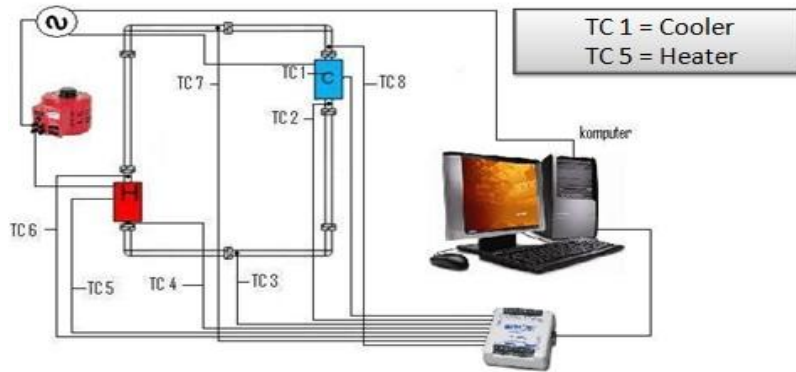


TEKNIKA

Jurnal Teknologi

EFEK SUDUT KEMIRINGAN UNTAI SIMULASI SIRKULASI ALAMIAH TERHADAP RUGI TEKANAN DI SEPANJANG PIPA



ANALISIS KUAT TEKAN BETON DENGAN PENAMBAHAN KAOLIN

ANALISIS UMUR DAN KEAUSAN ROTAN TERHADAP KUAT LENTUR CAMPURAN BETON TULANGAN ROTAN

ANALISIS RUGI-RUGI DAYA PADA TRANSFORMATOR DISTRIBUSI 15 kVA, 20 kV / 400 Volt AKIBAT PENGARUH HARMONISASI

MODIFIKASI DARI METODE MACHINE LEARNING PATTERN INFORMATICS UNTUK PERAMALAN GEMPA BESAR DI PULAU JAWA DENGAN MENAMBAHKAN PARAMETER WAKTU

PENGARUH JENIS PEMBEBANAN DALAM ANALISIS STRUKTUR PERKERASAN LENTUR TERHADAP KINERJA PERKERASAN

FAKULTAS TEKNIK

UNIVERSITAS IBN KHALDUN BOGOR

Vol. 11, No. 001, Juni 2012

ISSN : 1412-9469

TEKNIKA

Jurnal Teknologi

Jurnal Enam Bulanan / *Six Monthly Journal*
Terbitan Pertama Juni 2002 / *First Published in June 2002*

Pemimpin Umum (Penanggung Jawab) / Managing Director
Arief Goeritno, S.T.,M.T. (Dekan Fakultas Teknik)

Pemimpin Redaksi (Penyunting Pelaksana) / Chief of Organizing Editor
M. Hariansyah, S.T.,M.T.

Wakil Pemimpin Redaksi / Vice of Organizing Editor
Deni Hendarto, S.T., M.Si.

Komisi Penyunting Pengarah / Committee of Steering Editor
Prof. Surjono Surjokusumo, Ir., MSF, Ph.D (IPB)
Dr. Ing. Henki Wibowo Ashadi, Ir. (JTS-FT-UI)
Prof. Dr. Prawoto, Ir., MSAe (BTMP-BPPT)
Dr. Lukman Shalahuddin, B.E., M.Sc (BTMP-BPPT)
Dr. Hendro Tjahjono, Ir., DEA (P2TKN-BATAN)
Djoko Hari Nugroho, Ir., MS, Ph.D (Eng.) (P2TKN-BATAN)

Anggota Redaksi / Member of Organizing Editor
Nurul Chayati, Ir.
Aris Munandar, Ir.,M.T
Asep Suheri, S.T.,M.T
Novita Br. Ginting, S.Kom.

Penata Letak / Layouter
Wawan Setiawan, S.Pdi

Tata Usaha / Administratio
H.Tono Kartono, S.Pd.,M.Pd
Muhammad Muhlis, S.Pdi
Hendri Maulana, S.E
Taufik Andriansyah, A.Md
Amelia Prasasti, A.Md
Elis Dzikrillah, A.Md

Penerbit/Publisher
Fakultas Teknik - Universitas Ibn Khaldun Bogor
Jl. KH. Sholeh Iskandar km. 2, Kedung Badak, Tanah Sareal, Bogor 16162
Telp: 0251 7160993, Fax : 0251 8380993
E-mail : jurnal_ftuika@yahoo.com

TEKNIKA

Jurnal Teknologi

Daftar Isi / Contents

Hal.

Eri susanto Haryadi

Kinerja Campuran Beton Aspal Lapis Pengikat (Ac-Bc) Memakai Buton Granular Asphalt (Bga) 15/25 Lawele
(Performance Mixed Asphalt Concrete Layer Binder (Ac-Bc) Asphalt Wearing Buton Granular (Bga) 15/25 Lawele)

M. Hariansyah

Analisis Rugi-Rugi Daya Pada Transformator Distribusi 15 kVA, 20 KV / 400 Volt Akibat Pengaruh Harmonisasi
Power Losses of Distribution Transformer 15 kVA, 20 KV / 400 Volt harmonic effect

Noor Ida Hayati

Analisis Biaya Konstruksi Pada Proyek Jalan Di Kota Bogor
(Cost Analysis Of Road Construction Projects In The City Bogor)

Syaiful

Tingkat Resistensi Sumber Suara Di Depan Rumah Sakit Karyadi
(The Level Of Resistance Source In Front Of Rumah Sakit Karyadi)

TEKNIKA

Jurnal Teknologi

Pengantar Redaksi

Segala puji dipanjatkan ke hadirat Allah Swt, yang telah memberikan rahmat dan karunia-Nya, hingga tersusun TEKNIKA, Jurnal Teknologi, Vol. 11, No 001, Juni 2012 sebagai terbitan kedua puluh satu.

TEKNIKA berisi karya tulis ilmiah dari kegiatan penelitian dan/atau pengkajian di bidang sains dan teknologi.

Semoga isi terbitan ini dapat menjadi sumber informasi yang bermanfaat untuk dijadikan acuan dalam pelaksanaan kegiatan penelitian dan/atau pengkajian selanjutnya, sehingga memberikan sumbangan berarti bagi pembangunan berkelanjutan.

Bogor, Juni 2012

Foreword

Praise be to Allah, for His blessings and helps, so that TEKNIKA, Jurnal Teknologi, Vol. 11, No. 001, June 2012 has been successfully published as twenty-first edition.

This journal consists of scientific papers and technical reports in various fields of science and technology.

We hope that this journal gives useful information and references to present and future activities, and gives significant contribution for sustainable development.

Bogor, June 2012

Vol. 11, No. 001, Juni 2012

ISSN : 1412-9469

TEKNIKA

Jurnal Teknologi

PEDOMAN PENULISAN NASKAH

Redaksi TEKNIKA, Jurnal Teknologi – Fakultas Teknik Universitas Ibn Khaldun Bogor menerima naskah/makalah ilmiah hasil penelitian atau pengkajian di bidang sains dan teknologi, untuk penerbitan pada bulan Juni atau Desember setiap tahun takwin.

1. Naskah asli berupa karya tulis ilmiah hasil eksperimen, survei, pengkajian, atau literatur disertai analisis.
2. Naskah ditulis dalam bahasa Indonesia atau Inggris, diketik menggunakan ukuran 12 Time New Roman dengan jarak baris 1,5 spasi, abstrak diketik dengan jarak 1 spasi. Ukuran kertas A4 dengan margin atau batas (kiri dan atas) 3 cm dan margin (kanan dan bawah) 2,5 cm. Total halaman termasuk gambar dan tabel maksimum 20 halaman. Rangkap 2 (dua).
3. Sistematika penulisan karya tulis dengan urutan, JUDUL, ABSTRAK, PENDAHULUAN, TEORI dan/atau METODOLOGI atau TATA KERJA, HASIL DAN BAHASAN, PENUTUP ATAU SIMPULAN, UCAPAN TERIMA KASIH (jika ada), DAFTAR PUSTAKA (REFERENSI).
4. Sesuai dengan maksud penerbitan jurnal ini, redaksi berhak mengedit naskah tanpa mengurangi makna. Isi tulisan menjadi tanggung jawab penulisan sepenuhnya.
5. Naskah yang dikirim harus disertai CD, ditulis dengan karakter Arial Narrow (*font 10*) seperti ditulis dalam terbitan ini.

WRITING FORMATS AND RULES

Editors TEKNIKA, Journal of Technology – Faculty of Engineering – University Ibn Khaldun Bogor call for scientific papers as the results of research or assessment in the field of science and technology, to be published in June or December every year.

1. The original papers could be the result of experiment, evaluation of survey, technical assessment reports or literature studies with analysis.
2. Manuscripts should be systematically written in Indonesian language or English using font of New Times Roman characters with line spacing 1,5 abstract with line spacing 1. The paper size is A4, the left and top margins are 3 cm, and right and bottom margins are 2,5 cm. The maximum total number of pages is 20 pages including graphs and tables. 2 (two) hardcopies.
3. The outline of the paper should be TITLE, ABSTRACT, INTRODUCTION, THEORY and/or METHODOLOGY, RESULTS AND DISCUSSION, CONCLUSION, ACKNOWLEDGEMENT (if ANY), REFERENCES.
4. The editors have the right to edit paper without substantial change of meaning. The content of the paper is full responsibility of authors.
5. The paper should be submitted together with its electronic files in CD, written in Arial Narrow characters (*font 10*), similar to the paper written in this journal.

ANALISIS RUGI-RUGI DAYA PADA TRANSFORMATOR DISTRIBUSI 15 kVA, 20 kV / 400 Volt AKIBAT PENGARUH HARMONISASI

Deni Sutisna¹, M. Hariansyah²

¹ Alumni Program Studi Teknik Elektro, FT-UIKA Bogor

² Dosen Tetap FT UIKA Bogor, m.hariansyah@ft.uika-bogor.ac.id

ABSTRAK

ANALISIS RUGI-RUGI DAYA PADA TRANSFORMATOR DISTRIBUSI 15 kVA, 20 kV / 400 Volt AKIBAT PENGARUH HARMONISASI). Sistem tenaga listrik di Indonesia didesain untuk bekerja pada frekuensi listrik 50 Hz, dimana salah satu komponen penting yang digunakan pada suatu system tenaga listrik adalah transformator. Namun, mesti system dirancang untuk bekerja pada frekuensi 50 Hz, jenis beban tertentu yaitu beban non-linear, dapat mengakibatkan system bekerja tidak hanya pada frekuensi dasar tersebut. Sebagian besar dari distorsi ini merupakan gejala pembentukan gelombang-gelombang dengan frekuensi berbeda yang merupakan perkalian bilangan bulat frekuensi dasarnya yang dikenal sebagai distorsi harmonisa. Setiap komponen pada system distorsi tenaga listrik dapat dipengaruhi oleh harmonisa walaupun dengan akibat yang berbeda. Meski demikian, pengaruh distorsi harmonisa pada komponen secara umum adalah penurunan kinerja dan bahkan merusakkan. Oleh karena itu, perlu pada penulisan ini akan dijelaskan hasil pengamatan atas pengaruh distorsi harmonisa pada kinerja transformator sebagai salah satu komponen dasar system tenaga listrik. Kinerja trafo daya dapat ditentukan melalui parameter rugi-rugi daya yang terjadi pada transformator pada saat melayani beban linear dan non linear. Hasil pengujian menunjukkan bahwa saat bekerja melayani beban, distorsi harmonisa mengakibatkan nilai rugi-rugi daya pada transformator bertambah proporsional terhadap besar arus komponen-komponen harmonisa yang terdapat didalam arus beban. Kinerja transformator serta penurunan kapasitas kerja atau derating yang juga dapat terjadi akibat distorsi harmonisa tersebut. Dan dalam pengamatan ini juga akan dilakukan terhadap pengaruh suhu pada transformator.

Kata kunci: Transformator, harmonisa, beban non linier, distorsi

ABSTRACT

ANALYSIS-LOSS AND LOSS IN POWER DISTRIBUTION TRANSFORMERS 15 kVA, 20 kV / 400 Volt EFFECT OF HARMONIZATION). *Power system Electric in Indonesia is designed to work on the electrical frequency of 50 Hz, where one of the important components that are used in an electric power system is transformer. However, the system must be designed to operate at a frequency of 50 Hz, a particular type of load that is non-linear loads, can cause the system to work not only at the fundamental frequency. Most of this distortion is a symptom of the formation of waves with different frequencies which are integer frequency multiplication is basically known as harmonic distortion. Each component of the electric power system distortion can be affected by harmonics, although with a different result. However, the influence of harmonic distortion components in general are performance decline and even destruction. Therefore, it is necessary in this paper are described the results of observations on the effect of harmonic distortion on the performance of the transformer as one of the basic components of electric power system. Power transformer performance parameters can be determined through the power loss that occurs in the transformer at the time of serving the linear and non linear loads. Test results show that while working to serve the load, harmonic distortion resulting in the power loss in transformers increases proportional to the flow of the harmonic components contained in load current. Transformer performance and reduced work capacity or derating that can also occur due to the harmonic distortion. And in these observations will also be conducted on the effect of temperature on the transformer.*

Keywords: transformers, harmonic, non-linear load, the distortion

1. PENDAHULUAN

Industri dan komersial banyak menggunakan beban non linier. Pasokan tenaga listrik terhadap konsumen tersebut tidak mengkapur beban yang riil tetapi juga beban tambahan berupa arus dan tegangan harmonisa dari beban non linier. Rasio antara beban non linier dan beban linier akan memberikan petunjuk adanya beban lebih harmonisa. Dibandingkan dengan beban linier yang bentuk gelombang arus maupun tegangannya selalu berbentuk sinusoidal dengan frekuensi yang sama, sedangkan beban non linier dapat mengakibatkan gelombang keluaran arus dan tegangannya mengakibatkan bentuk gelombang sinusoidal tidak murni. Gelombang sinusoidal tidak murni merupakan penjumlahan gelombang dengan berbagai frekuensi yang disebut distorsi. Distorsi merupakan gejala pembentukan gelombang-gelombang dengan frekuensi berbeda yang merupakan perkalian bilangan bulat frekuensi dasarnya yang dikenal sebagai distorsi harmonisa. Distorsi

harmonisa terjadi karena gelombang-gelombang harmonisa menumpang pada gelombang frekuensi dasar, sehingga terbentuk gelombang yang cacat yang merupakan jumlah antara gelombang murni sesaat dan gelombang harmonisanya. Perkembangan beban saat ini banyak yang tergolong beban non linier. Artinya distorsi harmonisa yang disebabkan oleh beban non linier tidak mungkin dapat dihindari. Dan pengaruh distorsi pada setiap komponen secara umum disebabkan oleh penurunan kinerja atau kerusakan. Oleh karena itu dalam tulisan ini membahas salah satu komponen dalam sistem distribusi tenaga listrik yaitu transformator distribusi 15 kVA, 20 kV / 400 Volt.

2. TINJAUAN PUSTAKA

Prinsip dasar harmonisa adalah gangguan yang terjadi pada sistem distribusi tenaga listrik akibat terjadinya distorsi gelombang arus dan tegangan. Pada dasarnya, harmonisa adalah gejala pembentukan

gelombang-gelombang dengan frekuensi berbeda yang merupakan perkalian bilangan bulat dengan frekuensi dasarnya. Hal ini disebut frekuensi harmonisa yang timbul pada bentuk gelombang aslinya sedangkan bilangan bulat pengali frekuensi dasar disebut angka urutan harmonisa. Misalnya, frekuensi dasar suatu sistem tenaga listrik adalah 50 Hz, maka harmonisa keduanya adalah gelombang dengan frekuensi sebesar 100 Hz, harmonisa ketiga adalah gelombang dengan frekuensi sebesar 150 Hz dan seterusnya.

Persamaan untuk frekuensi harmonisa adalah :[1]

$$h = nF \text{ (Hz)} \dots\dots\dots (1)$$

dimana:

h = frekuensi harmonisa orde ke- n

F = frekuensi fundamental sistem

n = orde dari harmonisa

Gelombang-gelombang tersebut kemudian menumpang pada gelombang murni atau aslinya sehingga terbentuk gelombang cacat yang merupakan penjumlahan antara gelombang murni sesaat dengan gelombang harmonisanya. Bila gelombang tersebut terdistorsi, maka akan terjadi suatu fenomena yang disebut dengan distorsi harmonisa, dimana distorsi

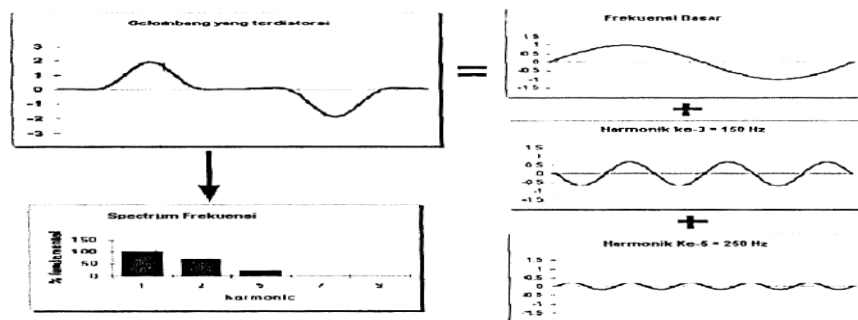
harmonisa ini disebabkan oleh beban non linier pada sistem tenaga listrik. Beban non linier yang menyebabkan bentuk gelombang arus tidak proporsional terhadap gelombang tegangannya. Gambar.1 menjelaskan prinsip terdiri atas tegangan sinusoidal yang ditransmisikan atau didistribusikan terdiri atas superposisi gelombang frekuensi dasar dengan gelombang frekuensi harmonisa sehingga gelombang tersebut tidak murni berbentuk sinusoidal. Berikut ini adalah beberapa pengertian dan persamaan yang terdapat dalam analisis harmonisa.

a. Komponen Harmonisa

Komponen Harmonisa atau biasa disebut harmonisa adalah gelombang yang mempunyai frekuensi kelipatan bilangan asli terhadap frekuensi dasar.

b. Orde Harmonisa

Orde dari harmonisa adalah perbandingan frekuensi harmonisa dengan frekuensi dasar, maka: [1]



Gambar 1. Bentuk gelombang harmonisa

$$n = \frac{fn}{F} \dots\dots\dots (2)$$

dimana :

n = orde harmonisa

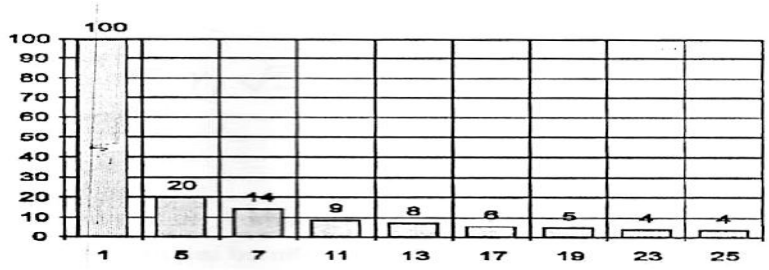
fn = frekuensi harmonisa ke- n

F = frekuensi dasar/fundamentaluy

c. Spektrum

Spektrum adalah distribusi dari semua amplitude komponen harmonisa sebagai fungsi dari

orde harmonisanya, dan diilustrasikan menggunakan histogram. Gambar 2 menjelaskan bahwa merupakan contoh dari spektrum. Dari Gambar tersebut dapat dikatakan bahwa spektrum merupakan perbandingan arus atau tegangan frekuensi harmonisa terhadap arus atau tegangan frekuensi dasar. Spektrum ini digunakan sebagai dasar untuk merencanakan filter yang akan digunakan dalam mereduksi harmonisa, terutama bila yang akan digunakan filter pasif.



Gambar 2. Bentuk spektrum harmonisa

d. Distorsi Harmonisa Total

Distorsi harmonisa total atau THD menyatakan besarnya distorsi yang ditimbulkan oleh semua komponen harmonisa dan didefinisikan sebagai:[2]

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{h=a} I_h^2}}{I_1} \dots\dots\dots(3)$$

dimana:
 THD = total distorsi harmonisa
 I_h = nilai arus rms ke-n
 I₁ = nilai arus rms pada frekuensi dasar.

e. Persamaan Fourier

Bentuk tegangan dan arus yang terdistorsi dapat diperoleh dengan menjumlahkan secara aljabar gelombang dasar (yang dibangkitkan oleh pembangkit) dengan gelombang-gelombang harmonisa yang mempunyai frekuensi dan amplitude yang bervariasi. Analisa fourier digunakan untuk menganalisis amplitude dan frekuensi dari gelombang sinusoidal yang terdistorsi. Teorema Fourier dalam bentuk gelombang kompleks dinyatakan sebagai berikut:[2]

$$Y(t) = Y_0 + \sum_{n=1}^{n=\infty} Y_n \sqrt{2} \sin(n2\pi ft - \vartheta_n) \dots(4)$$

dimana:
 Y₀ = amplitude dari komponen arus searah

dimana biasanya dalam jaringan distribusi bernilai nol.

Y_n = nilai rms dari harmonisa komponen ke-n
 f =frekuensi dasar (50 Hz)

φ_n = sudut fasa dari komponen harmonisa ke-n
 Persamaan Fourier ini dapat digunakan untuk menghitung secara matematis gelombang yang telah terdistorsi sehingga dapat diketahui gelombang dasar dan gelombang harmonisanya. Hal ini menjadi dasar dalam menganalisa harmonisa pada sistem tenaga listrik.

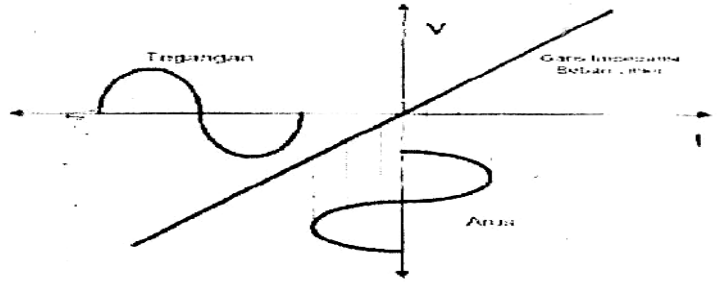
f. Nilai rms

Nilai rms yang dihasilkan oleh gelombang arus/tegangan yang terdistorsi harmonisa dapat dinyatakan dengan :[2]

$$I = \sqrt{\sum_{h=2}^{h=\max} I_h^2} = \sqrt{1 + THD^2} \dots\dots\dots(5)$$

Sumber Harmonisa

Ssistem tenaga listrik dikenal dua jenis beban yaitu beban linier dan beban non linier. Beban linier memberikan bentuk gelombang keluaran linier artinya arus yang mengalir sebanding dengan perubahan tegangan seperti pada Gambar 3.



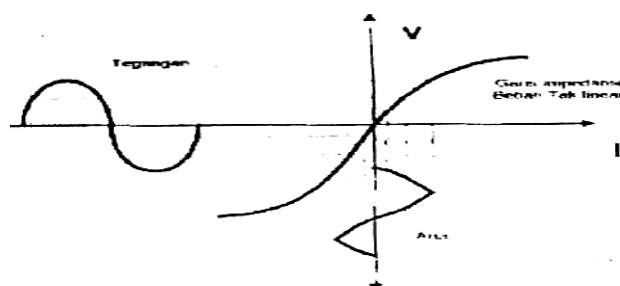
Gambar 3. Karakteristik gelombang arus pada beban linier

Sedangkan beban non-linier memberikan bentuk gelombang keluaran arus yang tidak sebanding

dengan tegangan dasar setiap setengah siklus sehingga bentuk gelombang arus maupun

tegangannya tidak sama dengan gelombang masukannya pada Gambar 4. Beban non-linier umumnya merupakan komponen semikonduktor yang pada proses kerjanya berlaku sebagai saklar yang bekerja pada setiap setengah siklus gelombang atau beban yang membutuhkan arus yang tidak tetap pada setiap periode waktunya. Contoh beban-beban non linier adalah seperti peralatan motor listrik, balast lampu TL,

transformator, dan peralatan elektronika daya yang juga termasuk peralatan beban non-linier. Proses kerja ini akan menghasilkan gangguan/distorsi gelombang arus yang tidak sinusoidal. Bentuk gelombang ini tidak menentu dan dapat berubah menurut pengaturan pada parameter beban-beban non-linier yang terpasang. Perubahan bentuk gelombang ini tidak berkaitan dengan sumber tegangannya.



Gambar 4. Karakteristik gelombang arus pada beban non linier

Beban non linier adalah penyebab harmonisa. Salah satu beban non linear yang luas digunakan oleh konsumen tenaga listrik adalah lampu penerangan dengan balast elektronik.

Akhir-akhir ini, konsumen industri dan komersial lebih banyak - menggunakan beban non linier. Pasokan tenaga terhadap konsumen tersebut tidak hanya memasok beban yang riil tetapi juga beban tambahan berupa arus dan tegangan harmonisa dan beban non linier. Rasio antara beban non linier dan beban linier akan memberikan adanya beban lebih harmonisa. Dibandingkan dengan beban linier yang bentuk gelombang arus maupun tegangannya selalu berbentuk sinusoidal dengan frekuensi yang sama, maka beban non linier akan mengakibatkan bentuk gelombang sinusoidal berubah bentuk menjadi tidak murni sinusoidal.

Efek-efek yang ditimbulkan oleh Harmonisa

a. Efek harmnisa terhadap penghantar

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

Efek kulit (skin effect) disebabkan distribusi arus di permukaan 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 dan 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 dan persamaan [3]

$$k_c = \frac{R_{ac}}{P_{dc}} = 1 + k_{SE} + k_{PE} \dots\dots\dots(6)$$

dimana :

kc= rasio perbandingan Rdc dengan Rac

Rac= tahanan penghantar pada arus bolak-balik

Rdc= tahanan arus searah

kse= penambahan tahanan akibat efek kulit (skin effect)

kpe= 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^[5]:

$$x = 0,027678 \sqrt{\frac{f \cdot u}{Rdc}} \dots\dots\dots(7)$$

dimana:

f = frekuensi dalam Hz

μ = permeabilitas magnet dari konduktor (sama dengan satu untuk material nonmagnet)

Rdc= tahanan arus searah dalam Ω / 1000 ft

$$K_{SE}(x) = 10^{-3}(-0,2x^5 + 6,616x^4 - 83,345x^3 + 500x^2 - 1061,9x + 769,63) \dots\dots\dots (8)$$

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

$$K_{PE} = k_{SE} \sigma^2 \left(\frac{1,18}{k_{SE} + 0,27} + 0,312 \sigma^2 \right) \dots\dots(9)$$

dengan σ adalah perbandingan antara diameter penghantar dengan jarak antar penghantar^[6]. Setelah didapat nilai k_{SE} dan k_{PE} maka didapat juga nilai R_{AC} . Dengan demikian diperoleh nilai tahanan penghantar saat distorsi (R_h), [4]

$$R_{AC} = k_c \cdot R_{DC} \text{ dan } R_h = R_{DC} + R_{AC}$$

sehingga,

$$R_h = R_{DC} \cdot (k_c + 1) \dots\dots\dots (10)$$

Besarnya rugi-rugi tembaga atau rugi-rugi penghantar akibat terdapatnya komponen harmonisa didalam arus beban dapat dihitung dengan persamaan:[3]

$$P_{SR} = \sum_{h=1}^{\infty} I_h^2 \cdot R_h \dots\dots\dots (11)$$

dimana :

P_{SR} = rugi-rugi pada penghantar

I_h = arus pada frekuensi orde ke h

R_h = tahanan penghantar untuk frekuensi dengan orde ke h

b. Efek Harmonisa Terhadap Transformator Distribusi

Pada dasarnya transformator dirancang untuk menyalurkan daya ke beban dengan rugi-rugi sekecil mungkin pada frekuensi dasar. Distorsi harmonisa pada arus dan tegangan akan menyebabkan efek yang signifikan panas pada transformator. Secara umum jika nilai distorsi pada suatu transformator melebihi 5%, maka ini adalah tanda bahwa transformator tersebut mengalami derating akibat harmonisa.

Ada beberapa hal yang dapat menyebabkan peningkatan panas pada transformator yang merupakan akibat dari distorsi harmonisa yaitu:

a. Kenaikan arus rms

Saat komponen-komponen harmonisa mengalir

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 [3]

$x \leq 2$ berlaku:

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

$2 < x \leq 10$ berlaku :

bersama dengan arus beban, nilai rms dari arus beban akan mengalami peningkatan. Hal ini dapat menyebabkan arus yang mengalir pada transformator melebihi arus ratingnya. Jadi kenaikan nilai rms arus menyebabkan peningkatan harga rugi-rugi pada penghantar.

b). Peningkatan rugi-rugi arus eddy

Ini merupakan arus induksi yang disebabkan oleh fluksi magnetik. Arus tersebut mengalir pada seluruh bagian transformator yang terbuat dari bahan penghantar sehingga menyebabkan pemanasan tambahan. Nilai rugi-rugi ini sebanding dengan kuadrat dari frekuensi-frekuensi arus harmonisa.

1). Rugi inti

Kenaikan nilai rugi inti biasanya bernilai tidak terlalu besar. Hal ini tergantung dari jenis besi dan laminasi inti yang digunakan dan juga desain dari inti transformator tersebut.

Rugi-rugi pada transformator terdiri atas dua yaitu:[4]

- a. Rugi-rugi tanpa beban atau *no load loss* (P_{NL}) dan
- 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 harmonisa yang besar, rugi-rugi arus eddy pada kumparan adalah paling dominan. [4]

$$P_{LOSS} = P_{NL} + P_{LL} \dots\dots\dots (12)$$

Dan

$$P_{LL} = P_R + P_{EC} + P_{ST} \dots\dots\dots (13)$$

Dari uraian diatas, rugi-rugi daya pada transformator secara signifikan akibat kehadiran komponen-komponen harmonisa pada tegangan dan terutama pada rugi-rugi arus arus beban adalah rugi-rugi tembaga, rugi-rugi histerisis dan rugi-rugi arus eddy.

2). Rugi-Rugi Tembaga

Komponen rugi-rugi tembaga pada transformator adalah I^2R , dimana arus (I) akan dapat menjadi lebih besar nilainya akibat terdapatnya komponen-komponen harmonisa. Begitu juga dengan nilai tahanan (R), saat terjadi distorsi harmonisa, nilai R berubah menjadi nilai tahanan arus searah (R_{DC}) ditambah R_{AC} yang merupakan nilai tahanan tambahan akibat efek kulit (*skin effect*) dan efek kedekatan penghantar (*proximity effect*) sebagai dampak dari adanya frekuensi-frekuensi harmonisa.[4]

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

$$PR = \sum_{h=1}^{h_{max}} I_h^2 \cdot R^h \dots\dots\dots (14)$$

dimana:

P_R = rugi-rugi tembaga

I_h = arus komponen harmonisa ke-h

R_h = tahanan untuk frekuensi harmonisa ke-h

Arus harmonisa 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 (*skin*) 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.

3). Rugi-Rugi Arus eddy

Rugi arus eddy perlu diamati karena distorsi arus beban relatif lebih tinggi. Dengan arus-arus frekuensi harmonisa 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[5]. 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[4]:

$$P_{EC} = P_{EC-f} \cdot \sum_{h=1}^{h_{max}} I_h^2 \cdot h_2 \dots\dots\dots (15)$$

dimana:

h = bilangan bulat orde komponen harmonisa

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

I_h = arus rms harmonisa ke-n (p.u of rated load rms

current)

4). Rugi-Rugi Histeresis

Bila luas penampang inti besi (A), panjang rangkaian magnet (l) dan jumlah lilitan (N) maka perubahan fluks yang terjadi $d\phi$. Untuk suatu perubahan waktu kecil dt adalah $d\phi/dt$, tegangan induksi (e) dinyatakan dengan :[4]

$$e = -N \frac{d\phi}{dt} \dots\dots\dots (16)$$

Daya sumber untuk mengimbangnya akan sama dengan :

Dalam interval waktu dt , energi yang diberikan adalah :

$$dW = (-e)i = Ni \frac{d\phi}{dt} \dots\dots\dots (17)$$

$$W = \int_{-o}^{+o} Ni d\phi \text{ (Joules)} \dots\dots\dots (18)$$

Untuk $d\phi = A dB$ dan $Ni = H.l$, dimana B adalah kerapatan fluks weber/m² dan H adalah kuat medan magnet (Ampere-lilitan/m) maka persamaan diatas menjadi:

$$W = A.l \int_{-B_m}^{+B_m} H.dB \dots\dots\dots (19)$$

Persamaan diatas tidak dapat diturunkan karena fungsi yang tidak diketahui saling berkaitan satu sama lain, menurut percobaan yang dilakukan Charles P Steinmetz bahwa area itu besarnya sebanding dengan frekuensi dan B_m^x , nilai x untuk Fe-C, adalah 1,6 sedangkan untuk Fe-Si berkisar antara 1,7 - 2,0 , sehingga persamaan diatas menjadi:[4]

$$P_h = \eta . A.l.f.B_m^x \dots\dots\dots (20)$$

Dimana

P_h = rugi histeresis (Watt)

η = konstanta material inti

f = frekuensi (Hz)

B_m = kerapatan fluks maksimum

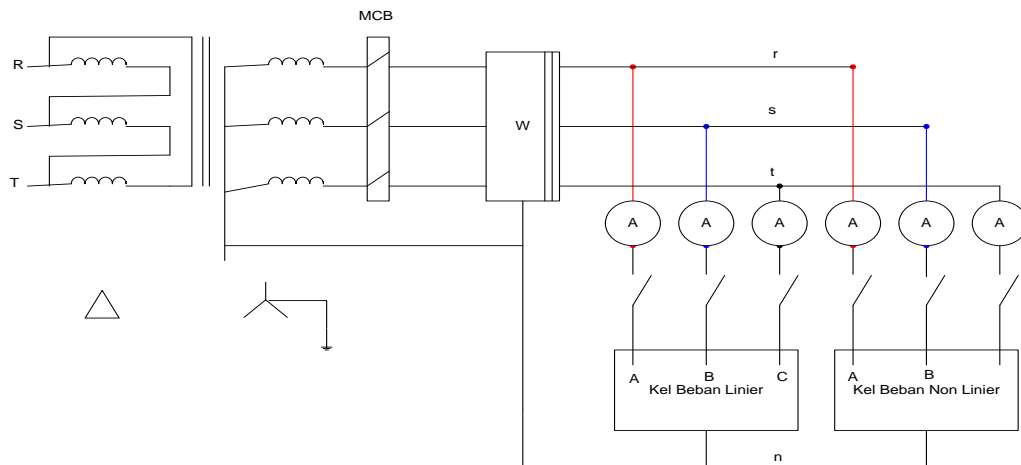
3. METODE PENELITIAN

3.1. Waktu dan Tempat Penelitian.

Waktu penelitian di mulai 12 April 2009 sampai tanggal 17 Mei 2009, tempat penelitian dilaksanakan Balai Latihan Kerja Teknik PEMDA DKI JAKARTA PUSAT.

3.2. Rancangan Skenario Pembebanan Sistem Transformator Distribusi

Rancangan pengukuran diperlihatkan pada gambar 5, transformator untuk 3 phasa diberi beban linier dan beban non linier. [5]



Gambar 5. Skematik diagram pembebanan dengan beban linier dan non linier.

Adapun skenario rangkaian pengujian yang dilakukan untuk pengukuran beberapa parameter adalah seperti tabel 3.1 dibawah ini. Beban linear yang akan digunakan adalah berupa lampu merkuri. Hal ini dilakukan agar pada beban tidak terjadi pembentukan komponen-komponen harmonisa sama sekali. Arus rating transformator yang digunakan adalah 1,5/ 22 A pada kedua sisi.

Sedangkan beban non linier yang digunakan untuk beban simulasi adalah lampu fluorescent dan motor-motor listrik dimana berdasarkan referensi bahwa lampu fluorescent dan motor-motor listrik ini cukup memiliki karakteristik harmonisa. Dengan demikian pembebanan akan dilakukan dengan skenario seperti tabel 3.1 berikut ini.

Tabel 1 Skenario pembebanan untuk pada transformator distribusi 3 fasa

Tingkat Pembebanan Trafo	Beban Linier (lampu merkuri) Daya (W)	Beban Non Linier (Lampu fluren + motor-motor) Daya (W)
25.0%	3.000	3.000
37.5%	4.500	4.500
50.0%	6.000	6.000
62.5%	7.500	7.500
75.0%	9.000	9.000

Pengukuran daya akan dilakukan dengan rangkaian seperti Gambar 5. Pembebanan seperti diatas direncanakan pada sisi sekunder. Pembebanan 100% tidak dilakukan untuk menghindari arus berlebih pada sisi primer transformator pengujian. Pada beban linear nilai rugi-rugi yang akan muncul adalah rugi inti (P_{NL}), rugi-rugi tembaga (P_R), rugi-rugi arus eddy (P_{EC}) dan rugi-rugi histerisis (P_H). Dari empat nilai rugi-rugi daya tersebut nilai rugi daya yang tergantung pada arus beban adalah P_R , P_{EC} dan P_H . Untuk beban linear rugi daya P_R hanyalah I^2R , sedangkan nilai rugi arus eddy dan rugi histerisis relatif bernilai

kecil. Untuk rugi inti atau P_{NL} nilainya didapat dari pengujian beban nol.

Sedangkan beban non linear digunakan untuk mendapatkan suatu karakteristik beban yang dapat menghasilkan arus harmonisa. Berdasarkan keterbatasan yang dimiliki oleh transformator pengujian yaitu arus rating 1,5 A sisi Primer dan 22 A sisi sekunder, maka beban non linear yang dapat digunakan menggunakan beberapa unit lampu fluorescent dengan balast elektronik, ditambah dengan beberapa unit motor, yang dilakukan di Lab Listrik dan peralatan Pemda DKI Jakarta.

Lampu fluorescent balast elektronik dan motor-motor listrik ini memiliki karakteristik harmonisa yang cukup sehingga dapat dijadikan beban simulasi distorsi harmonisa terhadap transformator daya. Komponen harmonis terjadi akibat karakteristik kerja dari balast elektronik dan pengaturan elektronik

motor-motor listrik seperti yang sudah dijelaskan dalam bab sebelumnya. Adapun skenario yang dibuat agar dapat dilakukan analisis terhadap hasil pengujian adalah pada Tabel 1..

Kondisi	Beban	Jenis Beban	Daya(W)	Phasa		
				R	S	T
Seimbang	25,0%	Linier Lampu Merkuri	3.000	1.000	1.000	1.000
	37,5%		4.500	1.500	1.500	1.500
	50,0%		6.000	2.000	2.000	2.000
	62,5%		7.500	2.500	2.500	2.500
	75,0%		9.000	3.000	3.000	3.000
Tak Seimbang	25,0%	Linier Lampu Merkuri	3.000	2.000	-	1.000
	37,5%		4.500	-	3.000	1.500
	50,0%		6.000	1.000	500	4.500
	62,5%		6.000	4.000	1.000	1.000
	75,0%		9.000	4.000	1.000	4.000
Seimbang	25,0%	Non Linier Lampu Flurence & Motor	3.000	1.000	1.000	1.000
	37,5%		4.500	1.500	1.500	1.500
	50,0%		6.000	2.000	2.000	2.000
	62,5%		7.500	2.500	2.500	2.500
	75,0%		9.000	3.000	3.000	3.000
Tak Seimbang	25,0%	Non Linier Lampu Flurence & Motor	3.000	2.000	-	1.000
	37,5%		4.500	-	3.000	1.500
	50,0%		6.000	1.000	500	4.500
	62,5%		6.000	4.000	1.000	1.000
	75,0%		9.000	4.000	1.000	4.000

Tingkat pembebanan pada transformator distribusi 3 fasa yang dirancang juga memiliki tingkatan arus yang sama dengan skenario pembebanan beban linier dan non linear seperti

Tabel 2 diatas. Hal ini dilakukan untuk mendapatkan hasil pengujian yang dapat dibandingkan sehingga dapat dilakukan analisis terhadapnya.

3.3 Metode Pengukuran Pengaruh Harmonisa terhadap Transformator Distribusi

Metode pengukuran yang dilakukan adalah dengan menggunakan alat ukur yang disebut Hi-Power Tester and Analyzer tipe 3169 merek HIOKI yang dapat menunjukkan beberapa parameter yang dibutuhkan untuk menganalisa pengaruh harmonisa terhadap transformator distribusi. Adapun parameter-parameter tersebut diantaranya adalah tegangan, arus, daya aktif, daya semu, daya reaktif, frekuensi, dan lain-lain. Spesifikasi transformator uji yang digunakan adalah :

Mrek : Starlit
Phase : 3
Kapasitas : 15 kVA
Tegangan : 20 kV/ 400V
Arus Hubung singkat : 1,5 A / 22 A
Belitan hubungan : Δ -Y
Impedansi : 4%

Spesifikasi beban trafo terdiri dari:

Jenis-jenis Beban Linier:

Lampu : Merkuri
Daya : 500 Watt
Tegangan : 380/220
Jumlah : 18 unit

Jenis beban Non linier

Lampu : Flurentce
Daya : 18 watt
Merek : Philip
Tegangan : 220 Volt
Jumlah : 30 unit
Motor AC : 3 phasa
Daya : Ada 3 pilihan (1 kW; 2,5 kW; 5 kW)
Tegangan : 380 volt
Frekuensi : 50 Hz
Cos phi : 0,8
Buatan : Cina

Perbandingan tegangan dibutuhkan karena yang akan dianalisa adalah pengaruh penambahan rugi-rugi pada transformator akibat pengaruh harmonisa. Untuk transformator 3 fasa dilakukan pengukuran besarnya daya sekunder sebelum dibebani. Pada bab sebelumnya dijelaskan juga bahwa rugi-rugi daya pada transformator karena pengaruh harmonisa ada dua yaitu rugi-rugi akibat beban yang dilayani. Dan yang termasuk rugi-rugi daya yang diperhitungkan untuk pengukuran ini adalah rugi-rugi akibat beban yaitu rugi tembaga dan rugi arus eddy. Perhitungan rugi-rugi yang pertama dapat dilakukan adalah perhitungan untuk rugi tembaga akibat harmonisa. Nilai I_h sesuai dengan data pengukuran, R_h didapat melalui persamaan pada bab 2. Sebagai catatan ada beberapa variabel yang tetap pada transformator distribusi 3 fasa yaitu permeabilitas konduktor (μ) adalah sebesar 1 untuk logam, tahanan transformator pada arus dc (R_{DC}) adalah sebesar 2.3Ω dan perbandingan antara diameter konduktor dan jarak antara konduktor (σ) adalah $1\text{mm}/0.25 \text{ mm}$ atau sama dengan 4. Sedangkan beberapa variabel yang tetap pada transformator distribusi 3 fasa yaitu permeabilitas konduktor (μ) adalah sebesar 1 untuk logam, tahanan transformator pada arus dc (R_{DC}) adalah sebesar 0.13Ω dan perbandingan antara diameter konduktor dan jarak antar konduktor (σ) adalah $1\text{mm}/0.25 \text{ mm}$ atau sama dengan 4.

Dari beberapa variabel tetap dan parameter hasil pengukuran maka akan dilakukan perhitungan rugi-rugi daya pada transformator 3 fasa akibat pengaruh harmonisa, yang akan dibahas pada bab IV. Perhitungan rugi-rugi daya yang terdapat pada transformator distribusi 3 fasa akibat pengaruh harmonisa dapat dihitung berdasarkan pada saat beban terpasang adalah beban non linier, hal ini berarti pada arus dan tegangan rangkaian akan muncul distorsi sebagai akibat dari terdapatnya komponen-komponen harmonisa yang berasal dari balast elektronik.

Dengan terdapatnya distorsi harmonisa maka nilai rugi-rugi daya yang terjadi akan mengalami beberapa penambahan. Sebagaimana kita ketahui, dari persamaan (12), $P_{Loss} = P_{NL} + P_{LL}$ dan $P_{LL} = P_R + P_{EC} + P_{ST}$. Nilai rugi-rugi tembaga yang terjadi akan mengalami perubahan akibat efek kulit dan efek kedekatan. Rugi-rugi tembaga yang semula hanya bernilai I^2R saja, akan berkembang menjadi

$$\text{persamaan (2.56) sebesar } P_R = \sum_{h=1}^{h_{\max}} I_H^2 \cdot R_h \cdot$$

Kemudian untuk rugi-rugi arus eddy, juga akan mengalami perubahan sesuai dengan persamaan

$$(15) \text{ sebesar } P_{EC} = P_{EC-f} \cdot \sum_{h=1}^{h_{\max}} I_h^2 \cdot h^2 \cdot \text{Rugi-rugi}$$

yang juga dapat dipengaruhi oleh kehadiran komponen-komponen harmonisa adalah rugi-rugi histerisis. Rugi-rugi histerisis dapat dihitung dengan persamaan (20) sebesar $P_h = \eta A.l.f.B_m^x$. Maka dengan demikian pada kondisi beban non linier yaitu kondisi gelombang sinusoidal tidak murni, komponen pada orde harmonisa akan turut menyumbang nilainya pada nilai rugi-rugi daya pada transformator distribusi. **Metode Pengukuran Perubahan Suhu pada Transformator Distribusi**

Pengukuran perubahan suhu dilakukan juga secara bergantian sesuai dengan skenario tingkat pembebanan pada masing-masing transformator 3 fasa. Alat ukur suhu yang digunakan adalah termometer inframerah digital. Data perubahan suhu ini diperlukan untuk mengetahui kebenaran teori yang mengatakan bahwa semakin bertambahnya rugi-rugi arus eddy maka panas yang timbul pada inti transformator distribusi akan semakin besar artinya suhu pada transformator distribusi akan meningkat juga.

Metode yang akan diterapkan dalam pelaksanaan penelitian diuraikan melalui pentahapan, dan metode lapangan dengan cara melakukan pengukuran pada transformator uji saat melayani beban non linier sejenis Lampu Fluorecent dan beban linier sejenis Resistor Murni yang menggunakan alat ukur PQM dan Termometer Inframerah kemudian hasil pengukuran dianalisa dan dibahas, sehingga diperoleh suatu kesimpulan.

4. ANALISIS dan BAHASAN

4.1. Pengukuran Transformator 3 fasa Akibat Beban Linier dan Beban Non Linier

Tujuan dilakukannya Pengukuran ini adalah untuk melihat rugi-rugi daya transformator yang terjadi saat melayani beban linier dibandingkan dengan rugi-rugi daya trafo saat melayani beban non linier pada tingkat pembebanan yang sama.

Sesuai dengan tingkat pembebanan dapat dilihat pengaruh tingkat pembebanan transformator terhadap rugi-rugi yang terjadi antara beban linier dengan beban non linier yang dilakukan secara bergantian. Pengamatan dan pengukuran beberapa parameter-parameter untuk mengetahui rugi-rugi daya pada transformator akibat pengaruh harmonisa selama 10 menit untuk masing-masing tingkat pembebanan. Pengukuran yang diperoleh untuk setiap rating beban linier dan non linier diperlihatkan pada Tabel 2 dibawah ini.

Tabel 3. Pengukuran rugi-rugi daya pada transformator dengan beban Linier dan non Linier.

Tingkat Pembebanan	Tegangan (V)		Arus (A)		Daya (W)		Selisih Arus (A)
	B. Linier	B. N Linier	B. Linier	B.N Linier	B. Linier	B.N Linier	
25,0	400	400	5,413	5,611	3.000	3.000	0,198
37,5	400	400	8,12	8,417	4.500	4.500	0,297
50,0	400	398	10,88	11,276	6.000	6.000	0,396
62,5	400	395	13,71	14,205	7.500	7.500	0,495
75,0	400	390	16,65	17,244	9.000	9.000	0,594

Pada tabel tersebut di atas terlihat jelas bahwa terdapat perbedaan tegangan dan arus listrik pada saat transformator diberi beban linier dan non linier. Makin besar beban yang diterapkan pada transformator bakin besar perbedaan arus dan tegangan output yang terjadi hal ini terlihat pada pembebanan 25 %, 37, 5 %, 50 %, 62,5 % dan 75 %.

Dapat dikatakan bahwa rugi-rugi daya pada transformator akibat pengaruh beban non linier selalu lebih besar dari beban linier, dan beban non linier ikut menyebabkan bertambahnya rugi-rugi daya yang terjadi pada transformator.

Pada Tabel 2, dapat dilihat bahwa pada tingkat pembebanan mulai dari 25 %, rugi-rugi daya trafo akibat beban non linier memiliki nilai cenderung lebih besar 0.509 % dibandingkan rugi-rugi daya pada trafo akibat beban linier. Kecenderungan serupa juga terjadi pada tingkat pembebanan selanjutnya yaitu tingkat pembebanan 37.5 % rating sebesar 1.131 %, 50 % rating sebesar 1.37 %, 62.5 % rating sebesar 1.049 % dan 75 % rating sebesar 1.05 %.

Melihat hasil yang didapat melalui pengukuran, dimana rugi-rugi daya pada transformator akibat beban non linier selalu lebih besar dari beban linier pada delapan tingkat pembebanan, membuktikan bahwa komponen harmonisa turut menyebabkan bertambahnya rugi-rugi daya yang terjadi pada trafo rata-rata sebesar 1.023 % saat bekerja melayani beban non linier pada tingkat pembebanan. 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.

Rugi-rugi lain yang terjadi pada transformator akibat pengaruh harmonisa terdiri atas rugi tembaga, rugi arus eddy dan rugi-rugi histerisis yang selalu terdapat pada transformator pada saat bekerja melayani beban. Menurut standart IEEE C57.110-1986 menyatakan bahwa besar faktor rugi-rugi arus eddy (P_{EC-f}) adalah 5 % dari rugi-rugi daya dasar pada frekuensi dasar.

Dapat dikatakan bahwa dengan meningkatkan nilai

komponen-komponen harmonisa atau arus-arus harmonisa 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 harmonisa 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 harmonisa saja. Hal ini karena konstanta x pada perhitungan perubahan nilai tahanan (R_h) akibat efek kulit (skin effect) dan efek kedekatan (Proximity effect) hanya dipengaruhi oleh frekuensi komponen harmonisa, permeabilitas konduktor dan nilai tahanan awal (R_{DC}). Pada pengukuran ini, komponen harmonisa yang dapat terbaca hanya sampai orde ke-3, dengan demikian apabila terdapat alat ukur yang bisa membaca orde lebih tinggi lagi maka nilai tahanan transformator dapat saja meningkat apabila muncul komponen-komponen harmonisa pada frekuensi-frekuensi tinggi tersebut.

Perhitungan rugi-rugi tembaga seperti pada persamaan (2.56), perubahan arus sangat mempengaruhi besarnya rugi-rugi ini. Meskipun frekuensi turut juga diperhitungkan pada saat memperhitungkan perubahan nilai tahanan akibat harmonisa namun efeknya tidak signifikan. Lain halnya dengan perhitungan rugi-rugi arus eddy pada persamaan (2.57) dimana besar frekuensi komponen harmonisa akan sangat berpengaruh. Melalui data-data dan pengukuran tersebut di atas maka rugi-rugi tembaga, rugi-rugi arus eddy dan arus histerisis dapat di analisa.

4.2. Analisa Rugi daya pada beban Non Linier.

Ada dua analisa rugi-rugi daya yang dilakukan pada transformator pada saat melayani beban Non linier:

- a. Menganalisa rugi-rugi tembaga
- b. Menganalisa rugi-rugi Eddy Current.

4.2.1 Analisa rugi – rugi tembaga.

Sebagai dasar diambil salah satu contoh pada tingkat pembebanan 25 % maka dapat

dihitung di bawah ini :

Frekuensi diambil pada orde 1 sebagai contoh (f)
Perbandingan antara diameter konduktor dan jarak antara konduktor (σ), = 1,5 mm/6 mm atau 0,25.
Arus harmonisa (I_h) = 0,198 A. Berdasarkan

Berdasarkan pendekatan kurva dilakukan untuk mendapatkan perhitungan K_{SE} sesuai dengan persamaan (8) yaitu dengan catatan $x =$

0,129049 artinya $x \leq 2$, maka diperoleh :

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

$$K_{SE} = 0,0000003$$

Sedangkan nilai KPE yang merupakan suatu harga penambahan nilai tahanan akibat efek kedekatan didapat dari persamaan (9) :

$$K_{PE} = \frac{1,18}{0,0000003 + 0,27} + 0,312\{4\}^2$$

$$K_{PE} = 0,00005$$

Frekuensi harmonisa ini juga mempengaruhi besarnya tahanan arus bolak balik (RAC) 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 kc ^[5]. Nilai kc dapat diperoleh berdasarkan persamaan (6):

$$kc = 1 + 0,0000003 + 0,00005$$

$$kc = 1,0000503$$

Melalui perhitungan diatas maka diperoleh tahanan penghantar saat distorsi sesuai dengan persamaan (2-52) :

$$R_h = 2.3 \cdot (1,0000503 + 1)$$

$$R_h = 4,60012 \Omega$$

Sehingga besarnya rugi-rugi tembaga akibat terdapatnya komponen harmonisa di dalam arus beban dapat dihitung sesuai dengan persamaan (14):

a. Analisa Rugi transformator pada beban 25 %.

Pada orde $h = 1, 3$ dan 5 yang merupakan fungsi ganjil:

persamaan (7) diperoleh nilai paramter x :

$$x = 0,027678 \sqrt{\frac{50 \text{ Hz} \cdot \text{Permeabilitas konduktor } (\mu), = 1 \text{ untuk jenis logam}}{2,3 \Omega}}$$

$$X = 0,129049$$

$$P_R = \sum_{h=1}^{h_{\max}} (0,1980^2 \cdot x 4,60012^3) + (0,198^2 \cdot x 4,60012^5)$$

$$P_R = 84,75 \text{ W}$$

Dan rugi eddy current di analisa dengan persamaan (15)

$$P_{EC} = P_{EC-f} \cdot \sum_{h=1}^{h_{\max}} I_h^2 \cdot h_2^{[5]}$$

$$P_{EC} = 300 \times [(0,198) \cdot (1)^2 + (0,198) \cdot (3)^2 + (0,198) \cdot (5)^2]$$

$$= 441,62 \text{ watt}$$

Ketreangan :

P_{EC-f} : Merupakan rugi tetap (inti besi) pada saat test beban nol = 300 Watt.

b. Analisa Rugi transformator pada beban 37,5 %.

Pada orde $h = 1, 3$ dan 5 yang merupakan fungsi ganjil:

$$P_R = \sum_{h=1}^{h_{\max}} (0,297^2 \cdot x 4,60012^3) + (0,297^2 \cdot x 4,60012^5)$$

$$P_R = 192,15 \text{ W}$$

Dan rugi eddy current di analisa dengan persamaan (15)

$$P_{EC} = P_{EC-f} \cdot \sum_{h=1}^{h_{\max}} I_h^2 \cdot h_2^{[5]}$$

$$P_{EC} = 300 \times [(0,297) \cdot (1)^2 + (0,297) \cdot (3)^2 + (0,297) \cdot (5)^2]$$

$$= 926,2 \text{ watt}$$

c. Analisa Rugi transformator pada beban 50 %.

Pada orde $h = 1, 3$ dan 5 yang

merupakan fungsi ganjil:

$$P_R = \sum_{h=1}^{h_{\max}} (0,396^2 \cdot x4,60012^1) + (0,396^2 \cdot x4,60012^3) + (0,396^2 \cdot x4,60012^5)$$

$$P_R = 340 \text{ Watt}$$

Dan rugi eddy current di analisa dengan persamaan (2-57)

$$P_{EC} = P_{EC-f} \cdot \sum_{h=1}^{h_{\max}} I_h^2 \cdot h_2^{[5]}$$

$$P_{EC} = 300 \times [(0,396) \cdot (1)^2 + (0,396) \cdot (3)^2 + (0,396) \cdot (5)^2]$$

$$= 1646,6 \text{ watt}$$

d. Analisa Rugi transformator pada beban 62,5 %.

Pada orde h = 1, 3 dan 5 yang merupakan fungsi ganjil:

$$P_R = \sum_{h=1}^{h_{\max}} (0,495^2 \cdot x4,60012^1) + (0,495^2 \cdot x4,60012^3) + (0,495^2 \cdot x4,60012^5)$$

$$P_R = 530 \text{ W}$$

Dan rugi eddy current di analisa dengan

persamaan (15)

$$P_{EC} = P_{EC-f} \cdot \sum_{h=1}^{h_{\max}} I_h^2 \cdot h_2^{[5]}$$

$$P_{EC} = 300 \times [(0,495) \cdot (1)^2 + (0,495) \cdot (3)^2 + (0,495) \cdot (5)^2]$$

$$= 2.572,76 \text{ watt}$$

e. Analisa Rugi transformator pada beban 75 %.

Pada orde h = 1, 3 dan 5 yang merupakan fungsi ganjil:

$$P_R = \sum_{h=1}^{h_{\max}} (0,594^2 \cdot x4,60012^1) + (0,594^2 \cdot x4,60012^3) + (0,594^2 \cdot x4,60012^5)$$

$$P_R = 762,7 \text{ W}$$

Dan rugi eddy current di analisa dengan persamaan (15)

$$P_{EC} = P_{EC-f} \cdot \sum_{h=1}^{h_{\max}} I_h^2 \cdot h_2^{[5]}$$

$$P_{EC} = 300 \times [(0,594) \cdot (1)^2 + (0,594) \cdot (3)^2 + (0,594) \cdot (5)^2]$$

$$= 3.705 \text{ watt}$$

Hasil analisa rugi-rugi daya tersebut di atas dapat dilihat pada tabel 3 berikut.

Tabel 4 Total rugi-rugi pada transformator 3 fasa akibat pengaruh harmonisa

Tingkat Pembebanan dari Kapasitas Trafo Uji (%)	Rugi-rugi Tembaga (Watt)	Rugi-rugi Eddy (Watt)	Total Rugi-rugi
25.00	84,75	441,62	526,37
37.50	192,5	926,20	1.118,70
50.00	340	1.646,63	1.986,63
62.50	530	2.572,83	3.102,83
75.00	762,7	3.705,00	4.467,70

Tabel 3 menunjukkan bila tingkat pembebanan meningkat maka rugi-rugi yang akan terjadi pada transformator naik juga. Dari hasil pengukuran, dimana rugi-rugi daya pada transformator akibat beban non linier selalu lebih besar dari beban linier harmonisa pada beberapa tingkat pembebanan yang dilakukan, membuktikan bahwa komponen harmonisa turut menyebabkan bertambahnya rugi-rugi daya yang terjadi pada transformator saat bekerja melayani beban non linier pada tingkat pembebanan rendah sekalipun. 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. Menurut standart IEEE C57.110-1986 menyatakan bahwa besar faktor rugi-rugi arus eddy (P_{EC-f}) adalah 5 % dari rugi-rugi daya dasar pada frekuensi dasar. Jika daya transformator 15. kVA

atau 12 kW, maka rugi daya maksimum yang di izinkan adalah 600 watt.

Tabel 3 diatas menunjukkan peningkatan rugi-rugi yang terjadi akibat pengaruh harmonisa terhadap transformator jelas terlihat dan sesuai dengan peningkatan tingkat pembebanan maka rugi-rugi yang terjadi adalah cenderung meningkat juga. Dengan frekuensi harmonisa lebih tinggi menyebabkan rugi-rugi inti yang sebanding terhadap kuadrat arus beban rms dan kuadrat frekuensi dan arus eddy lebih tinggi pada ujung belitan pada transformator karena efek kerapatan medan magnet bocor pada kumparan. Pertambahan rugi-rugi arus eddy karena harmonisa dengan tingkatan pembebanan yang dilakukan secara bertahap berpengaruh nyata juga pada temperature kerja transformator. Untuk lebih jelasnya pengukuran perubahan temperature pada

transformator yang mempunyai keterkaitan dengan

panas diperoleh seperti pada Table 4.

Tabel 5 Perubahan suhu berdasarkan tahapan tingkatan pembebanan

Tingkat pembebanan dari transformator uji %	Power Faktor PF	Arus Harmonik A	Rugi-Rugi- arus sddy (watt)	SUHU °C			
				Inti		Tembaga	
				SEBELUM	SESUDAH	SEBELUM	SESUDAH
25,00	0,7800	0,198	441,62	25,0	29,0	26,9	29
37,50	0,9840	0,297	926,20	30,6	33,2	30,4	37,6
50,00	0,9860	0,369	1.646,60	34,4	38,5	32,4	40,1
62,50	0,8250	0,495	2.572,76	35,8	42,8	37,6	46,8
75,00	0,8290	0,594	3.705,00	35,9	55,5	38,8	58,6

Pengaturan suhu yang dilakukan berdasarkan tingkat pembebanan maka peningkatan suhu yang terlihat pada table 4, bahwa pada tingkat pembebanan mulai dari 25% sebesar 53,70%, pembebanan suhu pada inti transformator cenderung lebih meningkat karena efek kerapatan medan magnet bocor pada kumparan. Kecenderungan serupa juga terjadi pada tingkat pembebanan selanjutnya yaitu tingkat pembebanan 37,5% sebesar 52,04%, 50% sebesar 50,57%, 62,5% sebesar 50,69% dan 75% rating sebesar 50,75%. Sesuai standar IEC 60 ° C pada suhu maksimum tidak boleh dilampaui, apabila terlampaui transformator akan rusak (belitan akan terbakar), untuk mencegah hal tersebut system proteksi harus mampu memutuskan suplai daya ke beban.

5. KESIMPULAN

Berdasarkan pembahasan dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut semakin tinggi tingkat pembebanan trafo, maka semakin besar rugi-rugi daya akibat beban non linier dibandingkan dengan rugi-rugi daya akibat beban linier yaitu pada tingkat pembebanan mulai 25%, rugi-rugi daya transformator akibat beban non linier memiliki nilai cenderung lebih besar 0,509% dibandingkan rugi-rugi daya pada trafo akibat beban linier. Kecenderungan serupa juga terjadi pada tingkat pembebanan selanjutnya yaitu tingkat pembebanan 37,5% rating sebesar 1,131%, 05% rating sebesar 1,37%, 62,5% rating sebesar 1,049% dan 75% rating sebesar 1,05%

Pengukuran suhu dengan tingkat pembebanan yang berbeda diperoleh peningkatan suhu yaitu pada tingkat pembebanan mulai dari 25% sebesar 53,69% dan 75% rating sebesar 50,70%. Perubahan suhu pada inti transformator ini cenderung lebih meningkat adalah disebabkan oleh efek kerapatan medan magnet bocor pada kumparan.

Standar IEC bahwa total rugi daya pada inti besi maksimum adalah 5 % dari kapasitas daya

terpasang atau sebesar 600 watt, setelah transformator dibebani pada pembebanan 75 % (pada beban non linier) dari kapasitas trafo rugi-rugi inti besi mencapai 3.705 Watt, atau sekitar 40 %. Sehingga menyebabkan panas yang tinggi pada trafo, yang dapat berakibat kerusakan.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] *"Guide for Application of Transformation Connection in Three Phase Distribution System"*, ANSI/IEEE C57.105-1978
- [2] S. Key, Thomas *"Cost and benefit of harmonic current reduction for switch-mode power supplies in commercial office building"* IEEE Transaction on industri applicat, Vol. 32, no 5, Sep 1996.
- [3] D.E Rice, *"Adjustable speed drive for rectifier harmonic-their effect on power system component"* IEEE tran. Ind. Aplicat vol IA-22 pp. 161-177 Jan/Feb 1986
- [4] *Recommended Practices for Transformer Capability when Supplying Non Sinusoidal Load Current"*, IEEE Standard C57.110-1986
- [5]. M. Pasasibu, *Pedoman Pengujian Transpormator Daya Listrik*. PT. Pawel Trafo Asia. Bogor