas Daya Listrik

Menurut Roger C. Dugan (1996) ada beberapa permasalahan kualitas daya listrik yang disebabkan oleh gejala – gejala atau fenomena elektromagnetik yang terjadi pada sistem tenaga listrik. Gejala elektromagnetik yang menyebabkan permasalahan kualitas daya listrik adalah;

1. Gejala peralihan (*Transien*) yaitu suatu gejala perubahan variabel (tegangan, arus dan lain - lain) yang terjadi selama masa peralihan dari keadaan operasi tunak menjadi keadaan yang lain.
2. Gejala perubahan tegangan durasi pendek (*Short duration variations*) yaitu suatu gejala perubahan nilai tegangan dalam waktu yang singkat yaitu kurang dari 1 menit.
3. Gejala perubahan tegangan durasi panjang (*Long duration variations*) yaitu suatu gejala perubahan nilai tegangan dalam waktu yang lama yaitu lebih dari 1 menit.
4. Ketidakseimbangan tegangan (*Unbalance Load*) adalah gejala perbedaan besarnya tegangan dalam sistem tiga fasa serta perbedaan besarnya sudut fasanya.
5. Distorsi gelombang yaitu gejala penyimpangan dari suatu gelombang (tegangan dan arus) dari bentuk idealnya berupa gelombang sinusoida.
6. Fluktuasi tegangan yaitu gejala perubahan besarnya tegangan secara sistematis.

7. Gejala frekuensi daya yaitu gejala penyimpangan frekuensi daya listrik pada suatu sistem disrtibusi tenaga listrrik.

2.2.4 Waktu Pemakaian Daya Listrik

Pemakain daya lisrtik dalam waktu 24 jam terbagi dalam 2 jenis waktu pemakaian atau pembebanan yaitu:

1. WBP (Waktu Beban Puncak) adalah waktu tertentu tingkat pemakain daya listrik pada konsumen mencapai puncak kapasitas pembebanan. Waktu beban puncak ini berlaku mulai pukul 18.00 WIB – 22.00WIB.
2. LWBP (Luar Waktu Beban Puncak) adalah waktu tertentu tingkat pemakaian daya listrik pada konsumen masih dibawah puncak kapasitas pembebanan. Luar waktu beban puncak ini berlaku mulai pukul 22.00 WIB – 18.00 WIB.
3. Biaya Kelebihan Daya Reaktif (kVARh) adalah apabila pada saat setiap bulan faktor daya rata – rata yang dihasilkan kurang dari 0,85 maka akan dikenai biaya kelebihan pemakain daya reaktif (kVARh) yang besarnya sudah ditentukan oleh PLN. Hal ini mengakibatkan jumlah tarif pemakain listrik menjadi bertambah.

2.2.5 Besaran Listrik Dasar

Tedapat 3 (tiga) buah besaran listrik dasar yang digunakan dalam teknik tenaga listrik, yaitu tegangan listrik atau beda potensial (V), arus listrik (I) dan frekuensi (f). Ketiga besaran tersebut merupakan satu kesatuan pokok pembahasan didalam masalah sistem tenaga listrik. Selain 3 (tiga) besaran tersebut masih terdapat satu faktor penting didalam pembahasan sistem tenaga listrik yaitu faktor daya.

2.2.5.1 Tegangan

ketika suatu muatan llistrik positif mengalami perpindahan sepanjang lintasan dl didalam medan listrik E . Maka energi potensial elektrostastiknya adalah:

$$W = -q \int E \cdot dl \dots\dots\dots 2.1$$

Dimana :

W = Perubahan Energi Potensial (J)

q = Muatan Listrik (C)

E = Medan Listrik (N/C)

dl = Panjang Lintasan (m)

beda potensial atau tegangan (V) yang digunakan untuk memindahkan suatu muatan listrik positif dari suatu titik lain adalah perubahan energi potensial listrik yang sebanding dengan muatan listriknya.

$$V = W/q = - \int_{awal}^{akhir} E \cdot dl \dots\dots\dots 2.2$$

Beda potensial dinyatakan dalam Joule per Coulomb yang didefinisikan sebagai Volt, sehingga beda potensial sering disebut tegangan atau voltase. Beda potensial V_{AB} adalah beda potensial dari luar, yang digunakan untuk memindahkan satu muatan listrik dari B sampai titik akhir A, sehingga :

$$V_{AB} = - \int_B^A E \cdot dl \dots\dots\dots 2.3$$

$$V_{AB} = V_A - V_B \dots\dots\dots 2.4$$

Setiap potensial diukur terhadap suatu titik acuan nol. Didalam pengukuran eksperimental fisis. Titik acuan yang digunakan adalah “bumi” yaitu potensial permukaan bumi. Sehingga setiap titik mempunyai potensial terhadap titik nol. Potensial A adalah yang diukur dari titik A terhadap titik nol dan potensial B nilai yang diukur dari titik B terhadap acuan nol.

2.2.5.2 Arus Listrik

Arus listrik didefinisikan sebagai laju aliran sejumlah muatan listrik yang melalui suatu luasan penampang melintang. Menurut konversi, arah arus listrik dianggap searah dengan aliran muatan positif. Arus listrik diukur dalam satuan Ampere (A), adalah satu Coulomb per detik. Arus listrik dirumuskan :

$$I = \frac{dq}{dt} \dots\dots\dots 2.5$$

Di mana: I = Arus Listrik (A)

$dq =$ Sejumlah Muatan (C)

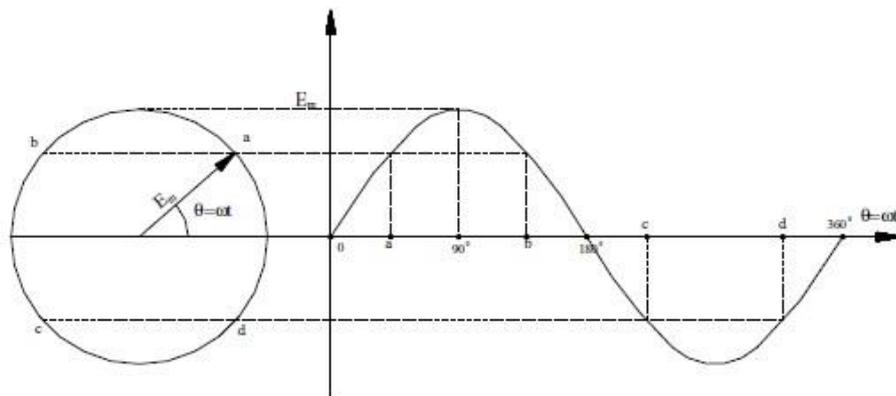
$dt =$ Waku (detik)

2.2.5.3 Frekuensi

Tegangan dan arus listrik yang digunakan pada sistem kelistrikan merupakan listrik bolak-balik yang berbentuk sinusoidal. Tegangan dan arus listrik sinusoidal merupakan gelombang yang berulang, sehingga gelombang sinusoidal mempunyai 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. Frekuensi sebesar 1 Hz menyatakan peristiwa yang terjadi satu kali per detik, di mana frekuensi (f) sebagai hasil kebalikan dari periode (T), seperti rumus dibawah ini :

$$f = \frac{1}{T} \dots\dots\dots 2.6$$

di setiap negara mempunyai frekuensi tegangan listrik yang berbeda-beda. Frekuensi tegangan yang digunakan di Indonesia adalah 50 Hz, sedangkan di Amerika menggunakan frekuensi 60 Hz.



Gambar 2.6 Gelombang Frekuensi
Sumber : (Djodi, 2013)

2.2.6 Macam - Macam Daya Listrik

2.2.6.1 Daya Aktif (P)

Daya aktif merupakan daya listrik yang diubah menjadi energi mekanis yang nantinya energi tersebut digunakan untuk melakukan kerja pada beban. Satuan untuk daya aktif adalah Watt atau Kilo Watt (KW). Secara teori daya aktif dinyatakan dalam persamaan berikut:

$$P = V \cdot I \cdot \cos \varphi \dots\dots\dots 2.7$$

Dimana : P = daya aktif (KW)

V = tegangan (V)

I = arus (A)

$\cos \varphi$ = faktor daya

2.2.6.2 Daya Reaktif (Q)

Daya reaktif adalah daya listrik yang dibutuhkan beban untuk pembangkitan medan magnet atau daya yang timbul karena beban yang bersifat induktif dan kapasitif. Satuan daya reaktif adalah VAR (Volt Amper Reaktif).

$$Q = V \times I \times \sin \varphi \dots\dots\dots 2.8$$

Dimana : Q = daya reaktif (KAR)

V = tegangan (V)

I = arus (A)

$\cos \varphi$ = faktor daya

2.2.6.3 Daya Semu (S)

Daya semu adalah daya yang diberikan oleh PLN kepada pelanggan, satuan daya semu adalah VA (Volt Amper). Sifat beban semu adalah resistif.

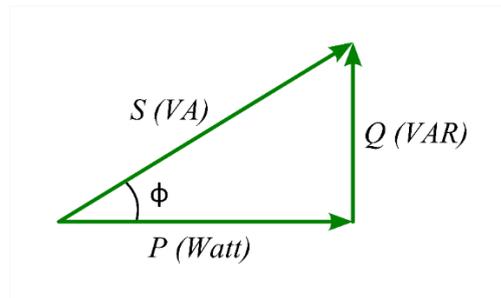
$$S = V \times I \dots\dots\dots 2.9$$

Dimana : S = Daya Semu (VA)

V = tegangan listrik (V)

I = arus listrik (A)

Dari ketiga jenis daya listrik tersebut maka dapat terbentuk hubungan segitiga daya yaitu



Gambar 2.7 Segitiga Daya
 Sumber : (Djodi, 2013)

Sehingga dapat diperoleh persamaan sebagai berikut :

$$P^2 = S^2 - Q^2 \dots\dots\dots 2.10$$

$$Q^2 = S^2 - P^2 \dots\dots\dots 2.11$$

$$S^2 = P^2 + Q^2 \dots\dots\dots 2.12$$

2.2.7 Faktor Daya

Faktor daya atau yang sering disebut $\text{Cos } \phi$ merupakan perbandingan antara daya aktif (P) dan daya semu (S). Faktor daya merupakan istilah dari daya listrik yang terpakai kW. Terdapat daya total yang disampaikan oleh perusahaan listrik kVA ke perusahaan. Secara teori faktor daya dapat dinyatakan dalam persamaan:

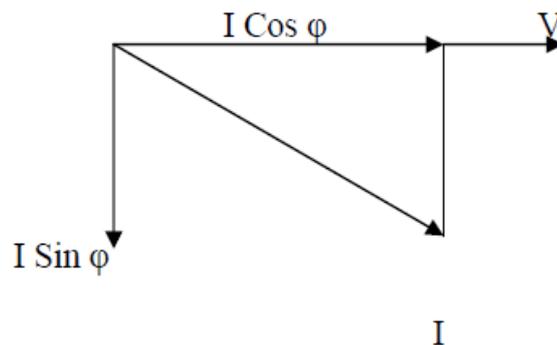
$$\text{Cos } \phi = \frac{P}{S} \dots\dots\dots 2.13$$

Dimana : $\text{Cos } \phi$ = Faktor Daya

P = Daya Aktif (Watt)

Q = Daya Semu (VA)

Batas minimal nilai faktor daya yang diberikan oleh PLN adalah sebesar 0,85 jika dibawah angka tersebut maka dikenakan denda kVAR. Pergeseran fasa antara tegangan dan arus yang terjadi diakibatkan oleh penggunaan beban yang bersifat induksi seperti motor listrik, lampu TL dan sebagainya, mengakibatkan tegangan dan arus tidak sefase seperti dapat dilihat pada gambar dibawah ini.



Gambar 2.8 Tegangan dan Arus pada beban Induktif
Sumber : (Saadat, Hadi. 1999. Power System Analysis. P.19)

Pada gambar 2.8 menunjukkan bahwa arus yang menghasilkan energi adalah $I \cos \varphi$. Dengan demikian semakin besar sudut φ semakin kecil nilai $\cos \varphi$. Akibatnya $I \cos \varphi$ akan semakin kecil dibandingkan dengan I dan ini merupakan suatu kerugian. Berdasarkan pada hubungan segitiga daya suplai dari PLN (kVA) terdiri atas dua komponen yaitu:

1. Komponen daya nyata (P) yang dihasilkan daya terpakai Watt (W).
2. Komponen daya reaktif (Q) yang tidak menghasilkan daya terpakai Volt Ampere Reaktif (VAR).

Faktor daya ($\cos \varphi$) yang rendah mengakibatkan beberapa kerugian, berupa:

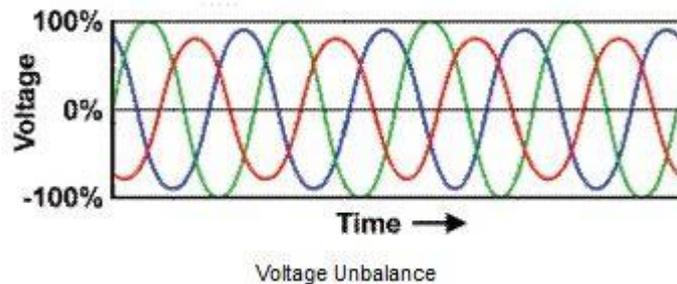
1. Meningkatkan rugi-rugi hantaran (FR).
2. Kapasitas daya kompleks (S) terpasang terbuang percuma (kVA).
3. Dikenai denda biaya faktor daya (kVAr).
4. Biaya pemeliharaan alat meningkat.
5. Biaya listrik meningkat.

2.2.8 Unbalancend Voltage

2.2.8.1 Pengertian Unbalance Voltage

Ketidakseimbangan tegangan (*voltage unbalance*) di definisikan oleh IEEE sebagai rasio komponen urutan negatif atau urutan nol terhadap komponen urutan positif. Istilahnya adalah terjadinya variasi tegangan dalam sistem tenaga listrik dimana besaran tegangan antar ketiga *phasa* tidak sama akibat adanya perbedaan antar sudut *phasa* antara *phasa* R, S dan T. Tegangan *unbalance* merupakan salah satu masalah *power quality* yang hanya terjadi pada sistem tiga *phasa*.

Tegangan antar *phasa* memang tidak bisa mencapai 100% seimbang, namun rasio ketidakseimbangan tegangan besar akan mengakibatkan masalah untuk motor *polyphasa* dan beban lainnya. Apabila motor menggunakan *variable speed drive* maka afeknya akan menjadi lebih sensitif dibandingkan dengan motor stardar.



Gambar 2.9 *voltage unbalance*

Sumber : (sumber: http://jurnal.upi.edu/file/Elih_M1.pdf, diakses tanggal 20 Februari 2019)

Penyebab utama tegangan *unbalance* ini adalah beban yang tidak merata pada sistem distribusi atau dalam suatu sistem beban tenaga listrik.

2.2.8.2 Penyebab dan Sumber Masalah Tegangan *Unbalance*

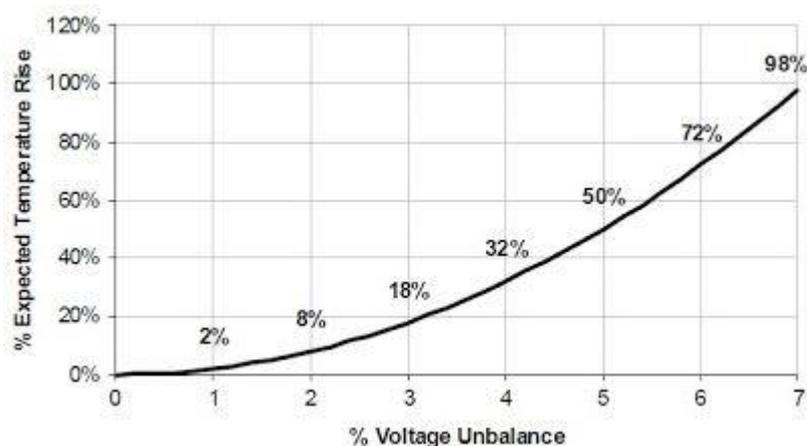
Secara umum:

1. Peralatan *utility* jaringan listrik yang mengalami kerusakan (kapsitor bank terbakar, trafo terbakar, regulator pada trafo hubungan *open – delta* rusak, dan lain - lain).
2. Pembagian beban satu *phasa* dari trafo distribusi 3 *phasa* yang tidak merata (ketidakseimbangannya mencapai lebih 5%) beban motor.
3. Tidak seimbang nilai resistansi belitan motor atau stator pada motor, dapat menjadi pemicu ketidakseimbangan tegangan pada system.

2.2.8.3 Efek *Unbalance Voltage*

Sistem 3 *phasa* yang simbang mengindikasikan adanya urutan negatif yang merugikan bagi semua beban *polyphase*, terutama motor induksi tiga *phasa*. Efek dari ketidakseimbangan tegangan yaitu efek panas yang berlebihan pada motor. Karena tegangan *unbalance*, dapat memicu arus *unbalance* 6 – 10 kali lipat dari arus nominal. Arus *unbalance* ini akan membuat belitan motor semakin panas dan pada akhirnya terjadi degradasi isolasi motor. Apabila hal ini dibiarkan akan mengakibatkan motor terbakar atau mengalami kerusakan permanen pada motor

Berikut grafik yang menunjukkan hubungan antara tegangan *unbalance* dan kenaikan suhu:



Gambar 2.10 Grafik *voltage unbalance*

Sumber : (sumber: http://jurnal.upi.edu/file/Elih_M1.pdf, diakses tanggal 20 Februari 2019)

Langkah pencegahan dari kerusakan akibat gangguan *unbalance* pada *power quality*, hanya dapat dilakukan apabila kita memiliki data besaran faktor *unbalance* dari setiap panel sub distribusi pada beban. Besaran faktor *unbalance* dapat diukur dengan alat *power quality analyzer*.

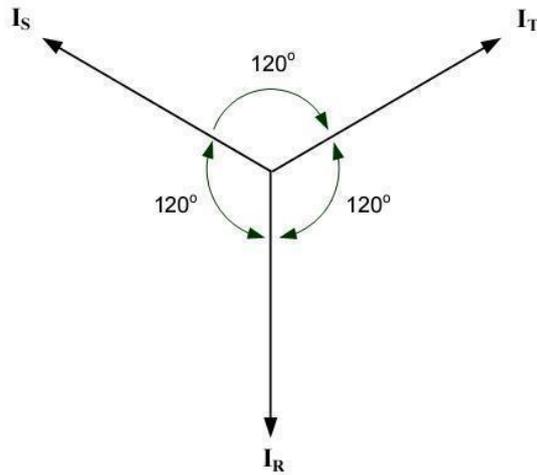
2.2.9 Unbalancend Load

2.2.9.1 Pengertian

Ketidakseimbangan beban merupakan besarnya ketidakseimbangan arus yang mengalir antara tiap fasa dan menyebabkan mengalirnya arus pada titik netral. Dimana arus netral ini mengakibatkan terjadinya beda tegangan antara titik netral dengan *ground* (*ground* efektif memiliki nilai nol). Dampak yang diperoleh dari mengalirnya arus pada titik netral adalah tidak terpenuhinya *reference* tegangan pada titik netral, yang mengakibatkan tegangan fasa ke netral menurun.

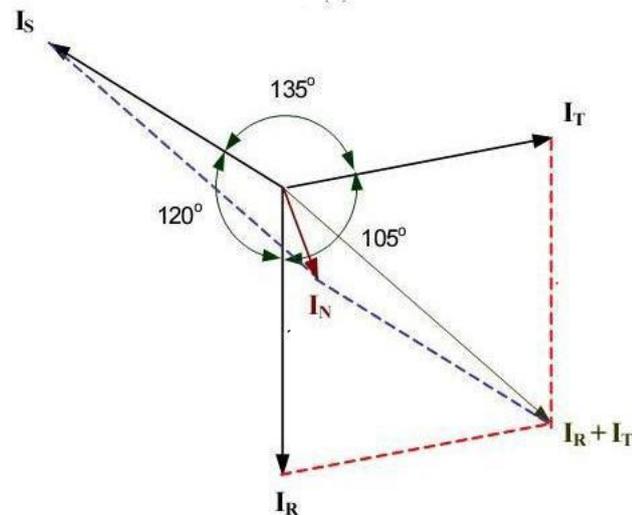
Kemungkinan ketidakseimbangan beban ada tiga yaitu:

1. Masing-masing vektor seimbang namun tidak membentuk sudut 120 satu sama lain.
2. Masing-masing vektor tidak seimbang namun membentuk sudut 120 satu sama lain.
3. Masing-masing vektor tidak seimbang dan tidak membentuk sudut 120 satu sama lain.



Gambar 2.11 Vektor Keseimbangan Beban

Sumber : (<https://electricdot.wordpress.com/2012/10/15/pengaruh-ketidakseimbangan-pembebanan-pada-trafo-distribusi/> diakses tanggal 14 Februari 2019)



Gambar 2.12 Vektor Ketidakseimbangan Beban

Sumber : (<https://electricdot.wordpress.com/2012/10/15/pengaruh-ketidakseimbangan-pembebanan-pada-trafo-distribusi/> diakses tanggal 14 Februari 2019)

Pada saat keadaan seimbang, penjumlahan vektor arus (I_R , I_S , I_T) pada adalah sama dengan nol. Namun pada keadaan seimbang terdapat arus netral (I_N) yang mengakibatkan penjumlahan ketiga vektor tersebut tidak sama dengan nol. Nilai arus netral bergantung pada seberapa besar faktor ketidakseimbangannya.

2.2.9.2 Akibat Ketidakseimbangan Beban

Adanya arus netral mengakibatkan pembebanan yang tidak seimbang dan menimbulkan rugi-rugi daya (*power losses*). *Losses* pada penghantar netral ini dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$P_N = I_N^2 \times R_N \dots\dots\dots 2.14$$

Dimana: P_N = losses pada penghantar netral (W)

I_N = Arus yang mengalir pada penghantar netral (A)

R_N = Tahanan penghantar netral (ohm)

2.2.9.3 Menentukan Besaran Ketidakseimbangan Beban

$$I_{rata\ rata} = \frac{IR_1 + IS_1 + IT_1}{3} \dots\dots\dots 2.15$$

$$IR = a \times I_{rata - rata} \quad \text{maka : } a = \frac{IR}{I_{rata-rata}} \dots\dots\dots 2.16$$

$$IS = b \times I_{rata - rata} \quad \text{maka : } b = \frac{IS}{I_{rata-rata}} \dots\dots\dots 2.17$$

$$IT = c \times I_{rata - rata} \quad \text{maka : } c = \frac{IT}{I_{rata-rata}} \dots\dots\dots 2.18$$

Dimana : $I_{rata - rata}$ = arus rata - rata ketiga fasa (A)

IR = arus fasa R (A)

IS = arus fasa S (A)

IT = Arus Fasa T (A)

Dalam kondisi beban seimbang, besar nilai koefisiensi a, b, dan c diasumsikan sama dengan 1. Jadi rata-rata ketidakseimbangan beban (%) dapat diketahui dengan persamaan :

$$\text{Ketidakseimbangan} = \frac{\{|a-1|+|b-1|+|c-1|\}}{3} \times 100\% \dots\dots\dots 2.19$$

2.2.9.4 Keseimbangan Beban 3 Fasa

Keseimbangan beban pada jaringan 3 fasa dapat terjadi apabila mempunyai beban yang sama. Untuk mencari titik keseimbangan pada jaringan

tiga fasa dapat menggunakan rumus matematika linear yaitu nilai mean dengan rumus :

$$XY = (X1 + X2 + X3 + Xn)/n \dots\dots\dots 2.20$$

- Dimana: X_Y = Arus rata – rata (A)
 X = Arus masing – masing fasa (A)
 n = Jumlah fasa

Dari perhitungan tersebut akan diperoleh nilai yang harus dipindah atau diterima pada tiap fasa dengan menghitung :

$$I_R - \Sigma X = I_{lepas/terima} \text{ (yang harus dilepas atau ditambahkan pada fasa R) } \dots\dots\dots 2.21$$

$$I_S - \Sigma X = I_{lepas/terima} \text{ (yang harus dilepas atau ditambahkan pada fasa S) } \dots\dots\dots 2.22$$

$$I_T - \Sigma X = I_{lepas/terima} \text{ (yang harus dilepas atau ditambahkan pada fasa T) } \dots\dots\dots 2.23$$

Apabila terdapat fasa yang hasil $I_{lepas/terima}$ sangat besar berarti fasa tersebut harus melepas beban sebanyak $I_{lepas/terima}$ tersebut, sedangkan pada fasa yang hasilnya lebih sedikit atau bahkan minus (-) berarti fasa tersebut menerima beban dari fasa yang hasil $I_{lepas/terima}$ paling besar.

2.2.9.5 Standar IEEE 446 – 1995 Power Quality

Untuk membandingkan kondisi kualitas daya dengan data hasil pengukuran dari power quality yaitu menggunakan parameter sebagai berikut:

Tabel 2.1 Standar IEEE 446 – 1995 *Power Quality*

(sumber:<http://repository.akprind.ac.id/sites/files/PROSDING.pdf>, diakses tanggal 11 Februari 2019)

No.	Parameter	Maksimum
1.	Regulasi tegangan dalam keadaan baik.	+5, -15% (ANSI C84.1-1970) adalah +6, -13%

Tabel 2.2 Standar IEEE 446 – 1995 *Power Quality* (lanjutan)

No.	Parameter	Maksimum
2.	Gangguan tegangan drop sementara tegangan transien.	-25% s/d -30% tidak lebih dari 0,5 s -100% dengan lama 4 s/d 20 ms +150 s/d 200% tidak lebih 0,2 ms
3.	Distorsi Tegangan Harmonik (THD)	3 – 5 % (Beban Linier)
4.	Noise	Tidak ada stardar
5.	Variasi Frekuensi	50 Hz \mp 0,5 Hz – 1 Hz
6.	Perubahan Frekuensi	Sekitar 1 Hz
7.	Ketidakseimbangan Beban	5 s/d 20% maksimal pada setiap fasa
8.	Ketidakseimbangan tegangan	2,5 – 5%
9.	Faktor Daya	0,81 – 0.9
10.	Kapasitas Beban	0,75 s/d 0,85 (Beban terpasang)

2.2.10 Losses Pada Jaringan Distribusi

Yang dimaksud losses adalah perbedaan antara energi listrik yang disalurkan (PS) dengan energi listrik yang terpakai (PP)

$$\text{Losses} = (\text{PS} - \text{PP}) / \text{PS} \dots\dots\dots 2.24$$

Dimana :

PS = Energi yang disalurkan (watt)

PP = Energi yang dipakai (watt)

2.2.10.1 Losses Pada Penghantar Phasa

Jika suatu arus mengalir pada suatu penghantar, maka pada penghantar tersebut akan terjadi rugi-rugi energi menjadi panas karena pada penghantar tersebut terdapat resistansi. Rugi-rugi dengan beban terpusat di ujung dirumuskan sebagai berikut :

$$\Delta V = \sqrt{3} I (R \text{Cos } \varphi + X \text{Sin } \varphi) l \dots\dots\dots 2.25$$

$$\Delta P = 3 I^2 R l \dots\dots\dots 2.26$$

Dengan :

I = Arus per fasa (Ampere)

R = Tahanan pada penghantar (Ohm / km)

X = Reaktansi pada penghantar (Ohm / km)

$\text{Cos } \varphi$ = Faktor daya beban

l = Panjang penghantar (km)

2.2.10.2 Losses Akibat Adanya Arus Netral Pada Penghantar Netral

Akibat pembebanan di tiap fasa yang tidak seimbang, maka akan mengalir arus pada penghantar netral. Jika di hantaran pentanahan netral terdapat nilai tahanan dan dialiri arus, maka kawat netral akan bertegangan yang menyebabkan tegangan pada trafo tidak seimbang. Arus yang mengalir di sepanjang kawat netral, akan menyebabkan rugi daya di sepanjang kawat netral sebesar :

$$P_N = I_N^2 \cdot R_N \dots\dots\dots 2.27$$

Dimana :

P_N = Losses yang timbul pada penghantar netral (watt)

I_N = Arus yang mengalir melalui kawat netral (Ampere)

R_N = Tahanan pada kawat netral (Ohm)

2.2.10.3 Losses Energi

Untuk mengetahui rugi – rugi energi dapat dihitung dengan mengalikan rugi –rugi daya dengan waktu 24 jam dan 30 hari sehingga dapat ditulis persamaan untuk rugi – rugi energi selama 1 bulan yaitu :

$$W = P \times t \dots\dots\dots 2.28$$

$$W = P \times 24 \text{ jam} \times 30 \text{ hari} \dots\dots\dots 2.29$$

Dimana

W = rugi –rugi energi 1 bulan (Wh)

P = rugi –rugi daya (watt)

t = waktu

Akan tetapi untuk menghitung rugi – rugi energi tidak dapat dilakukan secara akurat karena sifat beban pelanggan yang fluktuatif. Umumnya beban pelanggan dikelompokkan ke dalam 2 zona waktu yaitu waktu beban puncak (WBP) dan waktu luar beban puncak (WLBP). Sehingga untuk menghitung rugi – rugi energi selama 1 bulan dapat menggunakan rumus :

$$W = \frac{(\text{Losses WBP} \times n1 \text{ jam}) + (\text{Losses WLBP} \times n2 \text{ jam})}{1000} \times 30 \text{ hari} \dots\dots\dots 2.31$$

Dimana : W = rugi – rugi energi 1 bulan (kWh)

$n1$ = jumlah jam WBP (Waktu beban puncak) (jam)

$n2$ = jumlah jam WLBP (Waktu luar beban puncak) (jam)

Sehingga dapat diketahui ke0rugian segi finansial dalam satu bulan dengan menggunakan rumus:

$$\text{Kerugian 1 bulan (Rp)} = \text{Rugi energi 1 bulan (kWh)} \times \text{Tarif dasar listrik (Rp/kWh)}$$

2.2.10.4 Losses Akibat Arus Netral yang Mengalir ke Tanah

Losses ini terjadi karena adanya arus netral yang mengalir ke tanah., Besarnya dapat dirumuskan sebagai berikut :

$$P_G = I_G^2 R_G \dots\dots\dots 2.32$$

Dimana :

P_G = losses akibat arus netral yang mengalir ke tanah (Watt)

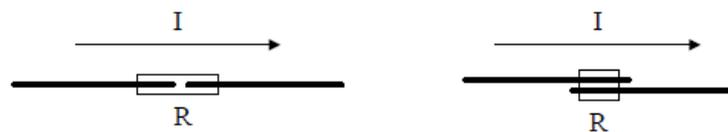
I_G = Arus netral yang mengalir ke tanah (Ampere)

R_G = Tahanan pembumian netral trafo (Ohm)

2.2.10.5 Losses Pada Sambungan Tidak baik

Losses ini terjadi karena di sepanjang jaringan tegangan rendah terdapat beberapa sambungan antara lain :

1. Sambungan saluran jaringan tegangan rendah dengan kabel NYFGBY.
2. Percabangan saluran jaringan tegangan rendah.
3. Percabangan untuk sambungan pelayanan.



Gambar 2.13 Kubikal tegangan menengah
(Sumber : IR. Badaruddin, MT 2012)

Besarnya rugi-rugi daya pada sambungan dirumuskan :

$$P = I^2 R \dots\dots\dots 2.33$$

Dimana :

P = Losses yang timbul pada Konektor (Watt)

I = arus yang mengalir melalui konektor (Ampere)

R = Tahanan konektor (Ohm)

2.2.11 Harmonisa

2.2.11.1 Pengertian Harmonisa

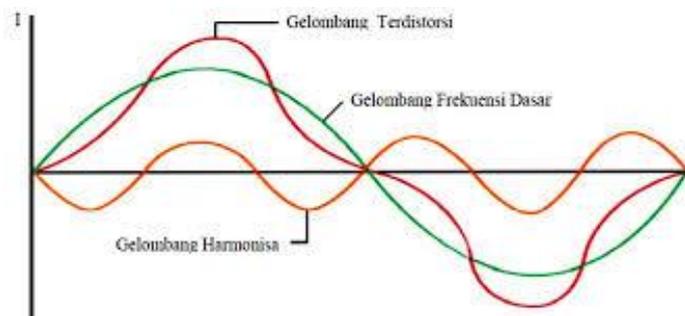
Harmonik adalah gangguan yang terjadi pada sistem distribusi tenaga listrik akibat terjadinya distorsi gelombang arus dan tegangan. Pada dasarnya, harmonik adalah gejala pembentukan gelombang-gelombang dengan frekuensi berbeda yang merupakan perkalian bilangan bulat dengan frekuensi dasarnya. Hal ini disebut frekuensi harmonik yang timbul pada bentuk gelombang aslinya sedangkan bilangan bulat pengali frekuensi dasar disebut angka urutan harmonik. Misalnya, frekuensi dasar suatu sistem tenaga listrik adalah 50 Hz, maka

harmonik keduanya adalah gelombang dengan frekuensi sebesar 100 Hz, harmonik ketiga adalah gelombang dengan frekuensi sebesar 150 Hz dan seterusnya. Gelombang-gelombang ini kemudian menumpang pada gelombang murni/aslinya sehingga terbentuk gelombang cacat yang merupakan jumlah antara gelombang murni sesaat dengan gelombang harmoniknya.



Gambar 2.14 Harmonisa

(sumber: http://jurnal.upi.edu/file/Elih_M1.pdf, diakses tanggal 20 Februari 2019)



Gambar 2.15 Gelombang terdistorsi dan hasilnya

Sumber : (Djodi, 2013)

2.2.11.2 Sumber Harmonik pada Sistem Distribusi

Dalam sistem tenaga listrik dikenal dua jenis beban yaitu beban linier dan beban non linier. Beban linier adalah beban yang memberikan bentuk gelombang keluaran yang linier artinya arus yang mengalir sebanding dengan impedensi dan perubahan tegangan. Sedangkan beban non linier adalah bentuk gelombang keluarannya tidak sebanding dengan tegangan dalam setiap setengan siklus sehingga bentuk gelombang arus maupun tegangan keluarannya tidak sama

dengan gelombang masukannya (mengalami distorsi). Beban non linier yang umumnya merupakan peralatan elektronik yang didalamnya banyak terdapat komponen semi konduktor, dalam proses kerjanya berlaku sebagai saklar yang bekerja pada setiap siklus gelombang dari sumber tegangan. Proses kerja ini akan menghasilkan gangguan atau distorsi gelombang arus yang tidak sinusoidal. Bentuk gelombang ini tidak menentu dan dapat berubah menurut pengaturan pada parameter komponen semi konduktor dalam peralatan elektronik. Perubahan bentuk gelombang ini tidak terkait dengan sumber tegangannya.

Beberapa peralatan yang dapat menyebabkan timbulnya harmonik antara lain komputer, printer, lampu fluorescent yang menggunakan elektronik ballast, kendali kecepatan motor, motor induksi, batere charger, proses eletroplating, dll. Peralatan ini dirancang untuk menggunakan arus listrik secara hemat dan efisien karena arus listrik hanya dapat melalui komponen semi konduktornya selama periode pengaturan yang telah ditentukan. Namun disisi lain hal ini akan menyebabkan gelombang mengalami gangguan gelombang arus dan tegangan yang pada akhirnya akan kembali ke bagian lain sistem tenaga listrik. Penomena ini akan menimbulkan gangguan beban tidak linier satu phase. Hal di atas banyak terjadi pada distribusi yang memasok pada areal perkantoran/komersial. Sedangkan pada areal perindustrian gangguan yang terjadi adalah beban non linier tiga phase yang disebabkan oleh motor listrik, kontrol keepatan motor, batere charger, electroplating, dapur busur listrik, dll.

2.2.11.3 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 arus, nilai THD nya didefinisikan seperti berikut:

$$THD_I = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2}}{I_1} \times 100\% \dots\dots\dots 2.34$$

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

$$THD_V = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} V_h^2}}{V_1} \times 100\% \dots\dots\dots 2.35$$

Dimana :

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

2.2.11.4 Individual harmonic distortion

Merupakan ukuran yang digunakan untuk melihat seberapa besar nilai harmonik yang terkandung pada tiap orde. *Individual harmonic distortion* adalah hasil perbandingan antara RMS harmonik individu dengan RMS fundamental, secara rumus perhitungan didefinisikan sebagai berikut:

$$IHD = \frac{I_{rms}^h}{I_{rms}^{(1)}} \dots\dots\dots 2.36$$

Keterangan :

IHD = Individual harmonic distortion orde harmonik ke-h (h=2,3,4,..)

I_{rms}^h = Nilai RMS arus atau tegangan orde harmonik ke-h

$I_{rms}^{(1)}$ = Nilai RMS arus atau tegangan fundamental (dasar)

2.2.11.5 Batas standar Harmonisa

Beberapa dokumen mengenai standar batasan harmonik pada sistem tenaga listrik telah dipublikasikan, diantaranya adalah standar IEEE 519-1992, 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 no 519 tahun 1992.

Nugroho S.S (2018) menyebutkan bahwa *Institute of Electrical and Electronic Engineering* (IEEE) adalah suatu lembaga internasional yang memiliki wewenang untuk melakukan riset dan penelitian dan analisa untuk memberikan sebuah batas standar untuk dijadikan acuan referensi dalam bidang kelistrikan dan elektronika di beberapa negara.

Ewarld F. Fuchs dan Mohammad A.S. Masoum (2008) menerangkan bahwa IEEE 519-1992 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 2.3 Batas *Total Harmonic Distortion* tegangan

Nominal Voltage	Individual Harmonik Orde	Total Harmonic Distortion
$V \leq 69 \text{ KV}$	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 2.4 Batas *Total Harmonic Distortion* arus

SCA/ I_L	Individual Harmonic Order (h) Current Distortion Limit					THD
	$h < 11$	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$h \geq 35$	
$V_{Supply} \leq 69 \text{ KV}$						

Tabel 2.5 Batas Total Harmonic Distortion arus (lanjutan)

< 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 %
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 %

2.2.11.6 Efek Harmonisa

Banyak sekali efek dari harmonik pada sistem tenaga listrik, 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:

1. Merusak kapasitor bank karena terjadinya resonansi harmonik.
2. Meningkatnya panas *eddy current* , menimbulkan fluk harmonik dan fluk *density* pada *transformator* meningkat.
3. Adanya arus pada kawat netral sehingga menyebabkan kabel menjadi panas.
4. Pemutus beban dapat bekerja dibawah arus pengenalnya atau mungkin tidak bekerja pada arus pengenal, sehingga menimbulkan kegagalan proteksi.
5. Timbulnya getaran mekanik pada panel listrik yang merupakan getaran akibat resonansi mekanis akibat harmonik arus frekuensi tinggi.
6. 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.

2.2.12 Power Quality and Energy Analyze

Metrel MI 2892 merupakan sebuah alat ukur yang digunakan untuk melakukan pengukuran dan analisi kualitas daya listrik yang didesain dengan tampilan warna grafis yang besar dan mudah dibaca yang memungkinkan pengguna bisa mendeteksi harmonik, fasor, anomali gelombang, dan lain lain dalam suatu instalasi dengan cara menghubungkan alat ini. Alat instrumen ini dirancang untuk melakukan pengukuran dengan durasi rekaman jangka panjang untuk mengukur kualitas daya pada sistem distribusi listrik tiga fasa atau fasa tunggal.



Gambar 2.16 Power Quality and Energy Analyze

(Sumber: <https://www.metrel.si/en/shop/PQA/mi-2892.html>, diakses pada 1 Desember 2018)