



UNIVERSITAS INDONESIA

**ANALISIS PERHITUNGAN RUGI-RUGI DAYA
TRANSFORMATOR KARENA HARMONIK**

SKRIPSI

**Diajukan sebagai salah satu persyaratan menjadi sarjana teknik pada
program Sarjana Teknik**

**CANDRA AGUSMAN
0806365583**

**UNIVERSITAS INDONESIA
FAKULTAS TEKNIK
PROGRAM SARJANA EKSTENSI
DEPOK
JANUARI 2011**

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

**Skripsi ini adalah hasil karya saya sendiri,
dan semua sumber baik yang dikutip maupun dirujuk
telah saya nyatakan dengan benar.**

Nama : Candra Agusman

NPM : 0806365583

Tanda Tangan : 

Tanggal : 6 Januari 2011

HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh :

Nama : Candra Agusman

NPM : 0806365583

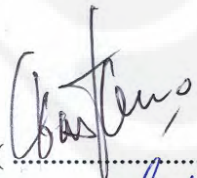
Program Studi : Teknik Elektro

Judul Skripsi : Analisis Perhitungan Rugi-Rugi Daya Transformator karena Harmonik

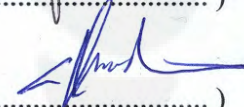
Telah berhasil dipertahankan di hadapan Dewan Penguji dan diterima sebagai bagian persyaratan yang diperlukan untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik pada Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Indonesia

DEWAN PENGUJI

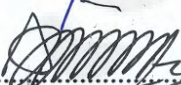
Pembimbing : Ir Agus R. Utomo, MT

()

Penguji : Ir I Made Ardita Y, MT

()

Penguji : Aji Nur Widyanto ST, MT

()

Ditetapkan di : Depok

Tanggal : 3 Januari 2011

UCAPAN TERIMAKASIH

Puji syukur saya panjatkan kepada Allah SWT, karena atas berkat dan rahmat-Nya, saya dapat menyelesaikan skripsi ini. Penulisan skripsi ini dilakukan dalam rangka memenuhi salah satu syarat untuk mencapai gelar Sarjana Teknik Jurusan Elektro pada Fakultas Teknik Universitas Indonesia.

Dalam penyusunan skripsi ini, penulis banyak mendapatkan bantuan baik materil maupun moril dari berbagai pihak. Oleh karena itu, penulis mengucapkan terima kasih kepada :

- Kedua Orang Tua dan seluruh keluarga besar yang telah memberikan dukungan doa dan motivasi.
- Ir Agus R. Utomo, MT selaku dosen pembimbing yang telah menyediakan waktu, tenaga, dan pikiran untuk mengarahkan saya dalam penyusunan skripsi ini.
- Rekan-rekan kerja karyawan Elektrik Plant 6/11 PT. Indocement Tungal Prakarsa Tbk yang senantiasa membantu dalam proses pengambilan data.
- Semua pihak yang telah membantu pembuatan skripsi ini yang tidak dapat disebutkan satu-persatu.

Harapan penulis kiranya skripsi ini dapat memberikan pengetahuan yang bermanfaat bagi penulis khususnya dan pembaca pada umumnya. Semoga Allah SWT senantiasa melimpahkan rahmat dan hidayah pada kita semua. Amin.

Depok, 10 Desember 2010

Penulis

HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI TUGAS AKHIR UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS

Sebagai sivitas akademik Universitas Indonesia, saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Candra Agusman

NPM : 0806365583

Program Studi : Teknik Elektro

Departemen : Elektro

Fakultas : Teknik

Jenis karya : Skripsi

demikian pengembangan ilmu pengetahuan, menyetujui untuk memberikan kepada Universitas Indonesia **Hak Bebas Royalti Noneksklusif (*Non-exclusive Royalty-Free Right*)** atas karya ilmiah saya yang berjudul :

” ANALISIS PERHITUNGAN RUGI RUGI DAYA TRANSFORMATOR KARENA HARMONIK”

berserta perangkat yang ada (jika diperlukan). Dengan Hak Bebas Royalti Noneksklusif ini Universitas Indonesia berhak menyimpan, mengalihmedia/formatkan, mengelola dalam bentuk pangkalan data (*database*), merawat, dan memublikasikan tugas akhir saya tanpa meminta izin dari saya selama tetap mencantumkan nama saya sebagai penulis/pencipta dan sebagai pemilik Hak Cipta.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di : Depok

Pada tanggal : 6 Januari 2011

Yang menyatakan

(Candra Agusman)

ABSTRAK

Nama : Candra Agusman
Program Studi : Teknik Elektro
Judul : ANALISIS PERHITUNGAN RUGI-RUGI DAYA TRANSFORMATOR KARENA HARMONIK

Aplikasi beban non linier merupakan salah satunya komponen yang membuat arus sistem menjadi sangat terdistorsi dengan persentase kandungan harmonik arus THD (*Total Harmonic Distortion*) yang sangat tinggi. Dari hasil pengukuran di PT. Indocement Tunggal Prakarsa, Tbk diketahui bahwa pada salah satu transformator daya yaitu pada transformator 1 terdapat harmonik dengan persentase THD arus sebesar 25.57 % yang melebihi batas IEEE 519-1992 yang diijinkan yaitu 15 %. Oleh karena itu, pada penulisan ini akan dijelaskan hasil pengamatan pengaruh distorsi harmonik pada kinerja transformator daya sebagai salah satu komponen dasar sistem tenaga listrik. Kinerja transformator daya dapat ditentukan melalui parameter rugi-rugi daya yang terjadi pada transformator pada saat melayani beban non linier. Distorsi harmonik mengakibatkan nilai rugi-rugi daya pada tranformator bertambah proporsional terhadap besar arus komponen-komponen harmonik yang terdapat di dalam arus beban. Berdasarkan hasil analisis semakin tinggi total arus harmonik pada transformator (25.57%) maka semakin tinggi pula rugi-rugi beban (215149.442W) semakin besar arus harmonik makin besar pula rugi-rugi daya yang terjadi pada trafo.

Kata Kunci : THD (*total harmonic distortion*), Transformator Daya (Power Transformer), Rugi-rugi daya (Losses)

ABSTRACT

Nama : Candra Agusman
Program Studi : Teknik Elektro
Judul : ANALYSIS CALCULATION OF THE POWER LOSSES
TRANSFORMERS CAUSED BY HARMONIC

The application of non linear load is the one which cause the distorsion current. The percentage of THD (Total Harmonic Distortion) will increase if a lot of non linier loads are used. From the measurement THD in the PT Indocement Tunggal Prakarsa transformers, the percentage measurement is 25,57 % that exceeds the IEEE 519-1992 limits standards which is only allow 15 %. Therefore, this writing will be explained by result of observation on harmonic distortion effect at transformers performance which is one of the electric power system fundamental components. Power Transformers performance can be determined through Power losses parameter that happened on transformers when operating with non linear and linear Load. Harmonic Distortion cause Power losses on transformers which is proportionally increase to high harmonic components current in loads current. Based on analysis the more current hamonic percentage (25.57%) the more the power losses of transformer (215149.442W). The more harmonic current value, the Power Losses will also increase.

Keyword: THD (Total Harmonic Distortion), Power Transformers, Losses

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS	ii
HALAMAN PENGESAHAN	iii
UCAPAN TERIMAKASIH	iv
HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI	v
ABSTRAK.....	vi
ABSTRACT	vii
DAFTAR ISI	viii
DAFTAR GAMBAR.....	x
DAFTAR TABEL	xi
BAB 1 PENDAHULUAN.....	1
1.1. Latar Belakang	1
1.2. Tujuan Penulisan.....	1
1.3. Batasan Masalah.....	2
1.4. Metodologi	2
1.5. Sistematika Penulisan.....	2
BAB II DASAR TEORI.....	3
2.1 Transformator daya.....	3
2.1.1 Bagian bagian transformator	3
2.1.2 Rugi-rugi pada transformator	7
2.1.3 Rugi-rugi tembaga	8
2.1.4 Rugi-rugi Arus eddy	11
2.1.5 Rugi-rugi Histerisis.....	11
2.2 Pengertian Harmonik	12
2.2.1 Deret Fourier	13
2.2.2 Jenis Beban Listrik.....	15
2.3. Indeks Harmonik	15
2.3.1 Root Mean square (RMS).....	16
2.4 <i>Individual and Total Harmonic Distortion (IHD & THD)</i>	17
2.5 Standar Harmonik	18

BAB III DATA DATA DAN HASIL PENGUKURAN	19
3.1 Spesifikasi dan Gambar Transformator	19
3.2 Gambar <i>Single Line Diagram</i>	21
3.3 Metode Pengukuran Harmonik pada transformator daya	22
3.4 Data Pengukuran Transformator	22
BAB IV STUDI KASUS DAN ANALISIS	25
4.1 Analisis Total Harmonic Distortion (THD) pada transformator	25
4.1.1 Perhitungan Arus THD.....	25
4.1.2 Perhitungan Tegangan THD	28
4.2 Analisis rugi-rugi daya pada transformator.....	30
4.2.1 Efisiensi transformator	35
4.2.2 Perhitungan Pembebanan Transformator	36
BAB IV KESIMPULAN	37
DAFTAR REFERENSI	38
LAMPIRAN	

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Inti Besi Transformator	3
Gambar 2.2 Kumparan Transformator	4
Gambar 2.3 Tangki Minyak Transformator	5
Gambar 2.5 Transformator Daya	7
Gambar 2.1 Gelombang fundamental, harmonik ke 3 & penjumlahannya	13
Gambar 3.1 Transformator K5P1-1T2	20
Gambar 3.2 <i>Single Line Diagram</i> Transformator K5P1-1T2	21
Gambar 3.3 Gambar Gelombang Tegangan dan Gelombang Arus	24
Gambar 4.1 Grafik Perbandingan ITHD Pengukuran dan Perhitungan	27
Gambar 4.2 Spektrum Arus THD Transformator K5P1-1T2	28
Gambar 4.3 Grafik Perbandingan V THD Pengukuran dan Perhitungan	29
Gambar 4.4 Grafik rugi arus tembaga terhadap arus harmonik	32
Gambar 4.5 Grafik rugi arus tembaga terhadap orde harmonik	32
Gambar 4.6 Grafik rugi arus eddy terhadap arus harmonik	33
Gambar 4.7 Grafik rugi arus eddy pada orde ganjil harmonik 3-21	34

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Nilai dari PEC-f	11
Tabel 2.2 Limit Distorsi Arus Harmonik Untuk sistem Distribusi < 69 kV	18
Tabel 2.3 Limit Distorsi Tegangan Harmonik	18
Tabel 3.1 Name Plate Transformator K5P1-1T2	19
Tabel 3.2 Data beban pada Transformator K5P1-1T2	20
Tabel 3.3 Data Pengukuran pada Transformator K5P11-1T2	22
Tabel 3.4 Data Pengukuran Arus dan Tegangan Harmonik K5P11-1T2	23
Tabel 4.1 Analisis THD arus pada transformator K5P11-1T2	26
Tabel 4.2 Analisis THD Tegangan pada Transformator K5P11-1T2	29
Tabel 4.3 Total rugi-rugi pada transformator K5P11-1T2	35
Tabel 4.4 Efisiensi Transformator K5P11-1T2	36

BAB I

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang Masalah

Banyaknya beban non linier adalah merupakan salah satu penyebab dari sekian banyaknya permasalahan kelistrikan. Dampak dari beban non linear adalah timbulnya harmonik. Tegangan atau arus sinus murni yang menjadi input beban non-linier akan berubah menjadi gelombang cacat setelah membebaninya. karena menumpanginya gelombang harmonik tegangan atau arus pada gelombang fundamental. Secara kelistrikan pengertian dari harmonik sendiri adalah suatu komponen sinusoidal dari sebuah gelombang periodik dengan suatu frekuensi yang merupakan perkalian bilangan bulat $(1,2,3,4,...,n)$ terhadap frekuensi fundamental (50Hz). Dengan semakin banyaknya beban beban non linier maka akan berdampak pada buruknya kualitas sumber daya listrik.

Pada saat sekarang ini banyak industri yang menggunakan beban non linier. Beban-beban di industri yang bersifat non linear seperti motor listrik, kendali kecepatan motor, elektronika daya (*inverter, converter*). Beban-beban tersebut menggunakan kontrol pensaklaran dengan peralatan semikonduktor. Harmonik juga dapat dibangkitkan oleh komponen-komponen pada sistem tenaga. Transformator dikenal sebagai sumber harmonik jika dioperasikan di atas batas arus yang diijinkan sehingga menyebabkan saturasi.

Pengaruh cacat gelombang tidak hanya berdampak pada kualitas daya listrik yang semakin jelek, melainkan alat kelistrikan yang dilalui oleh arus dan tegangan harmonik akan mengalami sebuah kinerja yang tidak sebagaimana mestinya. Pada transformator distribusi yang mensuplai beban nonlinier, mengakibatkan menurunnya efisiensi transformator yang dikarenakan oleh naiknya rugi-rugi tembaga dan rugi-rugi bocor yang disebabkan harmonik arus ataupun tegangan. Seringnya terjadi hubung singkat karena dampak dari panas yang ditimbulkan oleh harmonik yang dapat merusak isolasi dalam rangkaian sehingga isolasi tidak dapat berumur panjang. Dengan ada *breakdown* karena kerusakan trafo maka kinerja produksi di dalam industri menjadi terhambat.

1.2. TUJUAN PENULISAN

- Analisis pengaruh harmonik terhadap rugi-rugi daya transformator

1.3. BATASAN MASALAH

Agar tidak menyimpang dari pokok bahasan yang telah ditentukan maka penulis akan membatasi masalah sebagai berikut :

- Membahas pengaruh harmonik terhadap 1 buah transformator daya (1000 kVA, 6.6 kV- 400 V).
- Menganalisa pengaruh harmonik terhadap rugi-rugi daya transformator daya.

1.4. METODOLOGI

Penulisan skripsi ini berdasarkan metode tinjauan pustaka dan metode lapangan dengan cara melakukan pengukuran pada tranformator daya pada saat melayani beban non linier.

1.5. SISTEMATIKA PENULISAN

Bab I Pendahuluan. Bab ini membahas mengenai latar belakang, tujuan penulisan, batasan masalah, dan sistematika penulisan untuk memberikan gambaran umum mengenai penulisan skripsi ini. Bab II Dasar Teori. Bab ini berisikan tinjauan pustaka yang melandasi pokok permasalahan yang akan dibahas seperti : Teori dasar transformator, teori perhitungan rugi-rugi daya transformator, teori perhitungan harmonik, sumber harmonik dan efek-efek yang ditimbulkan oleh harmonik. Bab III. Data data dan hasil pengukuran, bab ini berisi data spesifikasi trafo, gambar *single line diagram*, data pengukuran tranformator daya. Bab IV membahas tentang analisis data pengaruh harmonik pada rugi rugi daya transformator. Bab V Kesimpulan. membahas kesimpulan

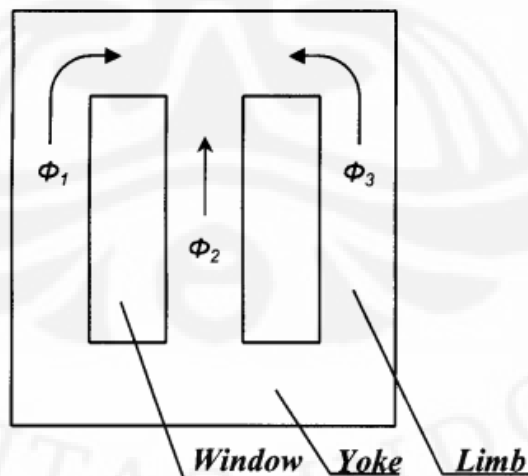
BAB II DASAR TEORI

2.1 Transformator Daya [5]

Transformator adalah suatu alat listrik yang dapat memindahkan dan mengubah energi listrik dari satu atau lebih rangkaian listrik ke rangkaian listrik yang lain, melalui suatu gandingan magnet dan berdasarkan prinsip induksi-elektromagnet. Transformator digunakan secara luas, baik dalam bidang tenaga listrik maupun elektronika. Transformator daya bertugas sebagai penyalur tenaga listrik pada beban - beban tegangan rendah. Jika transformator mensuplai beban non linier, maka akan timbul arus harmonik yang akan mengganggu kinerja pada transformator tersebut dari sisi tegangan rendah.

2.1.1 Bagian bagian transformator

- Inti besi berfungsi untuk mempermudah jalan fluksi, yang ditimbulkan oleh arus listrik yang melalui kumparan. Inti besi ini terbuat dari lempengan lempengan besi tipis terisolasi, untuk mengurangi panas (sebagai rugi rugi besi) yang ditimbulkan oleh arus eddy.



Gambar 2.1 Inti Besi Transformator

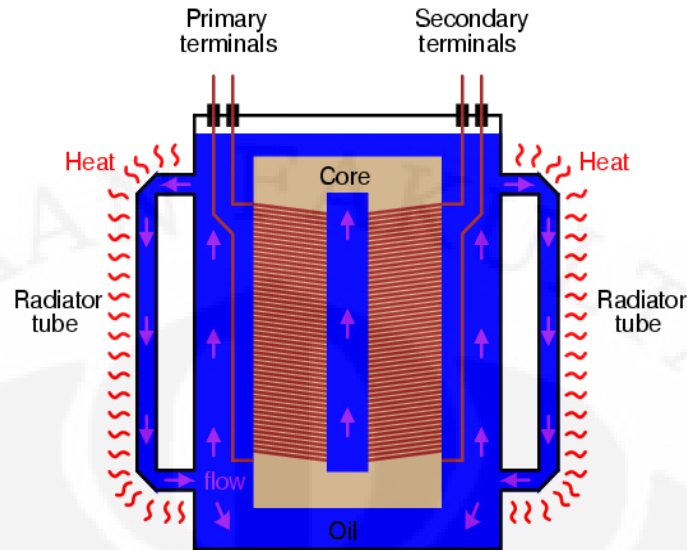
- b. Kumparan trafo adalah beberapa lilitan kawat berisolasi akan membentuk suatu kumparan. Kumparan itu diisolasi baik terhadap inti besi maupun terhadap kumparan lain dengan isolasi padat seperti karton, pertina dan lain lain.



Gambar 2.2 Kumparan Transformator

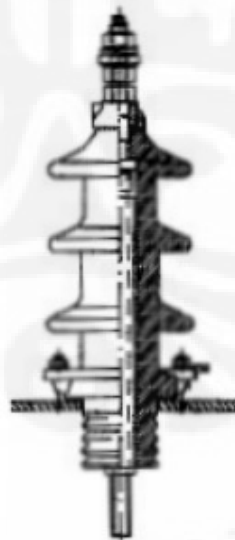
Umumnya pada trafo terdapat kumparan primer dan kumparan sekunder. Bila kumparan primer dihubungkan dengan tegangan/ arus bolak balik maka pada kumparan tersebut timbul fluksi. Fluksi ini akan menginduksikan tegangan, dan bila pada rangkaian sekunder ditutup maka akan menghasilkan arus pada kumparan ini. Jadi kumparan sebagai alat transformasi tegangan arus.

- c. Minyak trafo, sebagian besar trafo tenaga, kumparan kumparan dan intinya di rendam dalam minyak trafo, terutama trafo trafo tenaga yang berkapasitas besar, karena minyak trafo mempunyai media sebagai isolasi sehingga minyak trafo tersebut berfungsi sebagai media pendingin dan isolasi.



Gambar 2.3 Tangki Minyak Transformator

- d. Bushing, Merupakan penghubung antara kumparan trafo ke jaringan luar. Bushing adalah sebuah konduktor yang diselubungi oleh isolator, yang sekaligus berfungsi sebagai penyekat antara konduktor tersebut dengan tangki trafo.



Gambar 2.4 Bushing Transformator

Transformator dirancang untuk menyalurkan daya yang dibutuhkan ke beban dengan rugi-rugi minimum pada frekuensi fundamentalnya. Arus harmonik

dan juga tegangan secara signifikan akan menyebabkan panas lebih pada transformator melebihi batas standar, maka ini adalah tanda bahwa transformator tersebut mengalami distorsi harmonik.

Ada beberapa hal yang dapat menyebabkan panas pada transformator ketika mengandung komponen harmonik^[4] :

- Kenaikan arus RMS,
Jika transformator kapasitasnya hanya untuk kVA yang dibutuhkan beban, arus harmonik dapat mengakibatkan arus *RMS* transformator menjadi lebih besar dari kapasitasnya. Meningkatnya arus *RMS* menyebabkan rugi-rugi penghantar juga bertambah.
- Peningkatan rugi-rugi arus eddy
Ada arus induksi ini mengalir di belitan, di inti, dan di beban penghantar lain yang terlindungi oleh medan magnet dari transformator dan menyebabkan panas lebih. Komponen rugi-rugi transformator ini meningkat dengan kuadrat dari frekuensi arus penyebab *eddy-current*. Oleh karena itu menjadi komponen yang sangat penting dari rugi-rugi transformator yang menyebabkan pemanasan oleh harmonik.
- Rugi inti
Peningkatan rugi inti yang disebabkan oleh harmonik bergantung pada pengaruh harmonik pada tegangan yang diberikan dari inti transformator. Semakin besar distorsi tegangan maka semakin tinggi pula *eddy-current* di laminasi inti. Peningkatan rugi inti karena harmonik tidak sekritis *eddy-current losses* dan rugi arus RMS.



Gambar 2.5 Transformator Daya

2.1.2 Rugi-rugi pada transformator

Rugi-rugi pada transformator terdiri atas dua yaitu:

- a. Rugi-rugi tanpa beban atau *no load loss* (P_{NL})
- b. Rugi-rugi oleh beban atau *load-related loss* (P_{LL}).

Rugi-rugi oleh beban (P_{LL}) merupakan fungsi dari arus beban, yang terutama adalah rugi-rugi tembaga I^2R (P_R) dan *stray losses* (P_{ST}). *Stray losses* adalah rugi-rugi yang antara lain disebabkan arus eddy yang menimbulkan fluksi elektromagnetik yang menyasar ke kumparan, inti, pelindung magnetik, dinding tangki dan sebagainya. Untuk arus harmonik yang besar, rugi-rugi arus eddy pada kumparan adalah paling dominan.

$$P_{LOSS} = P_{NL} + P_{LL} \dots\dots\dots(2.1)$$

dan

$$P_{LL} = P_R + P_{EC} + P_{ST} \dots\dots\dots(2.2)$$

Dari uraian sebelumnya, rugi-rugi daya pada transformator secara signifikan akibat kehadiran komponen-komponen harmonik pada tegangan dan terutama pada arus beban adalah rugi-rugi tembaga, rugi-rugi histerisis dan rugi-rugi arus eddy. Rugi-rugi pada transformator yang disebabkan harmonik arus dan tegangan bergantung pada frekuensi. Peningkatan frekuensi menyebabkan peningkatan rugi-rugi karena arus dan tegangan yang dihasilkan semakin tinggi sehingga

dapat menyebabkan pemanasan berlebih sehingga mempengaruhi rugi-rugi trafo seperti peningkatan rugi tembaga dan inti besi yang pada akhirnya dapat menurunkan efisiensi transformator. Harmonik frekuensi tinggi akan lebih merupakan penyebab pemanasan utama dibandingkan harmonisa frekuensi rendah. Effisiensi trafo dapat di hitung melalui persamaan

$$\eta\% = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100\% = \frac{KVACos\phi}{KVA.Cos\phi + P_{cu} + P_{TSL}} \times 100\% \dots\dots\dots (2.3)$$

2.1.3 Rugi-rugi tembaga

Komponen rugi – rugi tembaga pada tranformator adalah I^2R , dimana arus (I) akan dapat menjadi lebih besar nilainya akibat terdapat komponen-komponen harmonik. Begitu juga dengan nilai tahanan (R),saat terjadi distorsi harmonik, nilai R juga berubah menjadi nilai tahanan arus searah (Rdc) ditambah (Rac) yang merupakan nilai tahanan tambahan akibat efek kulit (*skin effect*) dan efek kedekatan penghantar (*proximity effect*) sebagai dampak dari adanya fekuensi-frekuensi harmonik.

Besarnya rugi-rugi tembaga atau rugi-rugi penghantar akibat terdapatnya komponen harmonik didalam arus beban dapat dihitung dengan persamaan :

Komponen rugi-rugi pada penghantar hanyalah I^2R , dimana arus (I) akan menjadi lebih besar akibat adanya harmonisa sedangkan nilai tahanan (R) dibedakan menjadi nilai tahanan arus searah (Rdc), efek kulit (*skin effect*) dan Efek kedekatan penghantar (*proximity effect*).

Efek kulit (*skin effect*) disebabkan distribusi arus dipermukaan lebih besar daripada di dalam penghantar, sehingga tahanan efektif meningkat. Efek kulit meningkat dengan kenaikan frekuensi dan diameter penghantar.

Efek kedekatan (*proximity effect*) disebabkan medan magnet penghantar mengganggu distribusi arus pada penghantar-penghantar yang berdekatan. Pengaruh harmonisa terhadap tahanan dapat dijelaskan sebagai berikut, harmonisa mempunyai frekuensi kelipatan dari frekuensi fundamental, frekuensi harmonisa ini mempengaruhi besarnya tahanan arus bolak balik (Rac) akibat efek kulit (*skin effect*) dan efek kedekatan (*proximity effect*), sehingga rasio perbandingan antara tahanan

arus searah dengan tahanan arus bolak-balik yang dilambangkan kc dapat diperoleh dari persamaan

$$k_c = \frac{R_{ac}}{R_{dc}} = 1 + k_{SE} + k_{PE} \dots\dots\dots (2.4)$$

dimana :

- kc : rasio perbandingan Rdc dengan Rac
- Rac : tahanan penghantar pada arus bolak-balik (Ohm)
- Rdc : tahanan arus searah (Ohm)
- k_{SE} : penambahan tahanan akibat efek kulit (skin effect)
- k_{PE} : penambahan tahanan akibat efek kedekatan (proximity effect)

Letak aliran arus pada suatu penghantar dipengaruhi oleh besarnya frekuensi, semakin besar frekuensi yang diterapkan maka aliran arus akan semakin mendekati permukaan atau menjauh dari pusat penampang penghantar tersebut. Parameter efek kulit (*skin effect*) diperoleh sebagai fungsi dari frekuensi dan tahanan arus searah dengan persamaan sebagai berikut^[2] :

$$x = 0,027678 \sqrt{\frac{f \cdot \mu}{R_{dc}}} \dots\dots\dots (2.5)$$

dimana :

- f : frekuensi dalam (Hz)
- μ : permeabilitas magnet dari konduktor
- R_{dc} : tahanan arus searah dalam Ω/1000 ft

Penambahan nilai tahanan akibat efek kulit (k_{SE}) adalah merupakan fungsi non linear dari parameter x tersebut. Suatu metode pendekatan kurva dilakukan untuk mendapatkan perhitungan k_{SE} sehingga didapatkan persamaan orde-5 sebagai berikut^[2] :

x ≤ 2 berlaku :

$$k_{SE}(x) = 10^{-3} (1,04x^5 + 8,24x^4 - 3,24x^3 + 1,447x^2 - 0,2764x + 0,0166) \dots\dots\dots (2.6)$$

2 < x ≤ 10 berlaku :

$$k_{SE}(x) = 10^{-3} (-0,2x^5 + 6,616x^4 - 83,345x^3 + 500x^2 - 1061,9x + 769,63) \dots (2.7)$$

Sedangkan nilai k_{PE} yang merupakan suatu harga penambahan nilai tahanan akibat efek kedekatan (*proximity effect*) dari persamaan :

$$k_{PE} = k_{SE} \sigma^2 + \left(\frac{1.18}{k_{SE} + 0.27} + 0.312 \sigma^2 \right) \dots \dots \dots (2.8)$$

dengan σ adalah perbandingan antara diameter penghantar dengan jarak antar penghantar^[2]. Setelah didapat nilai k_{SE} dan k_{PE} maka didapat juga nilai R_{ac} .

Dengan demikian diperoleh nilai tahanan penghantar saat distorsi (R_h).

$$R_{ac} = k_c \cdot R_{dc} \text{ dan } R_h = R_{dc} + R_{ac}$$

sehingga,

$$R_h = R_{dc} \cdot (k_c + 1) \dots \dots \dots (2.9)$$

Besarnya rugi-rugi tembaga atau rugi-rugi penghantar akibat terdapatnya komponen harmonisa didalam arus beban dapat dihitung dengan persamaan :

$$P_R = \sum_{h=1}^{\infty} I_h^2 \cdot R_h \dots \dots \dots (2.10)$$

dimana :

P_R = rugi-rugi tembaga (Watt)

I_h = arus komponen harmonik ke-h (Ampere)

R_h = tahanan untuk frekuensi harmonik ke-h (Ohm)

Arus harmonik dipengaruhi oleh fenomena yang dikenal sebagai efek kulit (*skin effect*). Apabila frekuensi arus yang dihasilkan lebih tinggi dari frekuensi fundamentalnya (50 Hz), arus cenderung mengalir pada permukaan dari kawat konduktor. Hal ini mengurangi area efektif *cross sectional* dari konduktor dan meningkatkan tahanannya. Tahanan yang besar akan menyebabkan rugi-rugi tembaga sebesar (I^2R) yang besar pula. Pendekatan efek tersebut di atas menimbulkan aliran arus dengan distribusi yang tidak sama melalui konduktor.

2.1.4 Rugi-rugi Arus Eddy

Rugi arus eddy perlu diamati karena distorsi arus beban relatif lebih tinggi. Dengan arus-arus frekuensi harmonik lebih tinggi menyebabkan bertambahnya rugi-rugi inti yang sebanding terhadap kuadrat arus beban rms dan kuadrat frekuensi. Konsentrasi arus eddy lebih tinggi pada ujung-ujung belitan transformator karena efek kerapatan medan magnet bocor pada kumparan. Bertambahnya rugi-rugi arus eddy karena harmonisa berpengaruh nyata pada temperatur kerja transformator^[2]. Hal ini akan dapat terlihat pada besar rugi-rugi daya nyata (watt) akibat arus eddy ini. Besarnya rugi-rugi total arus eddy dinyatakan dengan suatu persamaan:

$$P_{EC} = P_{EC-f} \cdot \sum_{h=1}^{\infty} I_h^2 \cdot h^2 \dots\dots\dots (2.11)$$

dimana :

P_{EC} : rugi-rugi arus eddy (Watt)

h : bilangan bulat orde komponen harmonik

P_{EC-f} : rugi-rugi arus eddy (p.u of rate I^2R)

I_h : arus rms harmonic ke-n (p.u of rate load rms current)

Untuk mencari faktor *eddy current loss* dapat dilihat pada tabel 3^[3]

Tabel 2.1 Nilai dari P_{EC-f}

Type	MVA	Voltage	% P_{EC-R}
Dry	≤ 1		3 – 8
	≥ 1.5	5 kV HV	12 – 20
	≤ 1.5	15 kV HV	9 – 15
Oil-filled	≤ 2.5	480 V LV	1
	2.5 to 5	480 V LV	1 – 5
	> 5	480 V LV	9 - 15

2.1.5 Rugi-rugi Histerisis

Untuk menghitung rugi-rugi histerisis karena harmonik digunakan rumus :

$$P_h = K_h \cdot \sum_{h=1}^{\infty} I_h \cdot h \dots\dots\dots (2.12)$$

P_h : rugi-rugi histerisis (Watt)

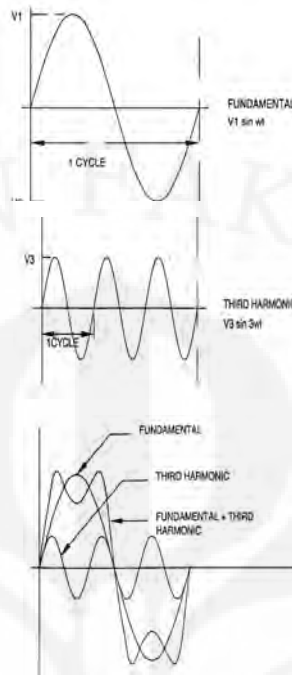
h : bilangan bulat orde komponen harmonik

- K_h : rugi-rugi arus eddy (p.u of rate I^2R)
 I_h : arus rms harmonic ke-n (p.u of rate load rms current)

2.2 Pengertian Harmonik [1]

Beban tidak linear menimbulkan arus yang tidak linear dan arus ini akan menginterferensi jaringan listrik. Dengan semakin banyaknya aplikasi beban nonlinier pada sistem distribusi tenaga listrik seperti *rectifiers*, *inverter*, *cycloconverter*, *softstarter* dan masih banyak lagi peralatan yang berbasis elektronika daya yang ternyata telah membuat arus sistem menjadi sangat terdistorsi dengan persentase kandungan harmonisa arus THD (*total harmonic distortion*) yang sangat tinggi. Akibat dari banyaknya persentase kandungan harmonisa akan berakibat pada semakin buruknya kualitas sumber daya listrik. Umumnya arus sistem distribusi tenaga listrik yang terdistorsi tersebut didominasi oleh arus harmonisa orde ganjil frekuensi rendah, yakni arus harmonisa orde tiga, lima, tujuh, sebelas, dan seterusnya.

Harmonik adalah tegangan atau arus yang sinusoidal dengan frekuensi yang merupakan kelipatan dari frekuensi fundamental dari sistem tenaga. Jika f adalah frekuensi fundamental dari suatu sistem, maka frekuensi orde n ($1, 2, 3, \dots, n$) adalah nf yaitu 50Hz, 100Hz, 150Hz dan seterusnya. Gelombang tersebut muncul karena adanya efek dari beban non linier dan menjadikan suatu gelombang arus atau tegangan cacat dikarenakan oleh keberadaan arus atau tegangan harmonik tersebut menumpang pada gelombang arus atau tegangan sinus fundamental tersebut. Seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.1 dibawah.



Gambar 2.6 Gelombang fundamental, harmonik ke 3 & penjumlahannya

2.2.1 Deret Fourier

Dalam menganalisa besarnya nilai jumlah gelombang antara gelombang asli dan harmonisnya dapat digunakan analisis deret fourier. Gelombang dikatakan memenuhi syarat jika gelombang tersebut periodik dengan perioda T bila $f(t) = f(t + T)$ untuk semua t . Jika $f(t)$ periodik dan memenuhi kondisi Dirichelet, maka deret fourier adalah

$$f(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos n\omega t + b_n \sin n\omega t) \dots\dots\dots(2.13)$$

dengan koefisien a_0, a_n, b_n masing masing adalah :

$$a_0 = \frac{1}{T} \int_0^T f(t) dt \dots\dots\dots(2.14)$$

$$a_n = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \cos n\omega t dt \dots\dots\dots(2.15)$$

$$b_n = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \sin n\omega t \, d\omega t \dots\dots\dots (2.16)$$

Kondisi dirichelet adalah :

1. Bila gelombang diskontinyu, hanya terdapat jumlah diskontinuitas yang terbatas dalam perioda T.
2. Gelombang memiliki nilai rata-rata yang terbatas pada perioda T
3. Gelombang memiliki jumlah maksimum dan minimum yang terbatas dalam perioda T.

Berdasarkan deret fourier diatas didapatkan bahwa gelombang yang mengintrodusir harmonik-harmonik ganjil yaitu harmonisa ketiga, kelima, ketujuh dan seterusnya.

Bila syarat-syarat tersebut dipenuhi, deret Fourier dapat dinyatakan dalam bentuk dimana n adalah orde harmonik, yaitu bilangan 1,2,3...dst. Pada kasus di sistem tenaga listrik, umumnya orde yang dominan adalah orde ganjil saja (3,5,7,11 dst.). Orde $n=1$ menyatakan komponen dasar atau fundamental dari gelombang. Suku a_0 menyatakan komponen dc atau nilai rata-rata dari gelombang, yang mana umumnya komponen ini tidak muncul dalam jaringan sistem arus bolak-balik. Bila gelombang arus atau tegangan berbentuk sinusoidal sempurna, maka orde $n=1$ saja yang ada. Gelombang yang cacat (terdistorsi) memiliki koefisien-koefisien dengan indeks n . Amplitudo harmonik biasa dinyatakan sebagai :

$$C_h = \sqrt{a_n^2 + b_n^2} \quad , \quad n \geq 1 \dots\dots\dots (2.17)$$

Nilai-nilai c sebagai fungsi n seringkali digambarkan dalam suatu barchart dan dikenal dengan 'spektrum frekuensi' gelombang. Tingkat kecacatan seringkali dinyatakan dengan Total Harmonic Distortion (THD) adalah perbandingan antara nilai harmonik terhadap nilai fundamental, yang dinyatakan dengan persamaan

$$THD_i = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2}}{I_1} \times 100 \dots\dots\dots (2.18)$$

$$THD_u = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} U_h^2}}{U_1} \times 100 \dots\dots\dots (2.19)$$

2.2.2 Jenis Beban Listrik

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 impedansi dan perubahan tegangan, sedangkan beban non linier adalah bentuk gelombang keluarannya tidak sebanding dengan tegangan dalam setiap setengah siklus sehingga bentuk gelombang arus maupun tegangan keluarannya tidak sama dengan gelombang masukannya (mengalami distorsi). Beban non linier umumnya merupakan peralatan elektronik daya yang didalamnya banyak terdapat komponen semi konduktor. Contoh dari beban non linier : inverter, transformator, motor listrik dan elektronika daya, yang juga termasuk ke dalam peralatan beban non linier.

Beban non linier adalah penyebab harmonik, rasio antara beban non linier dan beban linier akan memberikan adanya beban lebih harmonik. Dibandingkan dengan beban linier yang bentuk gelombang arus maupun tegangan akan selalu berbentuk sinusoidal dengan frekuensi yang sama, maka beban non linier akan mengakibatkan bentuk gelombang sinusoidal berubah bentuk menjadi tidak murni sinusoidal.

2.3 Indeks Harmonik

Dalam pengukuran harmonik ada beberapa petunjuk penting yang harus dimengerti, yaitu Individual Harmonic Distortion and Total Harmonic Distortion (IHD & THD).

2.3.1 Root Mean Square (RMS)

Karena intensitas sebuah sinyal yang bervariasi dengan waktu berubah dari waktu ke waktu, maka tidak tepat untuk menyatakan sebuah sinyal dengan suatu nilai yang dimilikinya pada saat waktu sembarang. Beberapa yang harus diperhatikan adalah intensitas rata-rata sebuah sinyal, definisi nilai rata-rata sebuah sinyal adalah sebagai berikut :

$$X_{Average} = \frac{1}{T} \int_0^T x(t) dt \dots\dots\dots (2.20)$$

Namun, nilai rata – rata tidak memberikan informasi mengenai amplitudo sebuah fungsi berkala, karena nilai ini hanya menyebutkan nilai *offset dc*. Bila informasi amplitudo diperlukan, maka yang dibutuhkan adalah nilai akar kuadrat rata – rata dari fungsi tersebut (*Root Mean square*), yang didefinisikan sebagai akar kuadrat dari rata – rata kuadrat dari fungsi tersebut pada suatu periode, artinya :

$$X_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T x^2(t) dt} \dots\dots\dots (2.21)$$

Maka, untuk perhitungan dalam tegangan dan arus dinyatakan dalam bentuk :

$$V_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T V^2(t) dt} = \sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} V_n^2} \dots\dots\dots (2.22)$$

Atau

$$V_{rms} = \sqrt{V_1^2 + V_2^2 + V_3^2 + \dots + V_n^2}$$

$$I_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T I^2(t) dt} = \sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} I_n^2} \dots\dots\dots (2.23)$$

Atau

$$I_{rms} = \sqrt{I_1^2 + I_2^2 + I_n^2 + \dots + I_n^2} \dots\dots\dots (2.24)$$

2.4 Individual and Total Harmonic Distortion (IHD & THD)

Individual Harmonic Distortion (IHD) adalah perbandingan antara nilai rms dari fundamentalnya, Misal nilai rms dari harmonik ketiganya adalah 30 A dan harmonik kelimanya adalah 35 A, sedangkan nilai rms dari harmonik fundamentalnya adalah 50 A, maka :

IHD ketiga adalah :

$$IHD_3 = \frac{30}{50} = 0,6 \text{ atau } 0,6 \%$$

IHD kelima adalah :

$$IHD_5 = \frac{35}{50} = 0,7 \text{ atau } 0,7 \%$$

Total Harmonic Distortion (THD) adalah perbandingan antara nilai rms dari seluruh komponen harmonik terhadap nilai rms dari nilai fundamentalnya biasanya dinyatakan dalam persen (%). Nilai dari THD ini digunakan untuk mengukur besarnya penyimpangan dari bentuk gelombang periodik yang mengandung harmonik dari gelombang sinusoidal murninya. Untuk gelombang sinusoidal sempurna nilai dari THD adalah bernilai 0 %. Untuk mencari nilai THD untuk tegangan dan arus dapat menggunakan rumus sebagai berikut :

$$V_{THD} = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} V_n^2}}{V_1} \dots\dots\dots (2.25)$$

Keterangan :

V_n = Nilai tegangan harmonik (Volt)

V_1 = Nilai fundamental (Volt)

n = Komponen harmonik maksimum yang diamati

$$I_{THD} = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}}{I_1} \dots\dots\dots (2.26)$$

Keterangan :

I_n = Komponen Harmonik (Ampere)

I_1 = Komponen fundemntal (Ampere)

n = Komponen harmonik maksimum yang diamati.

2.5 Standar Harmonik

Standar Harmonik adalah berdasarkan IEEE 519 – 1992. Ada dua kriteria yang digunakan untuk mengevaluasi distorsi harmonik, yang pertama adalah batas harmonik untuk arus (I_{THD}) dan yang kedua adalah batasan untuk tegangan (V_{THD}). Presentasi (%) I_{THD} adalah presentase jumlah total arus yang terdistorsi oleh harmonisa terhadap frekuensi fundamentalnya. Batasan untuk harmonik arus (I_{THD}) ditentukan oleh perbandingan $\frac{I_{sc}}{I_L}$. I_{sc} adalah arus hubung singkat yang ada pada PCC (Point of Common Coupling), sedangkan I_L adalah arus beban fundamental nominal. Sedangkan Persentasi (%) batas untuk harmonik tegangan (V_{THD}), ditentukan dari besarnya tegangan sistem yang dipakai / terpasang.

Tabel 2.2 Limit Distorsi Arus Harmonik Untuk sistem Distribusi < 69 kV^[2]

MAXIMUM HARMONIC CURRENT DISTORTION In % of fundamental						
Isc / IL	HARMONIC ORDER					Total Harmonic Distortion (THD %)
	<11	11 ≤ h < 17	17 ≤ h < 23	23 ≤ h < 35	35 ≤ h	
	Individual Harmonic Distortion (IHD %)					
<20	4,0	2,0	1,5	0,6	0,3	5
20-50	7,0	3,5	2,5	1,0	0,5	8
50-100	10,0	4,5	4,0	1,5	0,7	12
100-1000	12,0	5,5	5,0	2,0	1,0	15
>1000	15,0	7,0	6,0	2,5	1,4	20

Tabel 2.3 Limit Distorsi Tegangan Harmonik^[2]

Maximum Distortion (%)	System Voltage		
	V ≤ 69 KV	69 < V < 138kV	V > 138kV
Individual Harmonik	3,0	1,5	1,0
Toatal Harmonik	5,0	2,5	1,5

BAB III DATA DATA DAN HASIL PENGUKURAN

Penulis melakukan pengumpulan data pengukuran beserta kelengkapannya di PT. Indocement Tungal Prakarsa Tbk Plant 11 yang berlokasi di Jl. Mayor Oking Citeureup Bogor. Berikut data-data yang didapatkan penulis guna menunjang hasil analisa harmonik yang penulis buat.

3.1 Spesifikasi dan Gambar Transformator

Tabel 3.1 *Name Plate* Transformator K5P1-1T2

IAC Name	K_5P11T2
Manufacturer	TOHK ABB
Year	1997
Phase	3
Frequency (Hz)	50
Impedance	6 %
Power-kVA	1000
Primary Voltage – kV	6,6
Primary Ampere – I	87.5
Secondary Voltage - V	400
Secondary Ampere - I	1443
Serial No.	16270013/7
Type of Cooling	ONAN
Total weight	3670
Weight of Oil	627
Type of oil	Shell Diala D



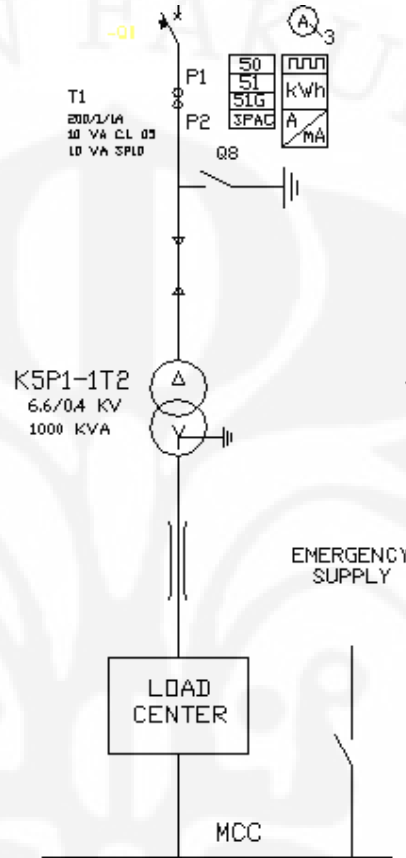
Gambar 3.1 Transformator K5P1-1T2

Trafo pada gambar 3.1 digunakan untuk menyuplai motor *Classifier Cement Mil*, motor *Cooling fan bag filter*, motor *air slide*. *Classifier* merupakan suatu alat pemisah material semen kasar dan halus setelah semen keluar dari *cement mill*.

Tabel 3.2 Data beban pada Transformator K5P1-1T2

IAC	Deskripsi	Arus beban (A)	Tegangan (V)
K 581 BL1 M01	Motor <i>Air slide</i>	100	400
K 571 FNA M01	Motor <i>Cooling fan</i>	100	400
K 571 FND M01	Motor <i>Cooling fan</i>	90	400
K 571 FNC M01	Motor <i>Cooling fan</i>	90	400
K 571 FNN M01 (Stand by)	Motor <i>Cooling fan</i>	90	400
K 571 FNF M01 (stand by)	Motor <i>Cooling fan</i>	90	400
K 592 SR2 M01	Motor <i>Classifier</i>	440	400

3.2 Gambar Single Line Diagram



Gambar 3.2 Single Line Diagram Transformator K5P1-1T2

3.3 Metode Pengukuran Harmonik pada transformator daya

Metode pengukuran yang dilakukan dengan menggunakan alat ukur khusus yaitu Power Harmonic Analyzer Chauvin Arnoux, yang dapat menunjukkan beberapa parameter yang dibutuhkan untuk mengetahui pengaruh harmonik pada transformator. Pengukuran dilakukan pada beban non linier, karena data yang dibutuhkan saat melakukan pengukuran adalah mesin berjalan dengan beban penuh (*full load*) sehingga didapatkan data yang akurat. Adapun parameter-parameter yang didapat dari hasil pengukuran antara lain berupa :

- Frekuensi
- *Total harmonic distortion* (THD) yaitu THD tegangan THD arus
- Daya aktif, daya nyata dan daya reaktif
- *Power faktor* (PF),

3.4 Data Pengukuran Transformator

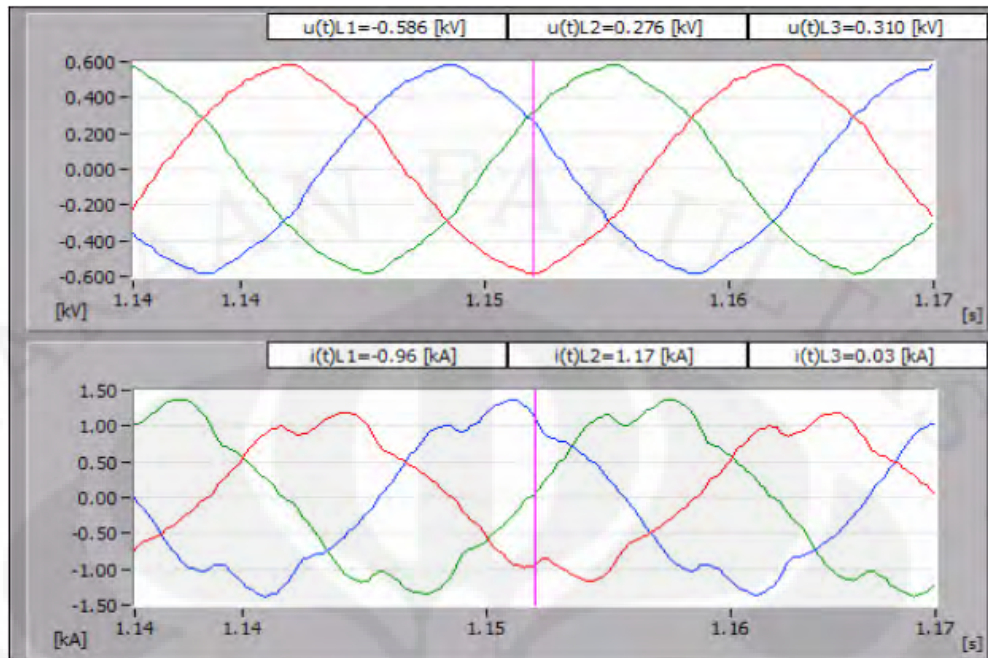
Berikut data hasil pengukuran transformator :

Tabel 3.3 Data Pengukuran pada Transformator K5P11-1T2

Frequency	50 Hz
KW	478.26
KVA	570.04
KVAR	310.18
Peak KW	519.04
Total PF	0.839
Voltage	404.27 V
Current rms	858.95 A
% THD Arus	25.57
% THD Tegangan	3.46

Tabel 3.4 Data Pengukuran Arus dan Tegangan Harmonik Transformator (K5P11-1T2)

Orde Harmonik (h)	Frekuensi Harmonik (Hz)	I_{HD} (%)	Arus (Ampere)	V_{HD} (%)	Tegangan (Volt)
1	50	100	830	100	404
2	100	0.31	2.57	1.1	4.44
3	150	6.6	54.78	1.9	7.68
4	200	0.13	1.08	0.2	0.81
5	250	24.1	200.11	1.5	6.06
6	300	0.07	0.58	0.3	1.21
7	350	6.63	55.03	1.2	4.85
8	400	0.06	0.5	0.1	0.4
9	450	3.1	25.73	1.1	4.44
10	500	0.07	0.58	0.1	0.4
11	550	4.32	35.86	0.9	3.64
12	600	0.04	0.33	0.1	0.4
13	650	3.18	26.39	0.8	3.23
14	700	0.04	0.33	0.3	1.21
15	750	1.1	9.13	0.8	3.23
16	800	0.04	0.33	0.2	0.81
17	850	1.04	8.63	0.7	2.83
18	900	0.04	0.33	0.1	0.4
19	950	0.12	1	0.7	2.83
20	1000	0.04	0.33	0.4	1.62
21	1050	0.12	1	0.6	2.42
		I_{THD}	25.57	V_{THD}	3.46



Gambar 3.3 Gambar Gelombang Tegangan dan Gelombang Arus K5P1-1T2

BAB IV

STUDI KASUS DAN ANALISIS

4.1 Analisis *Total Harmonic Distortion* (THD) pada transformator

Hasil pengukuran dan perhitungan dibandingkan untuk kemudian dievaluasi berdasarkan standar harmonik yang telah ditetapkan. Pengukuran dilakukan pada saat beban penuh (*full load*), untuk mengetahui efek harmonik secara sistem di transformator daya.

4.1.1 Perhitungan arus THD (*Total Harmonic Distortion*)

Berdasarkan pengukuran nilai harmonik arus paling tinggi diperoleh pada pengukuran di trafo 1. Pada hasil perhitungan arus harmonik ke-2, 3, 4...21 masing-masing adalah:

$$\begin{aligned}
 I_{THD} &= \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}}{I_1} \\
 &= \frac{\sqrt{I_2^2 + I_3^2 + I_4^2 \dots I_{21}^2}}{I_1} \\
 &= \frac{\sqrt{3000.85 + 40045.21 + 3028.19 + \dots + 0.99}}{830} \\
 &= \frac{\sqrt{48878.43}}{830} \\
 &= 0.2663 \\
 &= 26.63 \%
 \end{aligned}$$

$$I_{THD} = 26.63 \% \times I_{\text{fundamental}} = 26.63 \% \times 830 = 221.029 \text{ A}$$

Dari hasil perhitungan di atas maka diketahui bahwa total arus harmonik yang terjadi melebihi batas standar yang telah ditentukan yaitu sebesar 15 %, maka arus harmonik tersebut harus diturunkan, dengan tujuan agar tidak mengganggu fungsi kerja dari beban tersebut.

Perhitungan untuk penentuan standar THD arus sebelumnya terlebih dahulu menghitung

I_{SC} / I_L :

Pada Transformator K5P11-1T2 :

Diketahui :

Kapasitas = 1000 KVA

I_L = 858.95 A

Z = 6 %

V = 400 V

Ditanya : I_{SC} / I_L

$$I_{sc} = \frac{KVA \times 1000}{\%Z \times \sqrt{3} \times V}$$

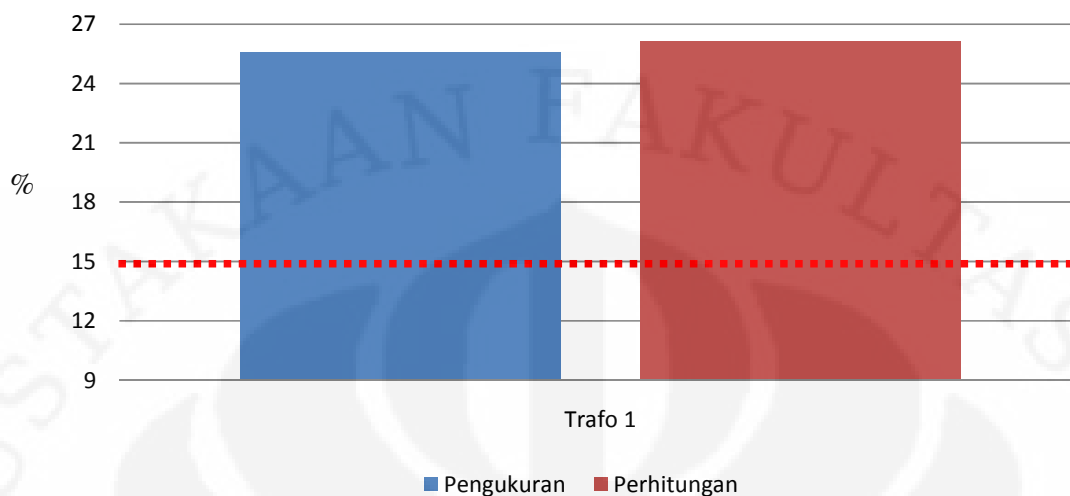
$$I_{sc} = \frac{1000 \times 1000}{6 \times 1,7 \times 0,4} = \frac{1000000}{4.152} = 240847.78$$

$$I_{SC} / I_L = \frac{240847.78}{858.95} = 280.39$$

Jadi standar yang digunakan adalah THD 15 % lihat tabel 2.2 sebab hasil perhitungan I_{SC} / I_L berada pada range 100-1000.

Tabel 4.1 Analisis THD arus pada transformator K5P11-1T2

TRANSFORMATOR	(%) THD Arus			EVALUASI
	PENGUKURAN	PERHITUNGAN	STANDAR	
Trafo K5P1-1T2	25.57	26.13	15 %	Melebihi standar maksimal



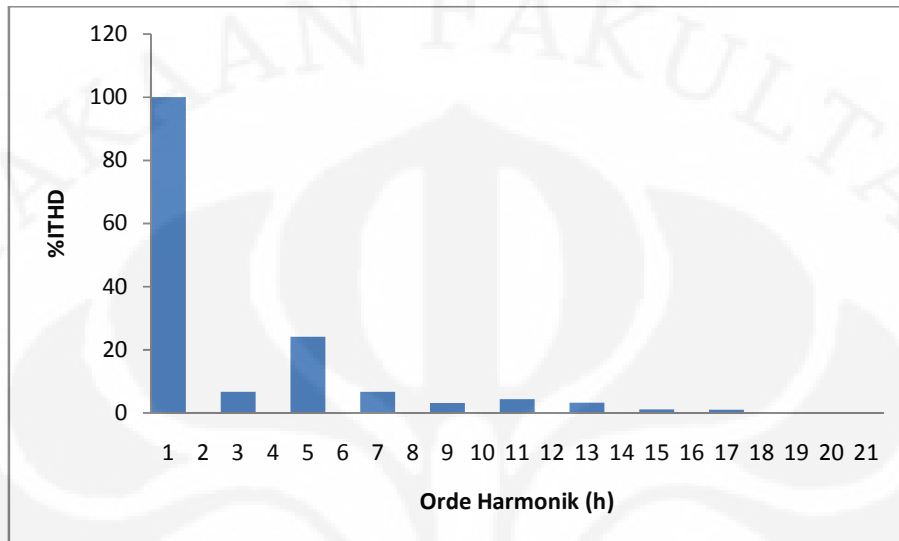
Gambar 4.1 Grafik Perbandingan I_{THD} Pengukuran dan Perhitungan

Dari gambar grafik di atas hasil perhitungan dan pengukuran menunjukkan hasil yang relatif hampir sama artinya peralatan yang dipakai untuk melakukan pengukuran cukup presisi. Dari ketiga transformator yang diukur diperoleh total distorsi arus harmonik berkisar antara I_{THD} 25,57 % sedangkan hasil perhitungan berkisar I_{THD} 26,13 %.

Data ini memperlihatkan bahwa transformator yang memiliki harmonik melebihi standar secara pengukuran maupun perhitungan. Hal ini disebabkan beban non linier yang dipergunakan lebih banyak bila dibandingkan kedua transformator yang lainnya seperti motor listrik, elektronika daya (*inverter, converter*) 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. jumlah beban non linier akan menghasilkan gelombang yang kemudian menimbulkan harmonik pada gelombang arus fundamental. Distorsi harmonik yang besar ini menyebabkan pemanasan lebih pada belitan transformator daya dan akan menyebabkan kenaikan temperatur.

Dengan demikian untuk transformator KP51-1T2 gangguan harmonik arus berpotensi besar dari keseluruhan transformator yang diamati. Dengan demikian transformator berpotensi terjadi gangguan harmonik apabila penggunaan beban tidak

linier bertambah. Dalam melakukan perhitungan, standar yang dipakai adalah standar dari IEEE 519-1992



Gambar 4.2 Spektrum Arus THD Transformator K5P1-1T2

4.1.2 Perhitungan Tegangan THD (*Total Harmonic Distortion*)

Dalam melakukan perhitungan THD tegangan digunakan standar untuk tegangan dibawah 69 kV, kemudian dari hasil pengukuran yang telah diperoleh dilakukan perbandingan dengan standar yang sesuai untuk tegangan dibawah 69 kV. Dari hasil perbandingan tersebut dapat diketahui apakah nilai dari hasil pengukuran yang telah dilakukan melebihi batas yang diijinkan atau tidak.

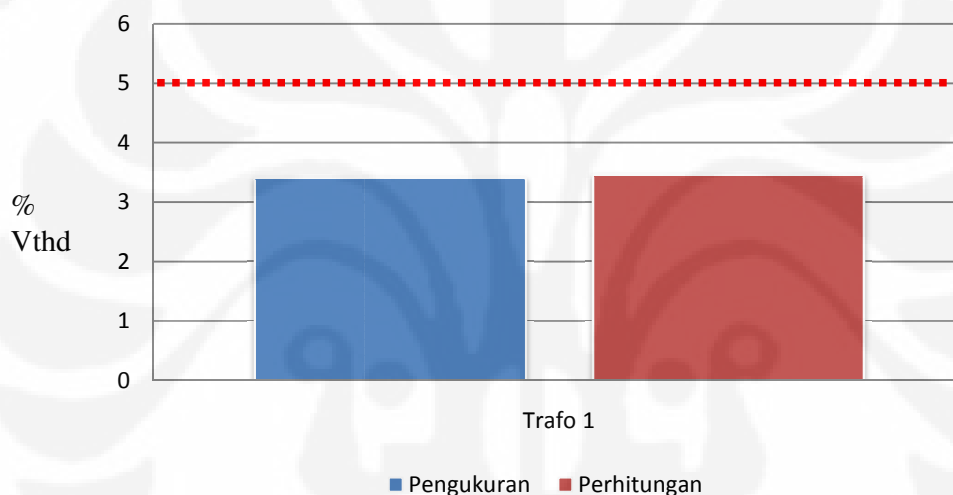
Berdasarkan hasil pengukuran nilai tegangan harmonik (3,5,7,... 21) yang relatif lebih besar. Pada hasil pengukuran tegangan harmonik ke-2,3,4... 21 masing-masing adalah :

$$\begin{aligned}
 V_{T\ HD} &= \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} V_n^2}}{V_1} \\
 &= \frac{\sqrt{58.92 + 36.72 + 2.5 + \dots + 5.88}}{404} \\
 &= \frac{\sqrt{194.88}}{404}
 \end{aligned}$$

= 0.0346
 = 3,47 %

Tabel 4.2 Analisis THD Tegangan pada Transformator K5P11-1T2

TRANSFORMATOR	(%)THD Tegangan			EVALUASI
	PENGUKURAN	PERHITUNGAN	STANDAR	
Trafo KP11T1	3.46	3.47	5 %	Di bawah standar maksimal



Gambar 4.3 Grafik Perbandingan V_{THD} Pengukuran dan Perhitungan

Dari hasil perhitungan diatas maka diketahui bahwa total tegangan harmonik yang terjadi masih dibawah batas standar yang telah ditentukan yaitu sebesar 5%. Berdasarkan data yang dikumpulkan terlihat bahwa total distorsi arus harmonik untuk ketiga transformator masih dibawah standar IEEE 519-1992 (tabel 4.2).

4.2 Analisis rugi-rugi daya pada transformator

Tujuan dilakukan perhitungan ini adalah untuk mengetahui rugi-rugi daya transformator yang terjadi pada saat melayani beban non linier, pengamatan dan pengukuran beberapa parameter-parameter untuk mengetahui rugi-rugi daya pada transformator akibat pengaruh harmonik pada ketiga transformator tersebut. Perhitungan yang diperoleh untuk masing-masing transformator terlampir pada lampiran.

Dapat dikatakan bahwa dengan meningkatnya nilai komponen-komponen harmonik atau arus-arus harmonik berarti terjadi juga kenaikan rugi-rugi daya pada transformator akibat beban, yaitu rugi-rugi tembaga dan rugi-rugi arus eddy. Kenaikan rugi-rugi daya transformator adalah akibat bertambahnya nilai RMS arus-arus harmonik yang ditandai dengan kenaikan nilai THD arusnya. Sedangkan harga tahanan penghantar transformator (R_h) tidak terpengaruh oleh kenaikan THD karena nilainya hanya dipengaruhi oleh frekuensi harmonik saja. Sebab konstanta x pada perhitungan perubahan nilai tahanan (R_h) akibat efek kulit (*skin effect*) dan efek kedekatan (*proximity effect*) hanya dipengaruhi oleh frekuensi komponen harmonik, permeabilitas konduktor dan nilai tahanan awal (R_h). Pada pengukuran ini, komponen harmonik yang dapat terbaca hanya sampai orde ke-21, perubahan arus sangat mempengaruhi besarnya rugi-rugi ini.

Melalui data-data dan pengukuran di bawah ini maka rugi-rugi tembaga, rugi-rugi arus eddy diambil salah satu contoh pada transformator 3 maka dapat dihitung di bawah ini :

Frekuensi diambil pada orde 1 sebagai contoh (f)	= 50 Hz
Permeabilitas konduktor (μ)	= 1 untuk jenis logam
Tahanan transformator pada arus dc (R_{dc})	= 0.13 Ω
Perbandingan antara diameter konduktor dan jarak antara konduktor (σ)	= 1 mm/0.25mm atau 4
Arus Harmonik orde 3	= 54.78 A

Berdasarkan persamaan (2.14) diperoleh nilai parameter x:

$$x = 0.027678 \sqrt{\frac{50Hz \cdot 1}{0.13\Omega}} = 0.1238$$

Metode pendekatan kurva dilakukan untuk mendapatkan perhitungan k_{SE} sesuai dengan persamaan (2.15) yaitu dengan $x = 0.1238$ artinya $x \leq 2$ maka diperoleh persamaan :

$$k_{SE}(x) = 10^{-3}(1,04x^5 + 8,24x^4 - 3,24x^3 + 1,447x^2 - 0,2764x + 0,0166)$$

$$k_{SE} = 0.0000003$$

Sedangkan nilai K_{PE} yang merupakan suatu harga penambahan nilai tahanan akibat efek kedekatan didapat dari persamaan (2.17)

$$K_{PE} = 0.0000003 \times (4)^2 \left(\frac{1.18}{0.0000003 + 0.27} + 0.312 (4)^2 \right) = 0.00005$$

Frekuensi harmonik ini juga mempengaruhi besarnya tahanan arus bolak balik (R_{ac}) sebagai akibat dari efek kulit (*skin effect*) dan efek kedekatan (*proximity effect*), sehingga didapat rasio perbandingan antara tahanan arus searah (R_{dc}) dengan tahanan arus bolak-balik (R_{ac}) yang dilambangkan sebagai k_c . Nilai k_c diperoleh berdasarkan persamaan (2.13):

$$K_c = 1 + 0.0000003 + 0.00005$$

$$K_c = 1,0000503$$

Melalui perhitungan diatas maka diperoleh tahanan penghantar, sesuai dengan persamaan (2.18)

$$R_h = 0.13 (1,0000503 + 1)$$

$$R_h = 0.26001 \Omega$$

Sehingga besarnya rugi-rugi tembaga akibat terdapatnya komponen harmonik di dalam arus beban dapat dihitung sesuai dengan persamaan (2.23)

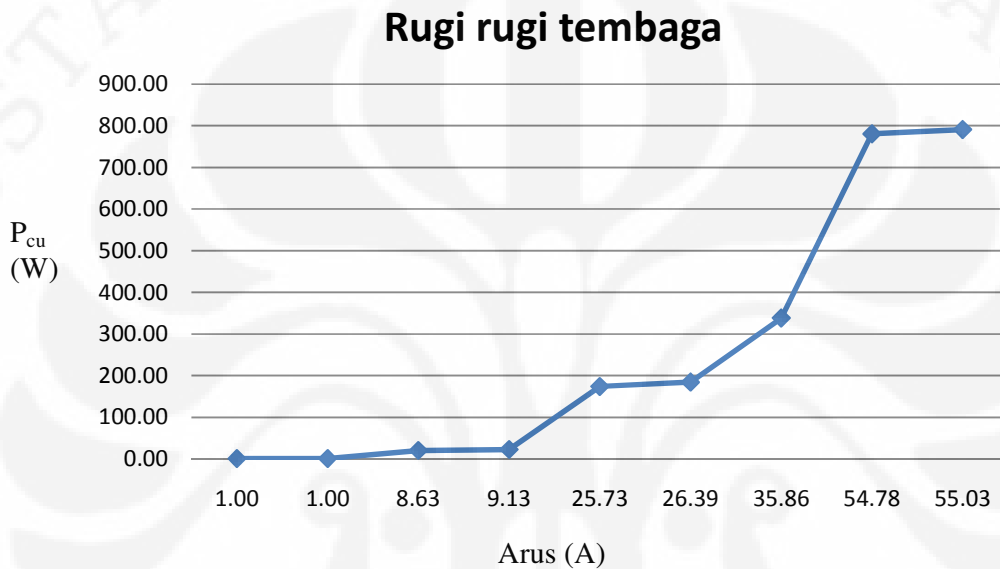
$$P_R = \sum_{h1}^{h \max} 830^2 A \cdot 0.26001 \Omega$$

Jadi orde harmonik = 1

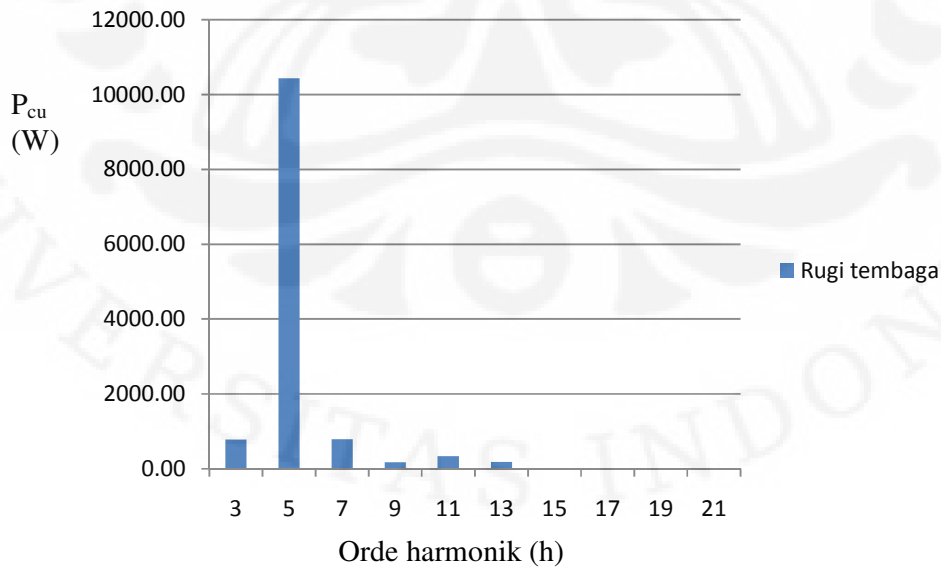
$$P_R = 688900 \cdot 0.26001$$

$$P_R = 179120,89 \text{ W}$$

Setelah dihitung nilai rugi-rugi tembaga total untuk transformator adalah 191864.74 W, sedangkan rugi tembaga karena harmonik adalah 6.64 % dari total rugi tembaga keseluruhan sekitar 12743.81 W. Rugi tembaga berbanding lurus dengan arus harmonik seperti terlihat pada gambar 4.4. Orde 5 pada transformator mempunyai rugi paling tinggi seperti terlihat pada gambar 4.5



Gambar 4.4 Grafik rugi arus tembaga terhadap arus harmonik K5P1-1T2



Gambar 4.5 Grafik rugi arus tembaga terhadap orde harmonik K5P1-1T2

Perhitungan dilakukan sampai dengan orde 21. Untuk perhitungan rugi-rugi arus eddy diambil salah satu contoh, dengan menggunakan persamaan $P_{EC} = P_{EC} \cdot f \cdot \sum_{h=1}^{\infty} I_h^2 \cdot h^2$ untuk mencari faktor *eddy current loss* dapat dilihat pada tabel 2.4, maka dapat dihitung di hitung di bawah ini :

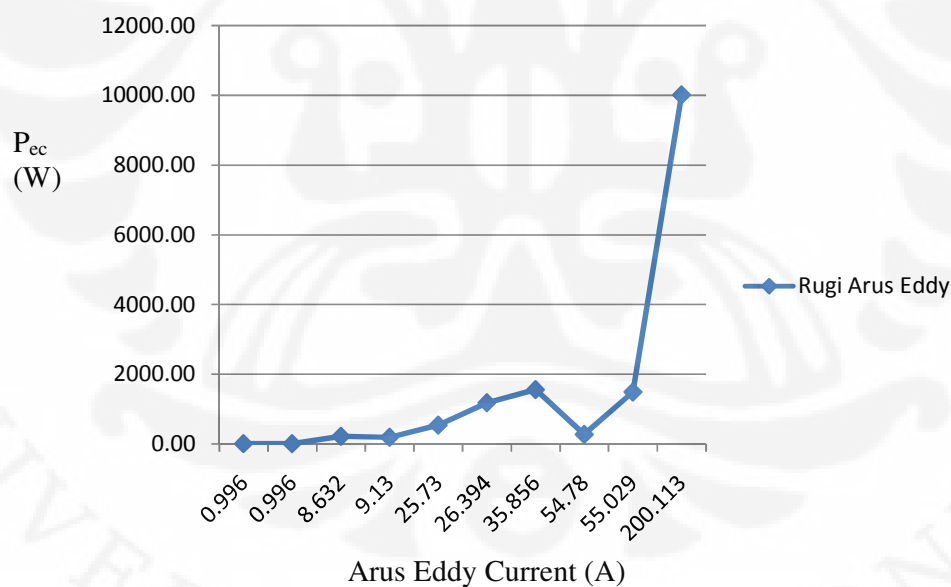
$$P_{EC} \cdot f : 0.01$$

$$I_h^2 : 200.11 \times 200.11 = 40045.21$$

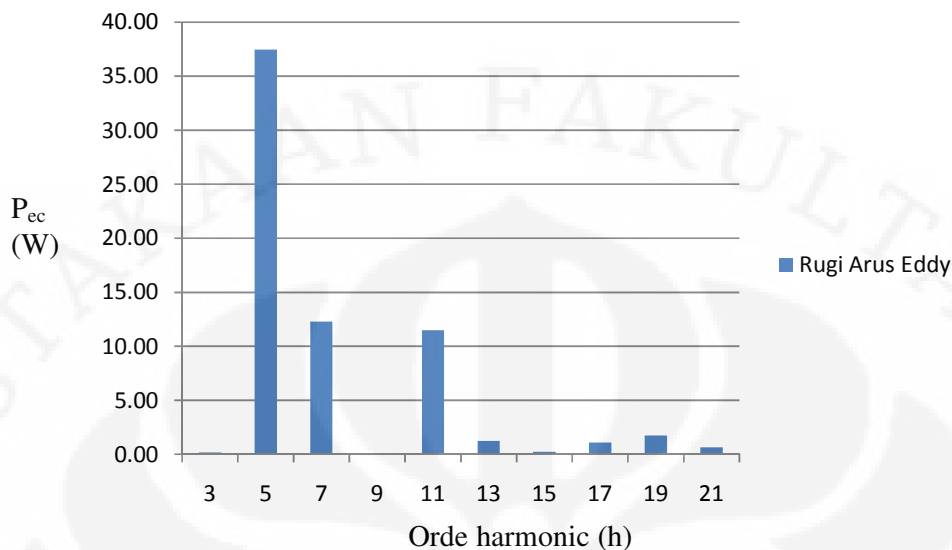
$$h^2 : 5 \times 5 = 25$$

Rugi *eddy current* pada orde 5 adalah $P_{EC} = 10011.30$ W. Untuk lebih lengkapnya dapat dilihat pada lampiran untuk perhitungan rugi-rugi tembaga dan rugi-rugi arus eddy pada masing-masing transformator.

Maka hasil perhitungan total rugi-rugi yang terdapat pada masing-masing transformator akibat pengaruh harmonik dapat dilihat pada tabel 4.3



Gambar 4.6 Grafik rugi arus eddy terhadap arus harmonik K5P1-1T2



Gambar 4.7 Grafik rugi arus eddy pada orde ganjil harmonik 3-21 K5P1-1T2

Dari gambar grafik 4.6 dan gambar grafik 4.7 dapat dilihat bahwa semakin tinggi arus harmonik maka makin tinggi rugi-rugi arus eddy. Nilai rugi rugi terbesar ada pada orde ke 5 sebesar 10011.30 W. Nilai arus harmonik tertinggi ada pada orde 5 dengan nilai arus 200.113 A.

Untuk perhitungan rugi-rugi hysteresis diambil salah satu contoh yaitu pada transformator 1, dengan menggunakan persamaan $P_h = K_h \cdot \sum_{h=1}^{\infty} I_h \cdot h$

- K_h : 0.26
- I_h : 200.11
- h : 5

Rugi *hysteresis* pada orde 5 adalah $P_h = 260.1$ W. Untuk lebih lengkapnya dapat dilihat pada lampiran untuk perhitungan rugi-rugi *hysteresis* pada masing-masing transformator.

Maka hasil perhitungan total rugi-rugi yang terdapat pada masing-masing transformator akibat pengaruh harmonik dapat dilihat pada tabel 4.3

Tabel 4.3 Total rugi-rugi pada transformator K5P11-1T2

Transformator	Rugi-rugi arus eddy (watt)	Rugi-rugi tembaga (watt)	Rugi Histerisis (watt)	Total Rugi-rugi
K5P1-1T2	22334.25	191864.7	950.4915	215149.442

Dari hasil perhitungan, dimana rugi-rugi daya pada transformator akibat beban non linier membuktikan bahwa komponen harmonik turut menyebabkan bertambahnya rugi-rugi daya yang terjadi pada transformator saat bekerja melayani beban non linear pada masing-masing transformator. Hal ini diakibatkan oleh bertambahnya nilai rugi-rugi daya yang terdiri atas rugi tembaga dan rugi arus eddy yang selalu terdapat pada transformator saat bekerja melayani beban non linier.

Tabel 4.3 menunjukkan peningkatan rugi-rugi yang terjadi akibat pengaruh harmonik terhadap transformator jelas terlihat pada masing-masing transformator. maka rugi-rugi yang terjadi adalah cenderung meningkat juga. Dengan frekuensi harmonik lebih tinggi menyebabkan rugi-rugi inti yang sebanding terhadap kuadrat arus beban rms dan kuadrat frekuensi.

4.2.1 Efisiensi Transformator

Setelah dihitung rugi rugi daya trafo maka efisiensi trafo dapat dihitung sebagai berikut :

$$\text{Efisiensi trafo} = \eta\% = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100\% = \frac{KVACos\varphi}{KVA.Cos\varphi + P_{cu} + P_{TSL}} \times 100\%$$

$$\begin{aligned} \text{Efisiensi trafo 1} &= \frac{1.7 \times 404.27 \times 858.95 \times 0.839}{1.7 \times 404.27 \times 858.95 \times 0.839 + 215149.442} \times 100\% \\ &= 69.98\% \end{aligned}$$

Tabel 4.4 Efisiensi Transformator K5P11-1T2

TRANSFORMATOR	Arus Beban RMS (A)	Pembebanan (%)	Total Rugi-rugi (W)	Efisiensi (%)
Trafo KP11T2	858.95	59.5	215149.442	69.98

Dari tabel 4.5 dapat dilihat bahwa transformator KP11T2 mempunyai efisiensi yang sekitar 69.98 % itu pada pembebanan transformator sebesar 59.5 % dengan total rugi-rugi 215149.442 W.

4.2.2 Perhitungan Pembebanan Transformator

Dengan adanya arus harmonik sebesar 25.57 % sekitar 221.09 A maka perlu dihitung pembebanan maksimal transformator daya sebagai berikut :

$$\begin{aligned}
 I_n \text{ Transformator} &= \frac{\text{KVA}}{\sqrt{3} \times V_{ll}} \\
 &= \frac{1000}{\sqrt{3} \times 400} \\
 &= 1445 \text{ A}
 \end{aligned}$$

$$I_{\text{THD}} = 221.09 \text{ A}$$

$$\begin{aligned}
 \% \text{ Pembebanan} &= \frac{1445 - 221.09}{1445} \times 100\% \\
 &= 84.69 \%
 \end{aligned}$$

Dengan adanya arus harmonik untuk menghindari kegagalan pada transformator maka transformator harus dibebani maksimal 84.69 % dari beban nominal transformator.

BAB V

KESIMPULAN

Dari uraian data, serta dari hasil perhitungan dan analisis pada pengaruh harmonik terhadap rugi rugi daya transformator, maka dapat disimpulkan bahwa:

1. Berdasarkan hasil pengukuran nilai arus THD tertinggi sebesar 25.57 %, sedangkan berdasarkan perhitungan nilai arus THD sebesar 26.13 %. Dari kedua hasil tersebut diketahui bahwa THD arus pada transformator melebihi batas toleransi IEEE 519-1992 yaitu sebesar dengan 15%.
2. Berdasarkan hasil pengukuran THD tegangan pada masing-masing transformator masih berada dalam batas normal yaitu 2.46 %. Begitu pula dengan hasil perhitungan masih dalam batas normal yaitu 3.47% (batas standar IEEE 519-1992 adalah 5%).
3. Berdasarkan hasil perhitungan transformator rugi-rugi tembaga mempunyai nilai sebesar 191864.7 W, rugi-rugi arus eddy 22334.25 W dan rugi-rugi histerisis 950.49 W dengan total rugi-rugi 215149.442 W. Kenaikan rugi-rugi daya akibat bertambahnya arus rms harmonik yang ditandai dengan kenaikan nilai THD arus sebesar 26.13 %.
4. Efisiensi transformator mempunyai efisiensi sebesar 69.98% dengan pembebanan 59.5 %.
5. Dengan adanya arus harmonik sebesar 25.57 % sekitar 221.09 A maka untuk menghindari kegagalan pada transformator maka transformator harus dibebani maksimal 84.69 % dari beban nominal transformator.

DAFTAR REFERENSI

- [1] Ir. Bambang Hermawanto, M.Sc “Phenomena harmonik di sistem distribusi tenaga listrik, masalah, penyebab, dan usaha mengatasinya” Energi & listrik, Vol. VI no.3, Juni 1996
- [2] Shankaran, C. “*Power Quality*” Florida: CRC Press LLC, 2002
- [3] Roger C. Dugan, Mark F. McGranaghan, H. Wayne Beaty, “*Electrical Power System Quality*,” New York: McGraw-Hill, 1996
- [4] J. Arrilaga, Bradley D.A., Bodger P.S., *Power System Harmonics*, New York: John Wiley & Sons, 2003.
- [5] Burke, James J, “Power Distribution Engineering”. New York: Marcel Dekker, Inc, 1994
- [6] Efendy Luthfe, “Analisis rugi-rugi pada trafo daya akibat harmonik”, Teknik Elektro Indonesia Universitas Indonesia, 2005
- [7] Koswara Indra, “Analisis pengaruh harmonic pada trafo distribusi di industri semen”, Teknik Elektro Indonesia Universitas Indonesia, 2010
- [8] Kurnaen Jemjem, “Pengaruh harmonik pada rugi-rugi daya sistem tenaga listrik”, PT. PLN P3B Bali
- [9] Suriaty, N, “Analisis rugi-rugi daya pada trasformator distribusi akibat pengaruh harmonisa” Teknik Elektro Indonesia Universitas Indonesia, 2006

LAMPIRAN 1

Perhitungan rugi-rugi tembaga pada transformator

Orde Harmonik (h)	Frekuensi Harmonik (Hz)	Permeabilitas Konduktor	Tahanan arus searah (Rdc = ohm)	Parameter skin effect (X)	Koefisien Skin Effect (KSE)	μ	KPE	Rasio Rac/Rdc (Kc)	Tahanan Bolak-balik (Rac)	Tahanan Harmonik (Rh)	Arus Harmonik Ih ²	Rugi Tembaga
1	50	1	0,13	0.1238	0.0000003	4	0.00005	1.0000769	0.13001	0.2600	688900.00	179120.89
2	100	1	0,13	0.1691	0.0000046	4	0.00069	1.0006923	0.13009	0.2601	6.62	1.72
4	150	1	0,13	0.2144	0.0000089	4	0.00133	1.0013077	0.13017	0.2602	3000.85	780.73
3	200	1	0,13	0.2597	0.0000189	4	0.00283	1.0028462	0.13037	0.2604	1.16	0.30
5	250	1	0,13	0.2768	0.0000289	4	0.00433	1.0043846	0.13057	0.2606	40045.21	10434.58
6	300	1	0,13	0.3221	0.0000436	4	0.006535	1.0065769	0.130855	0.2609	0.34	0.09
7	350	1	0,13	0.3275	0.0000583	4	0.00874	1.0087692	0.13114	0.2611	3028.19	790.78
8	400	1	0,13	0.3728	0.0000776	4	0.01163	1.0116923	0.13152	0.2615	0.25	0.06
9	450	1	0,13	0.3713	0.0000969	4	0.01452	1.0146154	0.1319	0.2619	662.03	173.39
10	500	1	0,13	0.4166	0.0001209	4	0.0181	1.0182308	0.13237	0.2624	0.34	0.09
11	550	1	0,13	0.4105	0.0001448	4	0.02168	1.0218462	0.13284	0.2628	1285.65	337.92
12	600	1	0,13	0.4558	0.0001734	4	0.02596	1.0261538	0.1334	0.2634	0.11	0.03
13	650	1	0,13	0.4463	0.0002019	4	0.03024	1.0304615	0.13396	0.2640	696.64	183.89
14	700	1	0,13	0.4916	0.0002353	4	0.035225	1.0354615	0.13461	0.2646	0.11	0.03
15	750	1	0,13	0.4794	0.0002686	4	0.04021	1.0404615	0.13526	0.2653	83.36	22.11
16	800	1	0,13	0.5247	0.0003067	4	0.04591	1.0461923	0.136005	0.2660	0.11	0.03
17	850	1	0,13	0.5104	0.0003447	4	0.05161	1.0519231	0.13675	0.2668	74.51	19.88
18	900	1	0,13	0.5557	0.0003876	4	0.05803	1.0583846	0.13759	0.2676	0.11	0.03
19	950	1	0,13	0.5395	0.0004305	4	0.06445	1.0648462	0.13843	0.2684	0.99	0.27
20	1000	1	0,13	0.5848	0.0004783	4	0.07159	1.0720385	0.139365	0.2694	0.11	0.03
21	1050	1	0,13	0.5672	0.000526	4	0.07873	1.0792308	0.1403	0.2703	0.99	0.27
											191867.11	

LAMPIRAN 2

Perhitungan rugi-rugi arus eddy pada transformator

Orde Harmonik (h)	Frekuensi(Hz)	Ih	Ih ²	Ih ² x h ²	P _{EC-f}	P _{EC}
1	50	830	688900	688900	0.01	6889
2	100	2.573	6.620329	26.48132		0.26
3	150	54.78	3000.848	27007.64		270.08
4	200	1.079	1.164241	18.62786		0.19
5	250	200.113	40045.21	1001130		10011.3
6	300	0.581	0.337561	12.1522		0.12
7	350	55.029	3028.191	148381.4		1483.81
8	400	0.498	0.248004	15.87226		0.16
9	450	25.73	662.0329	53624.66		536.25
10	500	0.581	0.337561	33.7561		0.34
11	550	35.856	1285.653	155564		1555.64
12	600	0.332	0.110224	15.87226		0.16
13	650	26.394	696.6432	117732.7		1177.33
14	700	0.332	0.110224	21.6039		0.22
15	750	9.13	83.3569	18755.3		187.55
16	800	0.332	0.110224	28.21734		0.28
17	850	8.632	74.51142	21533.8		215.34
18	900	0.332	0.110224	35.71258		0.36
19	950	0.996	0.992016	358.1178		3.58
20	1000	0.332	0.110224	44.0896		0.44
21	1050	0.996	0.992016	437.4791		4.37
					TOTAL	22336.8

LAMPIRAN 3

Perhitungan rugi-rugi histerisis pada transformator

Orde Harmonik (h)	Frekuensi(Hz)	Ih	Ih x h	Kh	Ph
1	50	830	830	0.26	215.8
2	100	2.573	5.146		1.34
3	150	54.78	164.34		42.73
4	200	1.079	4.316		1.12
5	250	200.113	1000.565		260.15
6	300	0.581	3.486		0.91
7	350	55.029	385.203		100.15
8	400	0.498	3.984		1.04
9	450	25.73	231.57		60.21
10	500	0.581	5.81		1.51
11	550	35.856	394.416		102.55
12	600	0.332	3.984		1.04
13	650	26.394	343.122		89.21
14	700	0.332	4.648		1.21
15	750	9.13	136.95		35.61
16	800	0.332	5.312		1.38
17	850	8.632	146.744		38.15
18	900	0.332	5.976		1.55
19	950	0.996	18.924		4.92
20	1000	0.332	6.64		1.73
21	1050	0.996	20.916		5.44
				TOTAL	967.73

LAMPIRAN 4

Perhitungan %THD arus pada transformator

Orde Harmonik (h)	I_{THD} (%)	Arus (Ampere)	I^2	THD (%)
1	100	830.00		26.13
2	0.31	2.57	6.62	
3	6.6	54.78	3000.85	
4	0.13	1.08	1.16	
5	24.11	200.11	40045.21	
6	0.07	0.58	0.34	
7	6.63	55.03	3028.19	
8	0.06	0.50	0.25	
9	3.1	25.73	662.03	
10	0.07	0.58	0.34	
11	4.32	35.86	1285.65	
12	0.04	0.33	0.11	
13	3.18	26.39	696.64	
14	0.04	0.33	0.11	
15	1.1	9.13	83.36	
16	0.04	0.33	0.11	
17	1.04	8.63	74.51	
18	0.04	0.33	0.11	
19	0.12	1.00	0.99	
20	0.04	0.33	0.11	
21	0.12	1.00	0.99	

LAMPIRAN 5

Perhitungan %THD tegangan pada transformator

Orde Harmonik (h)	V _{THD} (%)	Tegangan (V)	V ²	THD (%)
1	100	404.00		3.47
2	1.1	4.44	19.75	
3	1.9	7.68	58.92	
4	0.2	0.81	0.65	
5	1.5	6.06	36.72	
6	0.3	1.21	1.47	
7	1.2	4.85	23.50	
8	0.1	0.40	0.16	
9	1.1	4.44	19.75	
10	0.1	0.40	0.16	
11	0.9	3.64	13.22	
12	0.1	0.40	0.16	
13	0.8	3.23	10.45	
14	0.3	1.21	1.47	
15	0.8	3.23	10.45	
16	0.2	0.81	0.65	
17	0.7	2.83	8.00	
18	0.1	0.40	0.16	
19	0.7	2.83	8.00	
20	0.4	1.62	2.61	
21	0.6	2.42	5.88	