

BAB II

LANDASAN TEORI

2.1. Tinjauan Pustaka

Untuk membantu pembuatan proyek akhir ini, dibutuhkan adanya beberapa referensi yang dapat menjadi acuan dalam melakukan penelitian berikut beberapa referensi yang digunakan dalam penelitian:

1. C.Sankaran. 2002 ,dalam bukunya yang berjudul **POWER QUALITY**. Menjelaskan tentang pengaruh harmonisa terhadap transformator.
2. SPLN D5.004-21.2012 Dalam bukunya yang berjudul **POWER QUALITY (REGULASI HARMONISA,FLICKER DAN KETIDAK SEIMBANGAN TEGANGAN)**. Menjelaskan tentang batasan maksimum *level* distorsi harmonisa yang di perbolehkan.
3. Rekomendasi IEEE Std C57.110-1998 dalam bukunya yang berjudul **IEEE RECOMMENDED PRACTICE FOR ESTABILISHING TRANSFORMER CAPABILITY WHEN SUPPLYING NONSINUSOIDAL LOAD CURRENTS**. Menjelaskan tentang cara perhitungan rugi-rugi akibat harmonisa pada trafo.

2.2. Landasan Teori

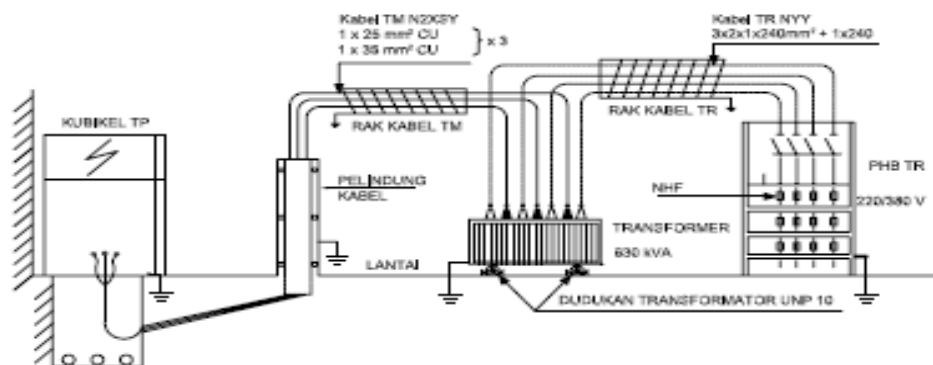
2.2.1. Gardu Distribusi

Gardu distribusi merupakan salah satu komponen dari suatu sistem distribusi yang berfungsi untuk menghubungkan jaringan ke konsumen atau untuk membagikan atau mendistribusikan tenaga listrik pada beban dan konsumen baik konsumen tegangan menengah maupun konsumen tegangan rendah. Gardu distribusi terdiri dari instalasi Perlengkapan Hubung Bagi Tegangan Menengah (PHB-TM), tansformator distribusi, Perlengkapan Hubung Bagi Tegangan Rendah (PHB-TR), pengukuran untuk pelanggan tegangan menengah, dan proteksi. Gardu distribusi 20 kV berfungsi sebagai tempat pengumpul, pembagi, proteksi dan penyalur energi listrik bagi para pelanggan.

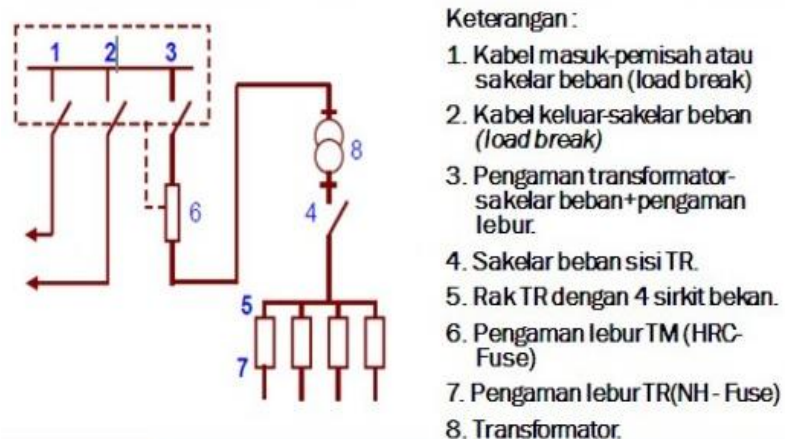
Secara garis besar gardu distribusi dibedakan berdasarkan jenis konstruksinya yakni gardu beton dan gardu tiang

1. Gardu Beton

Gardu Beton yaitu gardu distribusi yang bangunan pelindungnya terbuat dari beton (campuran pasir, batu dan semen). Gardu beton termasuk gardu jenis pasangan dalam, karena pada umumnya semua peralatan penghubung / pemutus, pemisah dan trafo distribusi terletak di dalam bangunan beton. Dalam pembangunannya semua peralatan tersebut di disain dan diinstalasi di lokasi sesuai dengan ukuran bangunan gardu. Konstruksi ini dimaksudkan untuk pemenuhan persyaratan terbaik bagi keselamatan ketenagalistrikan Gambar dibawah memperlihatkan sebuah gardu distribusi konstruksi beton.



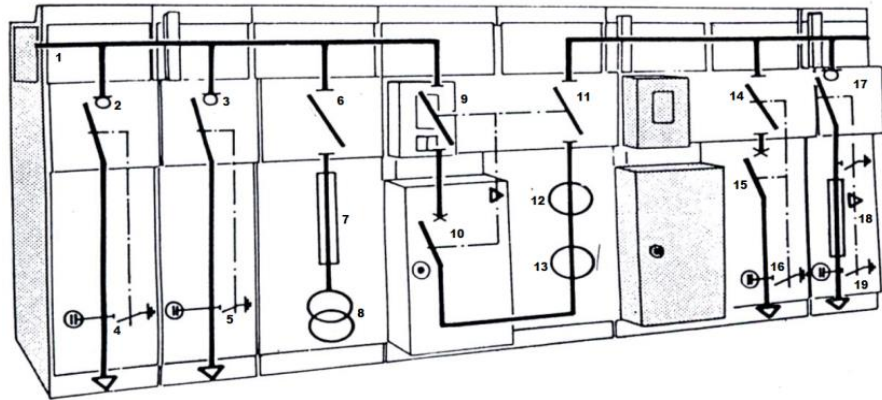
Gambar 2.1 Instalasi Gardu Beton



Gambar 2.2 Single Line Gardu Beton

Adapun komponen-komponen yang terdapat pada gardu distribusi tipe beton :

a. Kubikel



Gambar 2.3 Single Line Kubikel

Keterangan Gambar :

1.	Busbar (Rel)	11.	Kontak Penggerak PMS
2.	LBS Incoming	12.	CT (Trafo Arus)
3.	LBS Out Going	13.	CT (Trafo Arus)
4.	Saklar Pentanahan	14.	Kontak Penggerak PMT
5.	Saklar Pentanahan	15.	Kontak PMT
6.	PMS (Pemisah)	16.	Saklar Pentanahan
7.	Fuse TM	17.	LBS
8.	Trafo Tegangan (PT)	18.	Fuse TM
9.	Kontak Penggerak PMS	19.	Saklar Pentanahan
10.	Kontak PMT		

b. Transformator Distribusi

Transformator distribusi digunakan untuk menurunkan tegangan 20 kV menjadi 230/400 Volt dengan nilai arus yang cukup besar berdasarkan kapasitas yang dimiliki trafo tersebut. Kapasitas yang digunakan oleh pihak PT PLN berkisar 100 kVA-1000 kVA. Ketentuan PT PLN untuk pengadaan trafo pada pelanggan khusus adalah pelanggan

menyediakan trafo sendiri untuk kebutuhan masing-masing dan ruang tempat trafo pelanggan tidak di dalam gardu distribusi milik PT PLN. Melainkan berada pada gardu milik pelanggan.

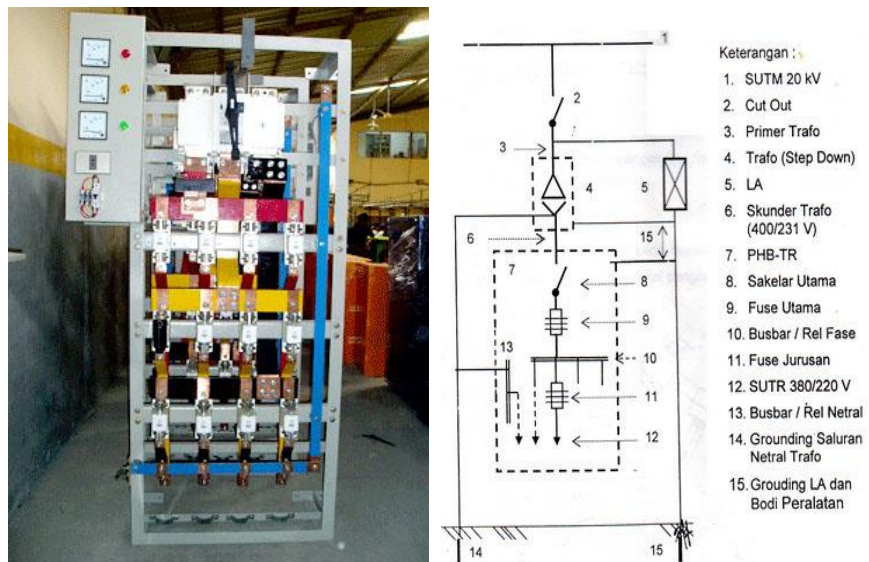


Gambar 2.4 Transformator Distribusi

c. Perangkat Hubung Bagi Tegangan Rendah (PHB-TR)

PHB-TR adalah suatu kombinasi dari satu atau lebih perlengkapan hubung bagi tegangan rendah dengan peralatan kontrol, peralatan ukur, pengaman dan kendali yang saling berhubungan. Keseluruhannya dirakit lengkap dengan sistem pengawatan dan mekanis pada bagian-bagian penyangganya. Jumlah jurusan per transformator atau gardu distribusi sebanyak-banyaknya 8 jurusan, disesuaikan dengan besar daya transformator dan Kemampuan Hantar Arus (KHA) penghantar JTR yang digunakan.

Sebagai peralatan sakelar utama saluran masuk PHB-TR, dipasangkan Pemutus Beban (LBS) atau NFB (*No Fused Breaker*).



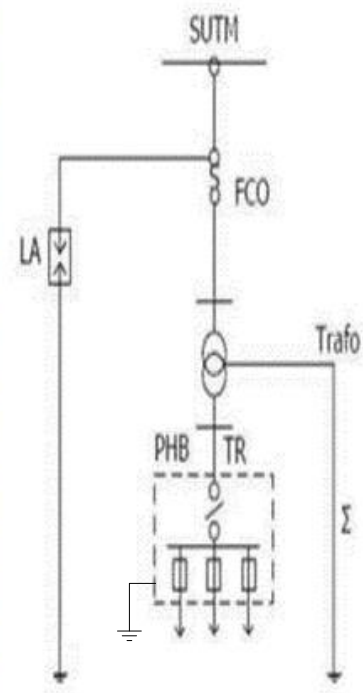
Gambar 2.5 Konstruksi dan Diagram Satu Garis PHB TR

2. Gardu Tiang

Gardu Tiang, yaitu gardu distribusi yang bangunan pelindungnya / penyangganya terbuat dari tiang. Dalam hal ini trafo distribusi terletak di bagian atas tiang. Karena trafo distribusi terletak pada bagian atas tiang, maka gardu tiang hanya dapat melayani daya listrik terbatas, mengingat berat trafo yang relatif tinggi, sehingga tidak mungkin menempatkan trafo berkapasitas besar di bagian atas tiang (± 5 meter di atas tanah). Untuk gardu tiang dengan trafo satu fasa kapasitas yang ada maksimum 50 kVA, sedang gardu tiang dengan trafo tiga fasa kapasitas maksimum 160 kVA.

a. Gardu Portal

Gardu portal adalah gardu listrik tipe terbuka (outdoor) yang memakai konstruksi tiang/menara kedudukan transformator minimal 3 meter diatas platform. Umumnya memakai tiang beton ukuran 2x500 daN. Gambar dibawah memperlihatkan sebuah gardu distribusi tiang tipe portal lengkap dengan perlengkapan proteksinya dan panel distribusi tegangan rendah yang terletak di bagian bawah tiang (tengah).



Gambar 2.6 Konstruksi dan Diagram Satu Garis Gardu Portal

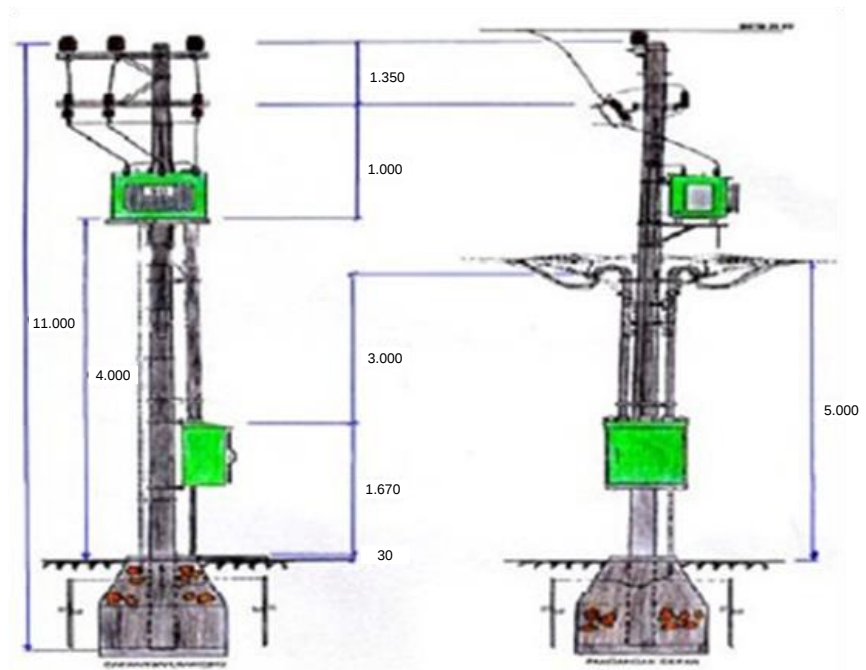
Perlengkapan yang ada pada gardu portal terdiri atas :

- 1) Fuse cut out
- 2) *Lightening Arrester*
- 3) Transformer tipe 250, 315, 400 KVA
- 4) Satu lemari PHB tegangan rendah maksimal 4 jurusan
- 5) Isolator tumpu atau gantung

Lemari PHB TR dipasang minimal 1,2 meter diatas permukaan tanah atau 1,5 meter pada daerah yang sering terkena banjir. Pada beberapa tempat gardu portal juga dipasang trafo arus untuk pengukuran alat ukur pelanggan-pelanggan tegangan rendah.

b. Gardu Cantol

Gardu cantol adalah tipe gardu listrik dengan transformator yang dicantolkan pada tiang listrik besamya kekuatan tiang minimal 500 daN.



Gambar 2.7 Konstruksi Gardu Cantol

Untuk komponen pada gardu cantol hampir sama dengan gardu portal tetapi ada beberapa bagian yang secara ukuran atau kapasitas lebih kecil.

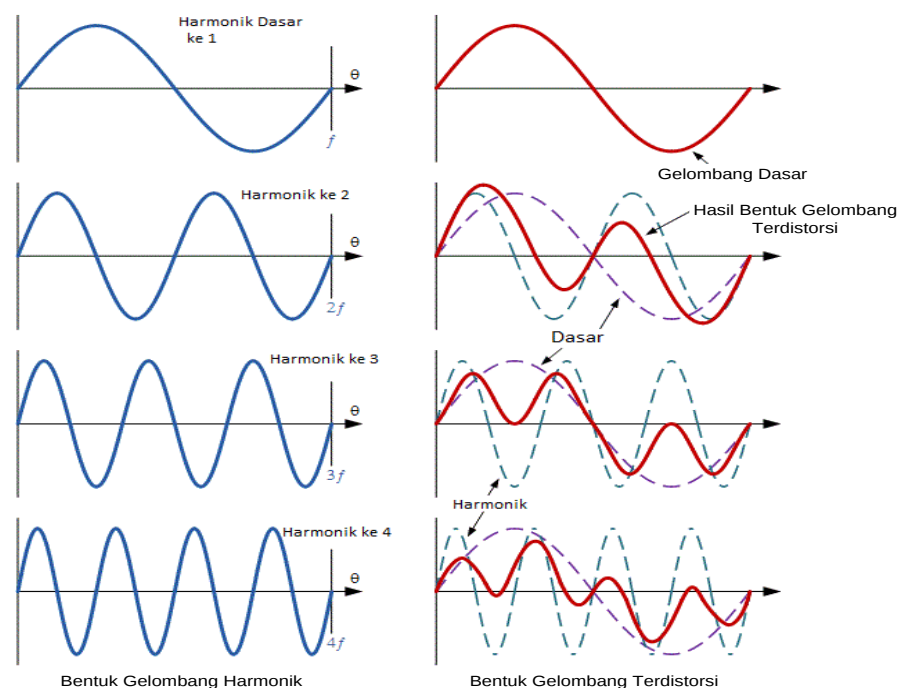
2.2.2. Harmonisa

Pada sistem tenaga listrik, daya yang di distribusikan adalah pada level tegangan dengan frekuensi tunggal (50 Hz), tetapi karena perkembangan beban listrik yang semakin pesat dan kompleks, terutama penggunaan beban-beban *non linier*, akan menimbulkan perubahan pada bentuk gelombang sinusnya, gangguan harmonik tergolong dalam distorsi bentuk gelombang yang menyebabkan terjadinya perubahan pada bentuk gelombang dasarnya.

Pembangkit gelombang sinus tegangan dianggap memiliki bentuk yang *ideal*, namun semakin berkembang dan *kompleksnya* beban maka distorsi yang terjadi semakin meningkat. Pada beberapa titik, bentuk gelombang arus dan tegangan akan terdistorsi sebagai akibat dari karakteristik beban. Distorsi bentuk

gelombang tersebut adalah acak, tetapi pada kasus ini bentuk distorsinya harmonisa. Gejala ini menyebabkan terjadinya perubahan bentuk gelombang.

Pada dasarnya, harmonisa adalah gejala pembentukan gelombang-gelombang dengan frekuensi berbeda yang merupakan perkalian bilangan bulat dari frekuensi dasarnya. Pembentukan gelombang *non sinusoidal* hasil distorsi harmonisa dapat dilihat pada gambar di bawah:

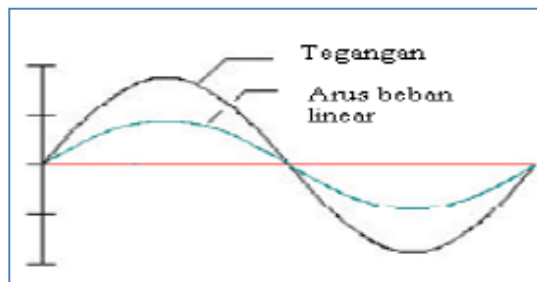


Gambar 2.8 Bentuk Gelombang Hasil Distorsi Harmonisa

1. Beban linier dan non linier

a. Beban Linier

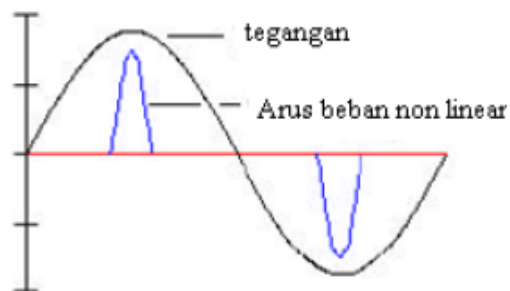
Beban *linier* adalah beban yang komponen arusnya proporsional terhadap tegangannya. Terdapat hubungan yang *linier* antara arus dan tegangan sehingga bentuk gelombang arus akan sama dengan bentuk gelombang tegangannya, seperti yang terlihat pada gambar di bawah ini. Beban linier menyerap arus *sinusoidal* bila disuplai oleh tegangan *sinusoidal*. Contoh beban *linier* antara lain motor listrik, pemanas, lampu pijar, dan lainnya



Gambar 2.9 Bentuk Gelombang Arus dan Tegangan Pada Beban *Linier*

b. Beban Non Linier

Beban yang komponen arusnya tidak proporsional terhadap komponen tegangannya, sehingga bentuk gelombang arusnya tidak sama dengan bentuk gelombang tegangannya. Tidak terdapat hubungan yang *linier* antara arus dan tegangan. Beban *non-linier* menyerap arus non sinusoidal demikian juga arus harmonisa, walaupun disuplai oleh tegangan *sinusoidal*. Seperti gambar di bawah ini. Contoh beban *non-linier* antara lain penyearah, UPS, komputer, pengaturan kecepatan motor, lampu-lampu pelepasan, alat-alat *feromagnetik*, motor DC, dan tungku busur api, dan lain-lainnya.



Gambar 2.10 Bentuk Gelombang Arus dan Tegangan Pada Beban *Non Linier*

2.2.3. Istilah-istilah dan standar harmonik

Sebelum membahas lebih lanjut, maka terlebih dahulu perlu diketahui mengenai beberapa istilah penting dalam harmonisa. Berikut ini adalah beberapa istilah-istilah dan persamaan yang terdapat dalam analisis harmonik:

1. Orde Harmonik

Orde harmonik adalah perbandingan frekuensi harmonik dengan frekuensi dasar, dapat didefinisikan dengan persamaan berikut:

$$n = \frac{f_n}{F} \dots\dots\dots(2.1)$$

Dimana:

n = Orde harmonik

f_n = Frekuensi harmonik ke-n

F = Frekuensi dasar

Gelombang dengan frekuensi dasar tidak dianggap sebagai harmonik, yang dianggap sebagai harmonik adalah orde ke-2 sampai ke-n.

2. Individual Harmonik Distortion (IHD)

Distorsi Harmonik Individu (IHD) merupakan rasio tegangan atau arus antara nilai RMS harmonik dengan nilai RMS dasar (*fundamental*)

$$IHD = \frac{IHD_h}{I_1} \times 100\% \dots\dots\dots(2.2)$$

Dimana :

IHD = IHD orde harmonik ke-h (%)

IHD_h = Nilai RMS arus atau tegangan harmonik ke-h

I_1 =Nilai RMS arus atau tegangan dasar(*Fundamental*)

3. Total Harmonik Distortion (THD)

Total Distorsi Harmonik (THD) merupakan rasio nilai rms dari komponen harmonisa dengan nilai rms dari komponen dasar yang biasanya dinyatakan dalam persen (%)

Nilai THD dijadikan batasan tegangan atau arus harmonik yang masih dapat ditoleransi dalam suatu sistem tenaga listrik. Dengan adanya parameter ini, maka dapat dilihat apakah distorsi yang terjadi dalam kondisi yang masih bisa

diterima sistem atau tidak. Nilai ini untuk arus ataupun tegangan dapat dihitung dengan rumus sebagai berikut:

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{n=\infty} M_n^2}}{M_1} \dots\dots\dots(2.3)$$

Dimana:

THD = *Total harmonic distortion* (%)

M_n = Nilai rms arus / tegangan harmonik ke-n

M₁ = Nilai rms arus / tegangan pada frekuensi dasar

Besarnya pengaruh harmonik pada sistem tenaga ditentukan oleh besarnya THD yang dihasilkan.

4. Total Demand Distortion (TDD)

Tingkat distorsi arus dapat dilihat dari THD, namun hal tersebut dapat saja salah saat diinterpretasikan, aliran arus yang kecil dapat memiliki nilai THD yang tinggi namun tidak menjadi ancaman yang dapat merusak sistem. Beberapa analisis mencoba untuk menghindari kesulitan seperti ini dengan melihat THD pada arus beban puncak frekuensi dasar dan bukan melihat sampel sesaat pada frekuensi dasar. Hal ini disebut *total deman distortion* atau distorsi permintaan total (TDD). Rumus dari TDD adalah:

$$TDD = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{n=\infty} I_n^2}}{I_L} \dots\dots\dots(2.4)$$

Dimana :

I_n = Arus harmonik orde ke-n

I_L = Arus beban puncak pada frekuensi dasar yang diukur pada PCC (*Point Of Common Coupling*).

5. Nilai rms

Nilai rms yang dihasilkan oleh gelombang arus/tegangan yang terdistorsi harmonik dapat didefinisikan dengan persamaan berikut:

$$rms = \sqrt{\sum_{h=1}^{h_{max}} M_h^2} = M_1 \sqrt{1 + THD^2} \dots\dots\dots(2.5)$$

Dimana:

M_h = Nilai rms dari arus atau tegangan ke-h

M_1 = Nilai rms arus atau tegangan pada frekuensi dasar.

6. Standart Harmonik

Ada berbagai batas distorsi harmonik di beberapa negara. Kebanyakan menggunakan batas distorsi yang dikeluarkan oleh standar IEEE 519-1992 begitu juga dalam SPLN-D5.004-1.2012 juga menggunakan standart ini, berikut adalah tabel standart THD arus dan tegangan.

Tabel 2.1 Standar Harmonisa Tegangan

Tegangan Pada Titik Sambung (Vn)	IHD _v (%)	THD _v (%)
$V_n \leq 66 \text{ kV}$	3	5
$66 \text{ kV} < V_n \leq 150 \text{ kV}$	1,5	2,5
$V_n > 150 \text{ kV}$	1	1,5

Dimana : V_n = Tegangan nominal sistem

Tabel 2.2 Standart Harmonisa Arus

$V_n \leq 66 \text{ kV}$						
I _{hs} / I _L	Distorsi Harmonisa Arus Maksimum Dalam Persen IL					
	Orde Harmonik Individual "h" Harmonisa Ganjil					Total Harmonic Distortion (%)
	$h < 11$	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h \leq 35$	$35 < h$	
<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%

Untuk mencari nilai arus hubung singkat I_{sc} dapat digunakan rumus berikut:

$$I_{sc} = \frac{kVA}{Z \times \sqrt{3} \times KV} \dots\dots\dots(2.6)$$

Dimana:

- I_{sc} = Arus hubung singkat maksimum (A)
- Z = Impedansi pada daya trafo terpasang (%)
- KV = Tegangan nominal pada trafo
- kVA = Kapasitas Daya Trafo

2.2.4. Pengaruh Harmonisa Pada Transformator

Pengaruh harmonisa menyebabkan peningkatan rugi-rugi pada trafo, rugi-rugi yang disebabkan harmonisa arus dan tegangan bergantung pada frekuensi. Peningkatan frekuensi menyebabkan peningkatan rugi-rugi. Harmonisa frekuensi tinggi adalah penyebab pemanasan utama dibandingkan dengan harmonisa frekuensi rendah.

Harmonisa arus menyebabkan peningkatan rugi-rugi tembaga dan rugi-rugi *fluks*. Sedangkan harmonisa tegangan menyebabkan peningkatan rugi-rugi besi dan peningkatan stress pada isolasi. *Efek* keseluruhannya adalah pemanasan berlebih bila dibandingkan dengan operasi dengan gelombang sinus murni.

Transformator dirancang untuk menyalurkan daya yang dibutuhkan ke beban dengan rugi-rugi minimum pada frekuensi fundamentalnya. Arus harmonisa dan juga tegangan secara *signifikan* akan menyebabkan panas lebih.

Ada tiga pengaruh yang menimbulkan panas lebih pada trafo ketika arus beban mengandung komponen harmonisa:

1. Arus rms.

Jika trafo kapasitasnya hanya untuk daya yang dibutuhkan beban, maka arus harmonisa dapat mengakibatkan arus rms

trafo menjadi lebih besar dari kapasitasnya. Arus rms yang meningkat dapat menyebabkan rugi-rugi pada penghantar.

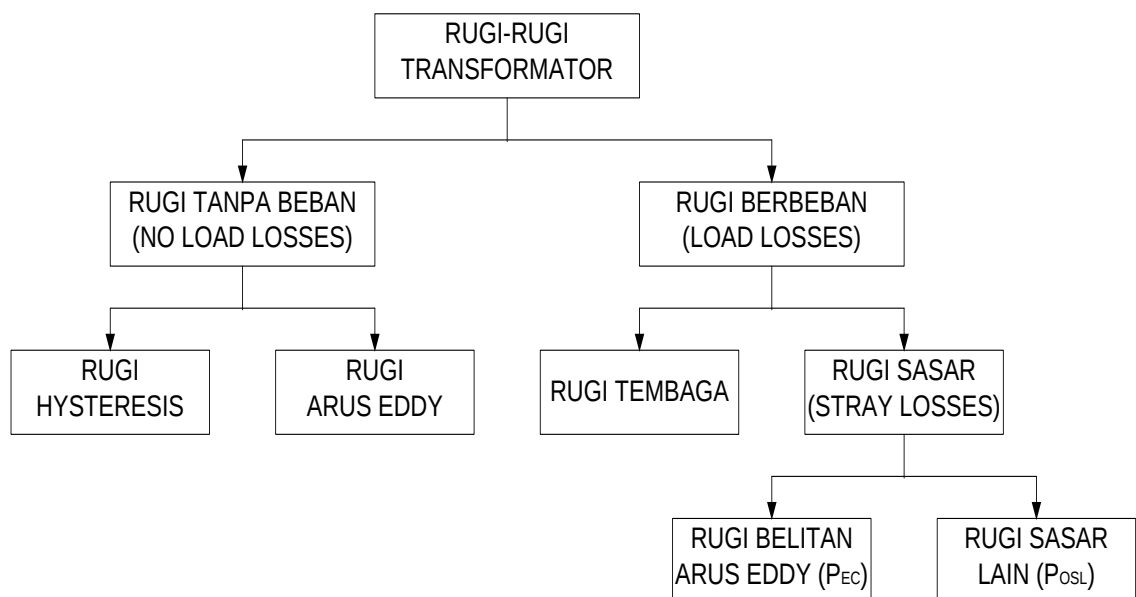
2. Eddy-current losses.

Di dalam trafo terdapat arus induksi yang timbul karena adanya *flux magnetik*. Arus induksi ini mengalir di belitan, inti, dan dibadan penghantar lain yang terlindungi oleh medan magnet dari trafo dan menyebabkan panas lebih. Komponen rugi-rugi trafo ini meningkat dengan kuadrat dari frekuensi arus penyebab *eddy-current*. Oleh karena itu, ini menjadi komponen yang sangat penting dari rugi-rugi trafo yang menyebabkan pemanasan oleh harmonisa.

3. Rugi inti.

Peningkatan rugi inti yang disebabkan harmonisa bergantung pada pengaruh harmonisa pada tegangan yang diberikan dan rancangan dari inti trafo. Semakin besar distorsi tegangan maka semakin tinggi pula *eddy current* di *laminasi* inti. Peningkatan rugi inti karena harmonisa tidak sekritis dua rugi-rugi di atas.

2.2.5. Rugi - Rugi Pada Transformator



Gambar 2.11 Rugi-Rugi Pada Transformator

Menurut standar IEEE C57.110-1998, rugi-rugi pada trafo terdiri dari rugi tanpa beban dan rugi berbeban. Rugi tanpa beban terdiri dari rugi *hysteresis* dan rugi arus eddy sedangkan rugi berbeban dibagi menjadi rugi tembaga (I^2R) dan rugi sasar. Rugi sasar terbagi lagi antar rugi belitan arus eddy dan rugi sasar lain. Rugi tembaga dapat dinyatakan dalam persamaan berikut:

$$P_{cu} = I^2 \cdot R \dots\dots\dots(2.7)$$

Dimana:

P_{cu} = Rugi tembaga (W)

I = Arus yang mengalir pada kumparan (A)

R = Tahanan dari kumparan (Ω)

Bila arus beban rms meningkat akibat adanya harmonisa maka rugi tembaga menjadi:

$$I = \sqrt{\sum_{h=1}^{h=h_{max}} (I_h)^2} \dots\dots\dots(2.8)$$

Dimana :

I = Nilai rms arus beban (Ampere)

h = Orde harmonisa (1,2,3,4, dst)

I_h = Arus beban rms pada orde harmonisa ke h (Ampere)

Sedangkan rugi belitan arus eddy akibat adanya harmonisa dapat dinyatakan dalam bentuk:

$$P_{EC} = P_{EC-R} \sum_{h=1}^{h=h_{max}} \left(\frac{I_h}{I_R}\right)^2 h^2 \dots\dots\dots(2.9)$$

Dimana:

P_{EC} = Rugi belitan arus eddy (W)

P_{EC-R} = Rugi belitan arus eddy kondisi terukur (W)

I_h = Arus beban rms pada orde harmonisa ke h (A)

I_R = Arus rms dasar pada kondisi beban terukur(A)

h = Orde harmonisa (1,2,3,4, dst)

Dan rugi sasar lain akibat adanya harmonisa dapat dinyatakan dengan:

$$P_{OSL} = P_{OSL-R} \sum_{h=1}^{h=h_{max}} \left(\frac{I_h}{I_R} \right)^2 h^{0,8} \dots\dots\dots(2.10)$$

Dimana:

P_{OSL} = Rugi sasar lain (W)

P_{OSL-R} = Rugi sasar lain kondisi terukur (W)

I_h = Arus beban rms pada orde harmonisa ke h (A)

I_R = Arus rms dasar pada kondisi beban terukur(A)

h = Orde harmonisa (1,2,3,4, dst)

Maka rugi-rugi berbeban dapat didefinisan menjadi:

$$P_{LL} = P + P_{EC} + P_{OSL} \dots\dots\dots(2.11)$$

Dimana:

P_{LL} = Rugi berbeban

P_{CU} = Rugi tembaga.

P_{EC} = Rugi belitan arus eddy

P_{OSL} = Rugi sasar lain

Sedangkan rugi tanpa beban adalah rugi yang terdapat dalam inti trafo yang terdiri dari rugi histerisis dan rugi arus eddy, Sehingga rugi inti trafo secara keseluruhan dapat dinyatakan sebagai berikut:

$$P_{NL} = P_h + P_e \dots\dots\dots(2.12)$$

Dimana:

P_{NL} = Rugi tanpa beban (W)

P_h = Rugi histerisis (W)

P_e = Rugi eddy current (W)

Rugi Histerisis dapat dinyatakan dalam persamaan sebagai berikut:

$$P_h = K_h \cdot f \cdot B_{mak}^x \dots\dots\dots(2.13)$$

Rugi Eddy Current dapat dinyatakan dalam persamaan sebagai berikut:

$$P_e = K_e \cdot f^2 \cdot B_{mak}^2 \dots \dots \dots (2.14)$$

Dimana:

- P_h = Rugi Histerisis (W)
- P_e = Rugi Eddy Current (W)
- K_h = Konstanta yang tergantung pada *volume* dan kualitas bahan inti dan unit yang digunakan.
- K_e = Konstanta yang harganya tergantung pada *resistifitas* dan bahan inti dan unit, ketebalan dari laminasi dan unit yang digunakan.
- f = Frekuensi dari *fluksi* bolak-balik (Hz)
- x = *Konstanta steinmetz* merupakan suatu *eksponen* berubah dari 1,5 sampai 2,5 tergantung pada sifat *magnetik* dari bahan inti.
- B_{max} = Kerapatan *fluksi* maksimum dari inti

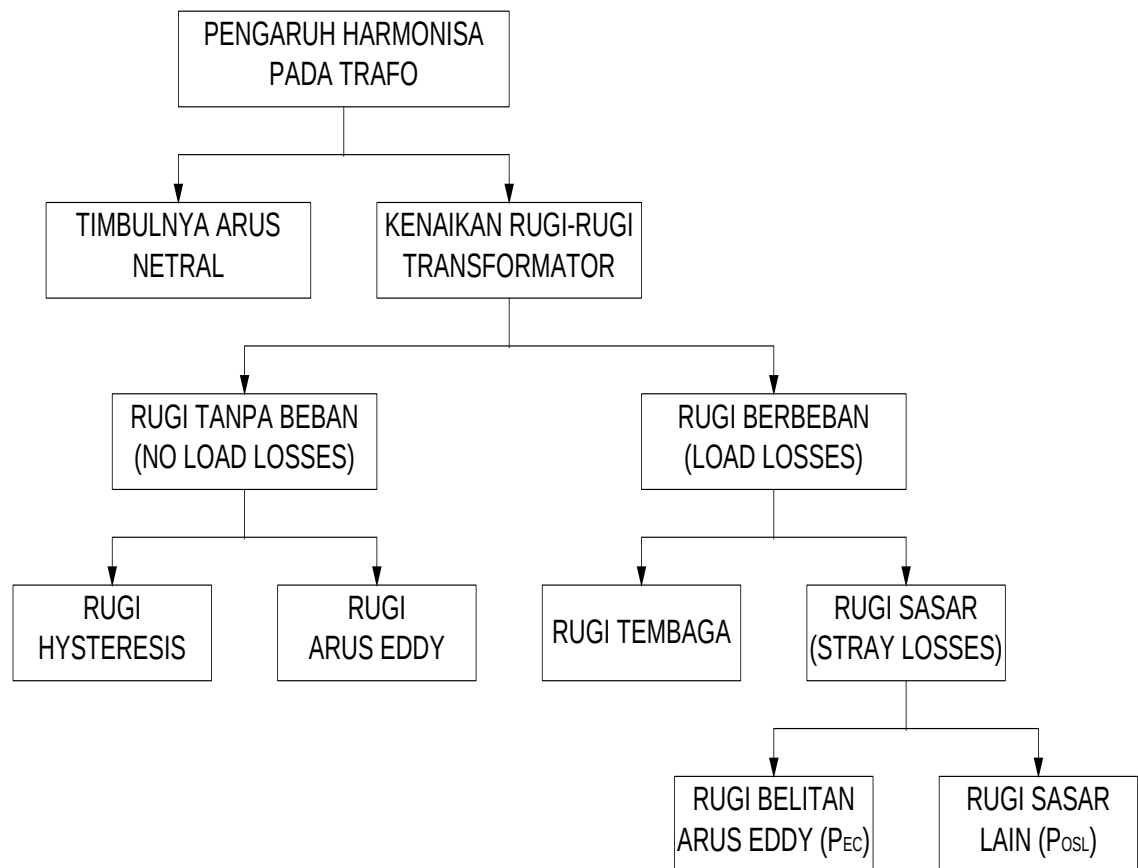
Sehingga dari keterangan diatas rugi-rugi trafo keseluruhan adalah

$$P_{LS-Total} = P_{NL} + P_{LL} \dots \dots \dots (2.15)$$

Dimana:

- $P_{LS-Trafo}$ = Rugi total trafo (W)
- P_{NL} = Rugi tanpa beban (W)
- P_{LL} = Rugi berbeban (W)

2.3. Kerangka Pemikiran



Gambar 2.12 Kerangka Pemikiran