

Rancang Bangun Transformator Untuk Penyearah 24-Pulsa

Junaidi*, Budhi Anto, Suwitno****

*Alumni Teknik Elektro Universitas Riau **Jurusan Teknik Elektro Universitas Riau
Kampus Binawidya Km 12,5 Simpang Baru Panam, Pekanbaru 28293
Jurusan Teknik Elektro Universitas Riau
Email: junaidikoto20@gmail.com

ABSTRACT

Multipulse rectifiers are recently used in ac-dc converter to minimize line current distortion due to harmonics. Analysis of the input and output ac-dc converter has been done with the tendency that the number of pulse rectifier most will have a value THD (total harmonic distortion) line current is the smallest and has the greatest power factor. In this study the authors will design and transformers 3-phase make with primary in delta connection and secondary in zigzag connection to produce 12 phases voltage wave, each phase of phase 15° . The next phase will output 12 is connected as the input of a 24-pulse rectifier, which consists of 4 units of 3-phase rectifier bridge connection that are arranged in series. Calculation of results rectifier current THD, indicates THD 24-pulse rectifier is lower than the 6-pulse rectifier, THD 24-pulse rectifier currents of 1.41% while the 6-pulse rectifier amounted to 3.61%.

Keywords : *Multiphase Transformer, Multipulse rectifier, total harmonic distortion of current*

Pendahuluan

Penyearah banyak-pulsa telah digunakan pada konverter ac-dc untuk memperkecil harmonisa pada arus masukan konverter. Penyearah banyak-pulsa susunan paralel terdiri dari beberapa penyearah 3-fasa hubungan jembatan yang dirangkai secara paralel. Dengan susunan seperti ini diperoleh arus dc yang besar untuk mencatu proses-proses yang membutuhkan arus dc besar seperti proses pengisian batere, proses elektrokimia, proses pengelasan, proteksi katodik, proses arus untuk magnet buatan dan lain-lain. Penyearah banyak pulsa susunan seri akan memperoleh tegangan DC yang tinggi untuk mencatu rangkaian penggerak motor-motor listrik tegangan menengah.

Beberapa konverter ac-dc menggunakan topologi penyearah banyak-pulsa susunan paralel dan seri diantaranya adalah penyearah 12-pulsa, penyearah 18-pulsa, penyearah 24-pulsa, penyearah 30-pulsa dan penyearah 36-pulsa. Analisis

terhadap masukan dan keluaran konverter ac-dc tersebut telah dilakukannya dengan kecenderungan bahwa penyearah dengan jumlah pulsa paling banyak akan mempunyai nilai THD (*total harmonic distortion*) arus masukan paling kecil dan mempunyai faktor daya paling besar. Hasil analisis tersebut menunjukkan bahwa perbanyak jumlah pulsa akan memberikan pengaruh yang menguntungkan bagi sistem tenaga yang mencatu konverter ac-dc tersebut.

Keuntungan lain dalam penggunaan penyearah banyak-pulsa susunan paralel pada konverter ac-dc adalah menurunnya faktor riak tegangan keluaran konverter seiring dengan banyaknya jumlah pulsa, sehingga filter perata tegangan menjadi tidak diperlukan lagi sebagaimana yang telah diterapkan pada industri peleburan aluminium. Dalam penelitian ini penulis akan merancang dan membuat transformator arus bolak balik 3 fasa dengan primer

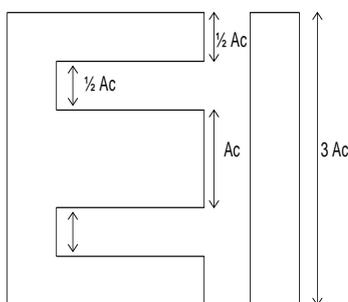
hubungan delta dan sekunder hubungan zigzag, keuntungan dari primer hubungan delta adalah ketika salah satu fasa mengalami gangguan dua fasa yang lain akan terus memberikan daya 3 fasa dengan kapasitas yang sama. Transformator ini dapat merubah arus bolak balik 3 fasa menjadi arus bolak balik 12 fasa. Belitan sekunder di desain hubungan zigzag untuk menghasilkan keluaran tegangan 12 fasa, yang masing-masing fasanya berbeda fasa 15° . Selanjutnya keluaran 12 fasa akan di hubungkan sebagai masukan dari penyearah 24-pulsa yang terdiri dari 4 unit penyearah 3-fasa hubungan jembatan yang dirangkai secara seri.

Transformator 3 Fasa

Transformator 3 fasa yang dibuat terdiri atas 3 buah transformator 1 fasa yang mempunyai 2 buah belitan, yaitu belitan primer dan belitan sekunder. Ada 2 metode utama untuk menghubungkan belitan primer yaitu hubungan segitiga dan bintang (delta dan wye). Sedangkan belitan sekundernya dapat dihubungkan secara segitiga, bintang dan zig-zag (delta, wye dan zig-zag). Ada juga hubungan dalam bentuk khusus yaitu hubungan open-delta (VV connection).

Metode perancangan transformator

Metode yang dipakai dalam perancangan transformator penyearah 24-pulsa ini yaitu menggunakan metode area product yang didefinisikan sebagai berikut :



Gambar 1. Kern (inti trafo) tipe E-I (Rommy,2011)

Ac = Luas penampang inti tempat belitan yang dibelitkan.

Aw = Luas jendela inti dalam satuan m^2 . Untuk menghitung jumlah kumparan menggunakan rumus. (Rommy Setiawan,2011)

$$N_p = \frac{V_p}{4,44.Bm.Ac.f} \quad (1)$$

$$N_s = \frac{V_s}{4,44.Bm.Ac.f} \quad (2)$$

Dimana :

- V_p = tegangan primer
- V_s = tegangan sekunder
- N_p = jumlah lilitan primer
- N_s = jumlah lilitan sekunder
- B_m = kerapatan fluks maksimum
- Ac = luas penampang inti belitan
- F = frekuensi

Rumus untuk mengetahui besarnya arus yang melewati belitan transformator adalah :

$$I = \frac{S}{V} \quad (3)$$

Dimana :

- I = besarnya arus transformator
- S = daya transformator
- V = besarnya tegangan transformator

Diameter belitan primer (d_1) dan diameter belitan sekunder (d_2) dihitung dengan menggunakan persamaan berikut :

$$d_p = \sqrt{\frac{4}{\pi} x \frac{I_p}{j}} \quad (4)$$

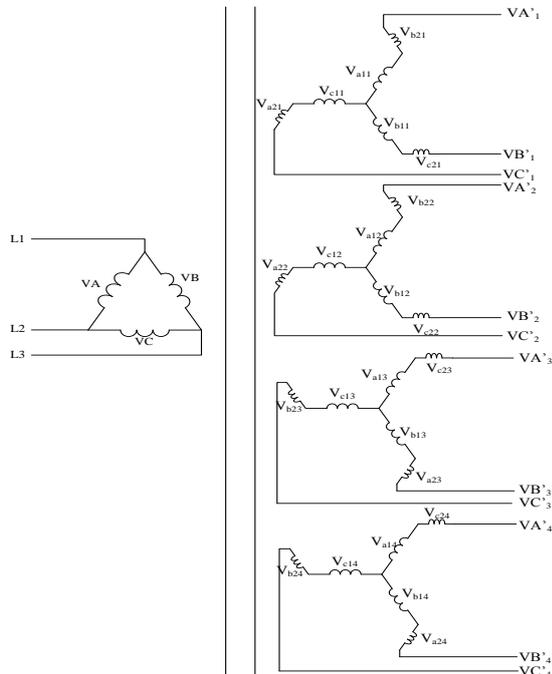
$$d_s = \sqrt{\frac{4}{\pi} x \frac{I_s}{j}} \quad (5)$$

Dimana :

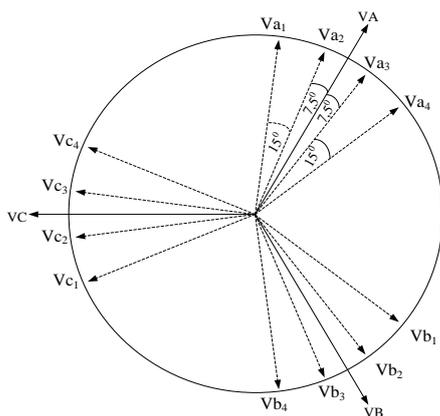
- d_p = diameter kawat belitan primer
- d_s = diameter kawat belitan sekunder
- I_p = arus nominal sisi primer
- I_s = arus nominal sisi sekunder
- J = Kerapatan arus

Untuk merealisasikan penyearah 24 pulsa, pada penelitian ini dibuat transformator yang dapat merubah listrik arus bolak balik 3 fasa menjadi listrik arus bolak balik 12 fasa. Transformator yang digunakan adalah transformator 3 fasa yang tersusun dari 3 buah transformator 1 fasa. dimana belitan primer dihubung

secara delta sedangkan belitan sekunder dihubungkan secara zigzag. Dimana pada sisi sekunder terdiri dari 4 buah hubungan zigzag seperti terlihat pada gambar di bawah ini :

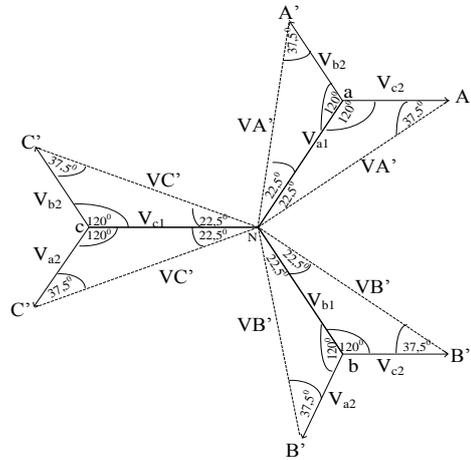


Gambar 2. Rangkaian hubungan transformator 3 fasa dengan output 12 fasa
 Untuk menghasilkan keluaran 12 fasa dari transformator di desain lah belitan sekundernya terhubung secara zigzag untuk yang masing-masing fasanya berbeda fasa sebesar 15° .



Gambar 3. Vektor diagram tegangan masukan dan keluaran transformator 3 fasa ke 12 fasa
 Tegangan masing-masing sekunder ditentukan cara perhitungan trafo zigzag

dimana pergeseran sudut fasa $\pm 7,5^{\circ}$ dan $\pm 22,5^{\circ}$ dari fasa tegangan masukan transformator. Perhitungannya dapat dilakukan dengan cara sebagai berikut :



Gambar 4. Transformator hubungan zigzag dengan pergeseran sudut fasa $\pm 22,5^{\circ}$
 Dari segitiga NaA' didapat hubungan berikut :

$$\frac{VA'}{\sin 120^{\circ}} = \frac{Va_1}{\sin 37,5^{\circ}} = \frac{Vb_2}{\sin 22,5^{\circ}} \quad (6)$$

$$\frac{VA'}{\sin 120^{\circ}} = \frac{Va_1}{\sin 37,5^{\circ}}$$

$$Va_1 = \frac{\sin 37,5^{\circ}}{\sin 120^{\circ}} x V_{L-N}$$

$$Va_1 = 0,7029V_{L-N}$$

$$\frac{VA'}{\sin 120^{\circ}} = \frac{Vb_2}{\sin 22,5^{\circ}}$$

$$Vb_2 = \frac{\sin 22,5^{\circ}}{\sin 120^{\circ}} x VA'$$

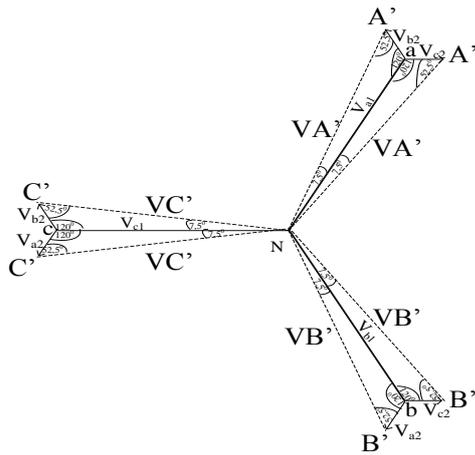
$$Vb_2 = 0,4419VA'$$

Dimana :

$V_{a1} = V_{b1} = V_{c1}$ = Tegangan efektif pada belitan a_1

$V_{a2} = V_{b2} = V_{c2}$ = Tegangan efektif pada belitan a_2

$VA' = VB' = VC'$ = Tegangan efektif pada setiap fasa keluaran transformator



Gambar 5. perhitungan transformator hubungan zigzag dengan pergeseran sudut fasa $\pm 7,5^0$
 Dari segitiga NaA' didapat hubungan berikut :

$$\frac{VA'}{\sin 120^0} = \frac{Va_1}{\sin 52,5^0} = \frac{Vb_2}{\sin 7,5^0} \quad (7)$$

$$\frac{VA'}{\sin 120^0} = \frac{Va_1}{\sin 52,5^0}$$

$$Va_1 = \frac{\sin 52,5^0}{\sin 120^0} \times VA'$$

$$Va_1 = 0,9160VA'$$

$$\frac{VA'}{\sin 120^0} = \frac{Vb_2}{\sin 52,5^0}$$

$$Vb_2 = \frac{\sin 7,5^0}{\sin 120^0} \times VA'$$

$$Vb_2 = 0,1507VA'$$

Dimana :

$V_{a1} = V_{b1} = V_{c1}$ = Tegangan efektif pada belitan a_1

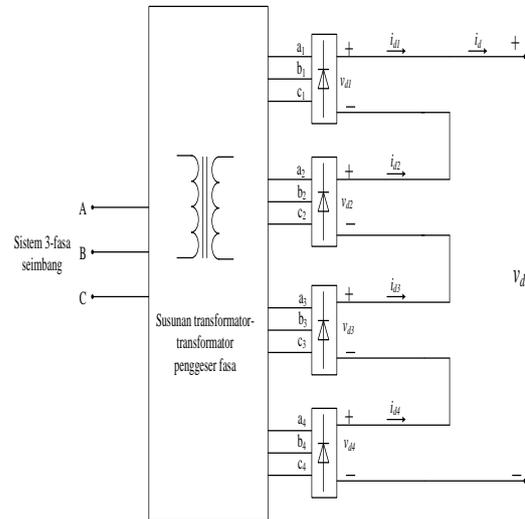
$V_{a2} = V_{b2} = V_{c2}$ = Tegangan efektif pada belitan a_2

$VA' = VB' = VC'$ = Tegangan efektif pada setiap fasa keluaran transformator

Penyearah 24-Pulsa

Penyearah 24-pulsa terdiri dari 4 unit penyearah 3-fasa hubungan jembatan yang dirangkai secara seri. Bagian

masukannya dari unit-unit penyearah 3-fasa hubungan jembatan tersebut dicatu oleh sistem tegangan 3-fasa seimbang menggunakan transformator-transformator penggeser fasa.



Gambar 6. Bentuk umum penyearah 24-pulsa (Budhi, 2010)

Jumlah unit penyearah 3-fasa hubungan jembatan yang diperlukan untuk merealisasikan penyearah 24-pulsa susunan paralel dapat dihitung menggunakan persamaan berikut,

$$k = \frac{n}{6} \quad (8)$$

dengan n adalah jumlah pulsa. v_{d1} adalah tegangan keluaran unit penyearah ke-1 dan i_{d1} adalah arus keluaran unit penyearah ke-1. v_{dk} dan i_{dk} masing-masing adalah tegangan dan arus keluaran unit penyearah ke- k . v_d dan i_d masing-masing adalah tegangan dan arus keluaran penyearah 24-pulsa susunan paralel.

Pergeseran fasa (dalam derajat) antar kelompok tegangan masukan unit-unit penyearah 3-fasa hubungan jembatan dihitung menggunakan persamaan berikut,

$$k = \frac{360}{6k} \quad (9)$$

Pergeseran fasa tegangan masukan antara keempat unit penyearah sebesar 15 derajat. Untuk mendapatkan pergeseran fasa, belitan-belitan primer atau belitan-belitan sekunder transformator dapat dihubungkan secara hubungan delta dan zig-zag.

Tegangan fasa pada masukan unit-unit penyearah dari penyearah 24-pulsa susunan paralel dapat ditulis sebagai berikut, (Budhi Anto, 2010).

$$Va_1 = \frac{v}{\sqrt{2}} \angle 0^\circ; Va_2 = \frac{v}{\sqrt{2}} \angle 15^\circ; Va_3 = \frac{v}{\sqrt{2}} \angle 30^\circ; \quad (10)$$

$$Va_4 = \frac{v}{\sqrt{2}} \angle 45^\circ$$

$$Vb_1 = \frac{v}{\sqrt{2}} \angle -120^\circ; Vb_2 = \frac{v}{\sqrt{2}} \angle -105^\circ; Vb_3 = \frac{v}{\sqrt{2}} \angle -90^\circ; \quad (11)$$

$$Vb_4 = \frac{v}{\sqrt{2}} \angle -75^\circ$$

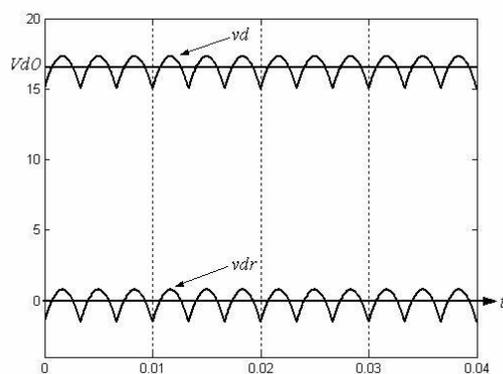
$$Vc_1 = \frac{v}{\sqrt{2}} \angle 120^\circ; Vc_2 = \frac{v}{\sqrt{2}} \angle 135^\circ; Vc_3 = \frac{v}{\sqrt{2}} \angle 150^\circ; \quad (12)$$

$$Vc_4 = \frac{v}{\sqrt{2}} \angle 145^\circ$$

Faktor Riak

Proses konversi dari tegangan ac menjadi tegangan dc (rektifikasi) akan menghasilkan riak pada tegangan keluaran penyearah. Adanya riak merupakan sesuatu yang tidak disukai pada konverter ac-dc, sehingga orang berusaha untuk menghilangkannya seperti dengan cara memasang kapasitor paralel dengan keluaran penyearah. Pemasangan kapasitor dengan kapasitas besar akan memperkecil riak pada tegangan keluaran penyearah namun memberikan pengaruh merugikan bagi dioda penyearah. Penggunaan penyearah banyak-pulsa merupakan alternatif dari penggunaan kapasitor perata tegangan, salah satunya penggunaan penyearah 24-pulsa untuk mengurangi faktor riak pada keluaran penyearah tersebut. (Budhi, 2010)

$$r = \frac{\text{nilai rms gelombang tegangan riak}}{\text{nilai rata-rata tegangan dc}} \quad (13)$$



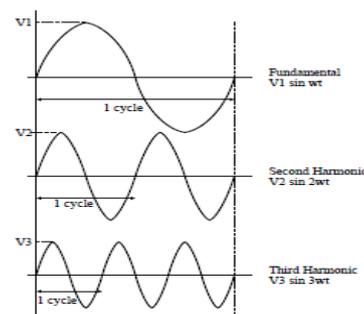
Gambar 7. Bentuk tegangan keluaran penyearah 6-pulsa dan tegangan riaknya (Budhi, 2010)

Harmonisa

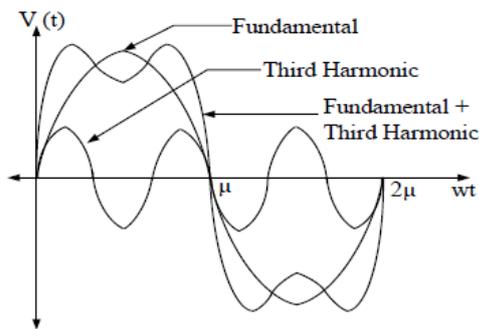
Harmonisa merupakan suatu fenomena yang timbul dari pengoperasian beban listrik yang sebagian besar diakibatkan dari beban non linear, dimana akan terbentuk gelombang yang berfrekuensi tinggi yang merupakan kelipatan dari frekuensi fundamentalnya, dalam hal ini 50Hz, sehingga bentuk gelombang arus maupun tegangan yang idealnya adalah sinusoidal murni akan cacat akibat distorsi harmonisa yang terjadi. (Eka Rahmat Surbakti, 2013)

Harmonisa didefinisikan sebagai gelombang-gelombang sinus (arus dan tegangan) yang mempunyai frekuensi kelipatan *integer* (bilangan bulat) dari frekuensi fundamentalnya. (di Indonesia adalah 50 Hz).

Jika frekuensi pada 50/60 Hz (Indonesia menggunakan 50 Hz) dikatakan sebagai frekuensi fundamental/ frekuensi dasar (f), maka jika gelombang tersebut mengalami distorsi atau dikatakan harmonisa bila mengalami kelipatan frekuensi dari frekuensi dasarnya, misalnya harmonik kedua (2f) pada 100 Hz, ketiga (3f) 150 Hz dan harmonisa ke-n memiliki frekuensi nf seperti ditunjukkan oleh Gambar 2.3. Gelombang-gelombang ini akan menumpang pada gelombang frekuensi dasarnya dan akan terbentuk gelombang cacat yang merupakan penjumlahan antara gelombang murni dengan gelombang harmonisa ke-3 seperti ditunjukkan oleh Gambar 8 sebagai berikut : (Eka Rahmat Surbakti, 2013)



Gambar 8. Gelombang Fundamental, Harmonisa kedua dan Harmonisa ketiga (Eka,2013)



Gambar 9. Gelombang Fundamental yang terdistorsi Harmonisa Ke-3 (Eka,2013)

Total Harmonic Distortion (THD)

THD merupakan rasio antara nilai RMS dari komponen harmonisa dan nilai RMS dari nilai fundamental dan biasanya dinyatakan dalam persen (%). Indeks ini digunakan untuk menyatakan deviasi dari bentuk gelombang periodik yang mengandung harmonisa terhadap gelombang sinusoidal murni. Total Distorsi Harmonik (THD) tegangan dan arus yaitu:

$$THD = \sqrt{\frac{I_{rms}^2 - I_{1-rms}^2}{I_{1-rms}^2}} \quad (14)$$

Keterangan:

THD = Total Harmonic Distortion

I_{rms} = Nilai rms dari sinyal arus

I_{1-rms} = Nilai rms dari sinyal arus dengan frekwensi dasar.

Nilai rms dari sinyal arus i dihitung menggunakan persamaan berikut,

$$I_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2 dt} \quad (15)$$

Persamaan (15) dapat diselesaikan secara numeric menggunakan metode

trapesium sehingga diperoleh persamaan berikut,

$$I_{rms} \approx \sqrt{\frac{\Delta t}{2T} \sum_{k=1}^{N-1} \{i^2[k+1] + i^2[k]\}} \quad (16)$$

Dengan T adalah perioda sinyal arus, N adalah jumlah sampel sinyal arus, $i[k]$ adalah sampel ke- k dari sinyal arus dalam 1 perioda, Δt adalah selisih waktu antara 2 sampel sinyal arus yang berdekatan, sehingga Δt dapat dihitung dengan persamaan berikut,

$$\Delta t = \frac{N-1}{T} \quad (17)$$

Nilai rms dari sinyal arus dengan ferkuensi dasar dapat dihitung dengan persamaan berikut,

$$I_{1-rms} = \frac{c_1}{\sqrt{2}} \quad (18)$$

Dimana c adalah amplitudo sinyal arus dengan frekwensi dasar.

Amplitudo simygal arus dengan frekwensi dasar dapat diperoleh melalui analisis Forier terhadap sinyal arus sehingga diperoleh,

$$a_1 = \frac{2}{T} \int_0^T i \cos \omega t dt \quad (19)$$

$$b_1 = \frac{2}{T} \int_0^T i \sin \omega t dt \quad (20)$$

Dan,

$$c_1 = \sqrt{a_1^2 + b_1^2} \quad (21)$$

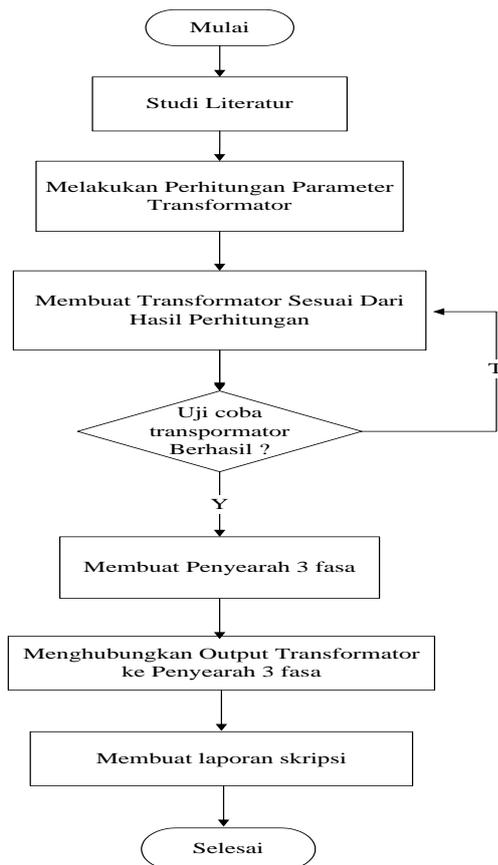
Selanjutnya persamaan (19) dan persamaan (20) diselesaikan secara numerk dengan metode trapesium sehingga diperoleh,

$$a_i \approx \frac{2}{T} x \frac{1}{2} \Delta t \sum_{k=1}^{n-1} \{i[k+1] \cos\left(\frac{k}{n-1}\right)2\pi + i[k] \cos\left(\frac{k-1}{n-1}\right)2\pi\} \quad (22)$$

$$b_i \approx \frac{2}{T} x \frac{1}{2} \Delta t \sum_{k=1}^{n-1} \{i[k+1] \sin\left(\frac{k}{n-1}\right)2\pi + i[k] \sin\left(\frac{k-1}{n-1}\right)2\pi\} \quad (23)$$

Prosedur penelitian

Penelitian ini dibagi dalam beberapa tahap metode, untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada gambar 3.1



Gambar 10. Diagram alir penelitian

Peralatan dan bahan penelitian

Adapun perangkat yang digunakan dalam melakukan penelitian ini yaitu, terdiri dari :

1. Multimeter digital yang berfungsi untuk melakukan pengukuran nilai-nilai keluaran transformator dan penyearah.
2. Alat penggulung transformator yang berfungsi sebagai alat bantu untuk

menggulung kawat lilitan transformator.

3. Power supply 3 fasa berfungsi sebagai catu daya untuk memberi tegangan input pada transformator.
4. *Oscilloscope* berfungsi sebagai untuk melihat hasil keluaran sinyal atau pulsa penyearah.
5. Alat pengukur arus bolak-balik Kumparan *Rogowsky* berfungsi untuk melihat arus masukan penyearah.

Adapun bahan yang digunakan dalam penelitian ini yaitu sebagai berikut :

1. Kawat enamel yang digunakan dalam penelitian ini adalah ukuran 0,2 mm untuk lilitan primer dan ukuran 1,1 mm untuk lilitan sekunder.
2. Inti transformator (kern) yang digunakan dalam penelitian ini adalah tebal inti kern dengan ukuran 4,4 mm.
3. Kertas prespan atau isolasi kertas sebagai pembatas antara kumparan primer dan kumparan sekunder.

Perhitungan Parameter Transformator

Transformator 3 fasa yang akan dirancang merupakan transformator 3 fasa yang tersusun dari 3 buah transformator 1 fasa. Untuk langkah awal pembuatan transformator kita perlu memperhatikan beberapa hal:

1. Daya dari transformator
Dalam penelitian ini telah ditetapkan daya transformator sebagai berikut :

$$\begin{aligned} P \text{ 3 fasa} &= 150 \\ P \text{ 1 fasa} &= 150/3 = 50 \end{aligned}$$

2. Nilai tegangan primer dan sekunder
 $V \text{ primer} = 380 \text{ Volt}$

$$V_{L-L} \text{ sekunder} = 24 \text{ Volt}$$

$$V_{L-N} \text{ sekunder} = 24 : \sqrt{3} = 13,86 \text{ Volt}$$

3. Menentukan besar inti transformator

Dalam penelitian ini diinginkan penampang inti trafo berbentuk bujur

sangkar dengan tipe inti EI dimana lebar inti 4,4 cm.

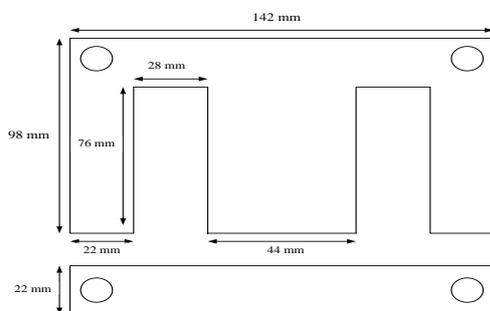
Jadi $A_c = 4,4 \text{ cm} \times 4,4 \text{ cm}$

$$= 19,36 \text{ cm}^2$$

$$= 19,36 \times 10^{-4} \text{ cm}$$

4. Menentukan besar kern atau inti transformator

Inti transformator tersusun atas besi plat tipis, bukan merupakan besi pejal. Kern transformator merupakan tempat atau jalur terjadinya proses induksi elektromagnetik antara kumparan primer dan sekunder. Inti transformator ini banyak jenisnya, ada yang F-F, E-I dan U-U dan banyak lagi jenis lainnya. Setelah dilakukan perhitungan diatas, kita dapat ukuran kern atau inti trafo yang kita butuhkan, yaitu kern dengan besar penampang tengah 44 mm, dan jenis kern yang kita gunakan adalah jenis E-I.



Gambar 11. Ukuran kern (inti besi) transformator

Tebal inti trafo tersebut adalah 44 mm, jadi inti trafo yang akan dirancang akan berbentuk bujur sangkar.

5. Menghitung besar kawat lilitan transformator

Untuk menentukan diameter belitan kawat transformator kita harus menghitung besar arus yang mengalir pada sisi primer dan sisi sekunder. Rumus untuk mengetahui besar arus

yang melewati sisi primer dan sisi sekunder adalah :

perhitungan arus transformator pada sisi primer adalah :

$$I = \frac{S}{V} = \frac{50}{380} = 0,13A$$

Dari hasil diatas diameter kawatnya dapat dihitung sebagai berikut :

$$d_p = \sqrt{\frac{4}{3,14} \times \frac{0,13}{3,5}} = 0,21mm$$

Perhitungan arus transformator pada sisi sekunder adalah :

$$I = \frac{S}{V} = \frac{50}{13,86} = 3,6A$$

Dari hasil diatas diameter kawatnya dapat dihitung sebagai berikut :

$$d_s = \sqrt{\frac{4}{3,14} \times \frac{3,6}{3,5}} = 1,14mm$$

Jadi dari hasil perhitungan, kawat yang digunakan pada belitan primer transformator adalah 0,2 mm sedangkan pada belitan sekunder transformator adalah 1,1 mm.

6. Menghitung jumlah lilitan transformator

Jumlah belitan primer dan belitan sekunder dapat dihitung setelah nilai A_c diketahui, berikut perhitungan belitan primer dan belitan sekunder transformator :

$$N_p = \frac{vp}{4,44 \cdot B_m \cdot A_c \cdot f} = \frac{380}{4,44 \cdot 0,8 \cdot 19,36 \times 10^{-4} \cdot 50} = 1105,18 = 1105$$

Jadi untuk jumlah lilitan primer sebanyak 1105 lilitan.

Untuk belitan sekunder hubungan zigzag dengan pergeseran fasa $\pm 22,5^\circ$ dapat dihitung sebagai berikut :

$$V_{a_1} = \frac{\sin 37,5^\circ}{\sin 120^\circ} \times 13,86 = 0,7029 \times 13,86 = 9,74 \text{ Volt}$$

$$V_{a_2} = \frac{\sin 22,5^\circ}{\sin 120^\circ} \times 13,86 = 0,4419 \times 13,86 = 6,12 \text{ Volt}$$

$$Na_1 = \frac{vp}{4,44.Bm.Ac.f} = \frac{9,74}{4,44.0,8.19,36 \times 10^{-4} .50} = 28,32 = 28$$

$$Na_2 = \frac{vp}{4,44.Bm.Ac.f} = \frac{6,12}{4,44.0,8.19,36 \times 10^{-4} .50} = 17,79 = 18$$

Jadi belitan sekunder hubungan zigzag dengan pergeseran fasa $\pm 22,5^0$ untuk $a_1 = 28$ lilitan dan $a_2 = 18$ lilitan. Untuk belitan sekunder hubungan zigzag dengan pergeseran fasa $\pm 7,5^0$ dapat dihitung sebagai berikut :

$$Va_1 = \frac{\sin 52,5^0}{\sin 120^0} \times 13,86 = 0,9160 \times 13,86 = 12,69 \text{ Volt}$$

$$Va_2 = \frac{\sin 7,5^0}{\sin 120^0} \times 13,86 = 0,1507 \times 13,86 = 2,08 \text{ Volt}$$

$$Na_1 = \frac{vp}{4,44.Bm.Ac.f} = \frac{12,69}{4,44.0,8.19,36 \times 10^{-4} .50} = 36,9 = 37$$

$$Na_2 = \frac{vp}{4,44.Bm.Ac.f} = \frac{2,08}{4,44.0,8.19,36 \times 10^{-4} .50} = 6,04 = 6$$

Jadi belitan sekunder hubungan zigzag dengan pergeseran fasa $\pm 7,5^0$ untuk $a_1 = 37$ lilitan dan $a_2 = 6$ lilitan.

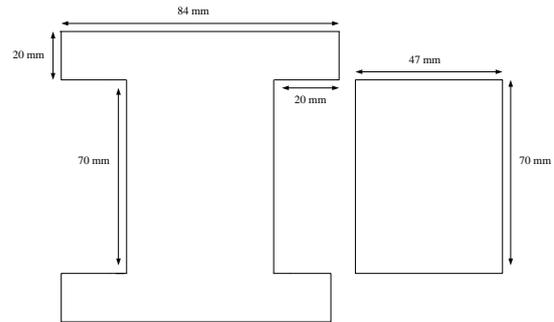
Proses pembuatan

Sebelum melakukan proses perakitan transformator diperlukan tempat untuk melilit kawat transformator yang disebut dengan koker. Koker merupakan tempat untuk melilit kawat kumparan transformator, jadi kawat tidak langsung dililitkan di inti transformator melainkan dililit dahulu di koker. Koker terbuat dari fiber, kertas mika dll.

Dalam proses pembuatan transformator, besar koker yang dibuat berdasarkan luas penampang inti transformator, agar koker yang kita buat bisa dimasukkan ke penampang tengah inti transformator.

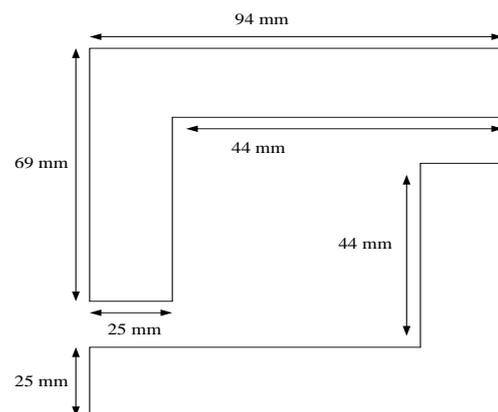
Luas penampang inti transformator = 44 mm x 44 mm

Gambar desain koker dapat dilihat pada gambar 3.11 :



Gambar 12. Desain koker transformator

Panjang inti kaki transformator sebenarnya 76 mm, disini dibuat 70 mm agar tidak terlalu ketat, sehingga jika gulungan agak melebar keatas masih ada ruangan tersisa. Pada bagian atas dan bawah koker dibuat pembatas koker agar lilitan tidak keluar dari bagian koker pada saat melilit transformator. Dibawah dapat dilihat ukuran pembatas koker transformator pada gambar 3.3.



Gambar 13. Pembatas koker transformator

Setelah koker selesai dikerjakan, yang selanjutnya dilakukan adalah proses perakitan transformator. Adapun langkah – langkah perakitan transformator adalah:

1. Melilit kumparan

Proses melilit dibantu dengan alat penggulung, yang mempunyai dial (acuan putaran alat penggulung) yang dapat dilihat pada gambar. Untuk awal atau permulaan, dimulai dengan menggulung/melilit kumparan primer, setelah kumparan primer selesai dililit,

diberi isolasi berupa prespan atas isolasi kertas sebagai pembatas antara kumparan primer dengan kumparan sekunder. Kemudian baru dililit kumparan sekunder, setelah selesai lakukan pengisolasian lagi dengan kertas prespan, hubungkan ujung-ujung kawat lilitan keterminal transformator, sebagai terminal input dan output.

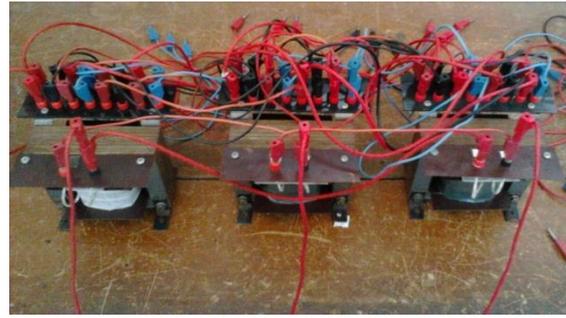
Setelah semuanya selesai dikerjakan, maka transformator siap untuk dirakit. Masukkan inti transformator satu persatu kedalam koker transformator secara berlawanan. Hal ini bertujuan agar inti transformator saling mengunci. Setelah selesai kuncilah transformator dengan menggunakan baut. Lalu hubungkan keterminal luar transformator. Transformator yang telah selesai dirakit Dapat dilihat pada gambar 3.14.



Gambar 14. 3 buah transformator satu fasa setelah dirakit

2. Melakukan perangkaian pada transformator

Setelah transformator selesai dirakit dan dihubungkan keterminal, maka langkah selanjutnya adalah menghubungkan ke-3 buah trafo 1 fasa tersebut menjadi transformator 3 fasa dengan primer hubungan delta dan sekunder hubungan zigzag seperti pada gambar 3.15 Inilah gambar rangkaian transformator.

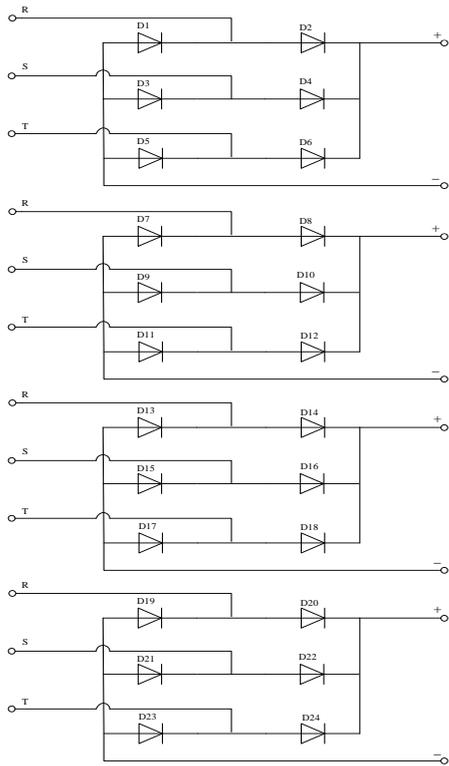


Gambar 15. Tiga buah transformator setelah dirakit menjadi transformator 3 fasa dengan menghubungkan dari luar

3. Menghubungkan transformator ke penyearah (rectifier)

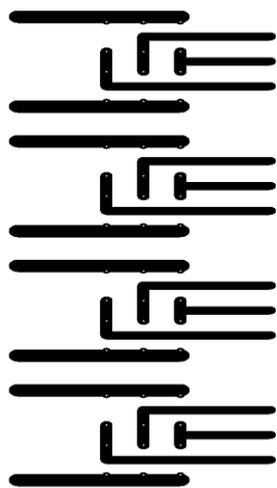
Sebelum menghubungkan transformator ke penyearah terlebih dahulu membuat rangkaian penyearah. Rangkaian penyearah digunakan untuk menyearahkan arus listrik dari transformator. Penyearah yang digunakan adalah penyearah 3 fasa hubungan jembatan tak terkendali, dimana komponen utamanya adalah diode. Diode yang digunakan adalah diode shoffky MUR 460 4A.

Pada perancangan penyearah 24 pulsa, dibutuhkan 24 dioda. Jadi akan dibuat 4 unit penyearah 3 fasa gelombang penuh tak terkendali seperti pada gambar 16.



Gambar 16. Penyearah (rectifier) 24 pulsa

unit penyearah 3 fasa gelombang penuh takterkendali ini akan dihubungkan secara seri. Gambar layout PCB penyearah dapat dilihat pada gambar 3.19

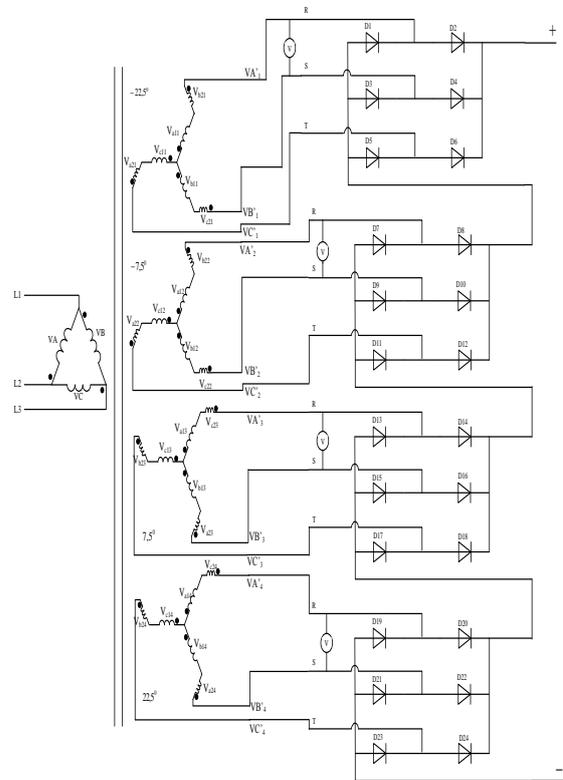


Gambar 17. Layout PCB penyearah 24 pulsa

Setelah transformator dan penyearah selesai dibuat, selanjutnya

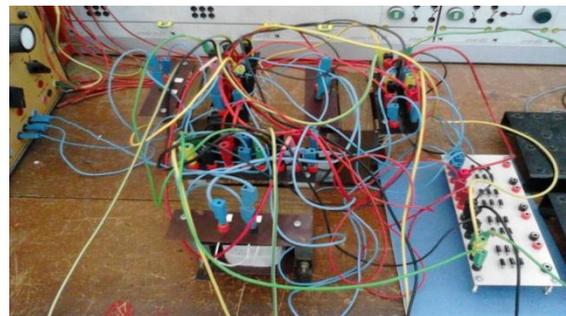
menghubungkan transformator dengan penyearah. Untuk mendapatkan

keluaran penyearah 24 pulsa dapat dihubungkan secara seri seperti pada gambar 3.20



Gambar 18. Hubungan transformator dan penyearah 24 pulsa

Tanda titik pada gambar diatas menunjukkan awal belitan kumparan, $-7,5^0$ menunjukkan sudut fasanya dimulai dari $-7,5^0$, sedangkan $7,5^0$ menunjukkan sudut fasanya dimulai dari $7,5^0$. Gambar 3.14 menunjukkan transformator 3 fasa setelah dirangkai ke penyearah 24 pulsa.



Gambar 19. transformator 3 fasa dan dihubungkan ke penyearah 24 pulsa

Pengujian transformator

Pengujian transformator ini bertujuan untuk mengetahui kualitas dari transformator, sesuai dengan hasil perhitungan yang telah dikerjakan. Disini akan diukur tegangan masukan atau input pada sisi primer transformator dan juga tegangan keluaran atau output pada sisi sekunder transformator. Pengukuran dilakukan dengan menggunakan multimeter digital yang dihubungkan ke terminal transformator.

Pengukuran tegangan terminal transformator

Pengukuran tiap terminal transformator dilakukan untuk melihat nilai tegangan input dan output pada setiap transformator. Hasil pengukuran dapat dilihat di bawah ini :

Tabel 1. hasil pengukuran tegangan tiap terminal transformator A

| Input Trafo (volt) | Output Trafo (Volt) | | | | | | | |
|--------------------|---------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| | A- A1' | A2- A2' | A3- A3' | A4- A4' | A5- A5' | A6- A6' | A7- A7' | A8- A8' |
| | (a ₁₁) | (a ₁₂) | (a ₁₃) | (a ₁₄) | (a ₂₁) | (a ₂₂) | (a ₂₃) | (a ₂₄) |
| 379 | 9,75 | 12,89 | 12,87 | 9,76 | 6,28 | 2,10 | 2,10 | 6,28 |

Tabel 2. hasil pengukuran tegangan tiap terminal transformator B

| Input Trafo (volt) | Output Trafo (Volt) | | | | | | | |
|--------------------|---------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| | B- B1' | B2- B2' | B3- B3' | B4- B4' | B5- B5' | B6- B6' | B7- B7' | B8- B8' |
| | (b ₁₁) | (b ₁₂) | (b ₁₃) | (b ₁₄) | (b ₂₁) | (b ₂₂) | (b ₂₃) | (b ₂₄) |
| 382 | 9,87 | 12,89 | 12,89 | 9,89 | 6,37 | 2,13 | 2,13 | 6,36 |

Tabel 3. hasil pengukuran tegangan tiap terminal transformator C

| Input Trafo (volt) | Output Trafo (Volt) | | | | | | | |
|--------------------|---------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| | C1- C1' | C2- C2' | C3- C3' | C4- C4' | C5- C5' | C6- C6' | C7- C7' | C8- C8' |
| | (c ₁₁) | (c ₁₂) | (c ₁₃) | (c ₁₄) | (c ₂₁) | (c ₂₂) | (c ₂₃) | (c ₂₄) |
| 380 | 9,82 | 12,88 | 12,87 | 9,83 | 6,33 | 2,10 | 2,10 | 6,30 |

Pengujian tranformator 3 fasa

Pada pengujian ini, transformator 1 fasa yang telah dirangkai menjadi 3 fasa hubungan delta-zigzag diuji untuk melihat keluarannya.

Table 4. Hasil pengujian tranfoermator 3 fasa hubungan Delta-Zigzag

| Input | Transformator | | Tegangan output (sekunder) | |
|---------------------------------|----------------|-----------|----------------------------|-----------|
| | Primer | Sekunder | | |
| Sumber tegangan 3 fasa 380 Volt | Z ₁ | | VA'1-VB'1 | 24,0 Volt |
| | | | VA'1-VC'1 | 24,3 Volt |
| | | | VB'1-VC'1 | 24,1 Volt |
| | | | | |
| | Z ₂ | | VA'2-VB'2 | 24,2 Volt |
| | | | VA'2-VC'2 | 24,4 Volt |
| | | | VB'2-VC'2 | 24,2 Volt |
| | | | | |
| | Z ₃ | | VA'3-VB'3 | 24,1 Volt |
| | | | VA'3-VC'3 | 24,0 Volt |
| | | | VB'3-VC'3 | 24,2 Volt |
| | | | | |
| Z ₄ | | VA'4-VB'4 | 24,3 Volt | |
| | | VA'4-VC'4 | 24,2 Volt | |
| | | VB'4-VC'4 | 24,4 Volt | |
| | | | | |

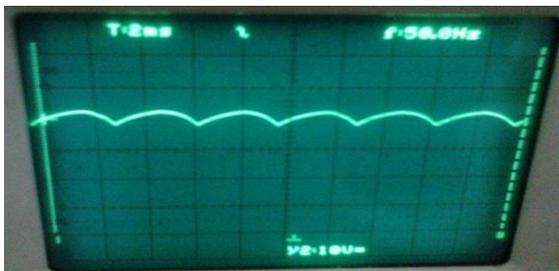
Pengujian Penyearah (Rectifier)

Pengujian ini dilakukan untuk melihat hasil keluaran penyearah yang telah dirangkai bersama trafo 3 fasa hubungan zigzag. data hasil pengujian, data hasil pengujian ditunjukkan pada tabel 5.

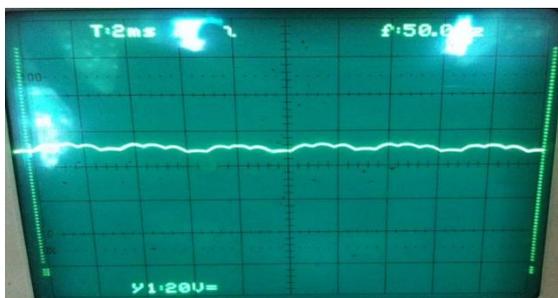
Tabel 5. Hasil pengujian tranformator penyearah 24-pulsa beban nol

| Input | Transformator | | Tegangan output (sekunder) | Output rectifier (Vdc) | Output seri rectifier (Vdc) | |
|---------------------------------|---------------|----------|----------------------------|------------------------|-----------------------------|-------|
| | Primer | Sekunder | | | | |
| Sumber tegangan 3 fasa 380 Volt | Z1 | VA'1- | 24,0 | 32,2 | | |
| | | VB'1 | Volt | | | |
| | | VA'1- | 24,3 | | | |
| | | VC'1 | Volt | | | |
| | | VB'1- | 24,1 | | | |
| | | VC'3 | Volt | | | |
| | Z2 | VA'2- | 24,2 | 32,3 | | |
| | | VB'2 | Volt | | | |
| | | VA'2- | 24,4 | | | |
| | | VC'3 | Volt | | | |
| | Delta | Z3 | VA'3- | 24,1 | 32,2 | 135,1 |
| | | | VB'3 | Volt | | |
| | | | VA'3- | 24,0 | | |
| | | | VC'3 | Volt | | |
| | | | VB'3- | 24,2 | | |
| | | | VC'3 | Volt | | |
| Z4 | VA'4- | 24,3 | 32,1 | | | |
| | VB'4 | Volt | | | | |
| | VA'4- | 24,2 | | | | |
| | VC'4 | Volt | | | | |
| Z4 | VB'4- | 24,4 | 32,1 | | | |
| | VC'4 | Volt | | | | |
| | VB'4- | 24,4 | | | | |
| | VC'4 | Volt | | | | |

Sedangkan gelombang keluaran penyearah adalah sebagai berikut :

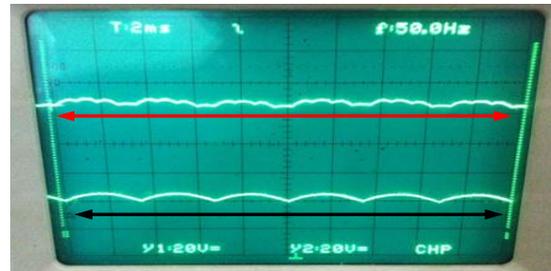


Gambar 20. Gelombang penyearah 6-pulsa



Gambar 21. Gelombang keluaran dari penyearah saat keempat penyearah dihubungkan secara seri (penyearah 24-pulsa)

Gambar diatas merupakan output dari penyearah 24-pulsa. Penunjukkan perbandingan antara gelombang output penyearah 6-pulsa dan gelombang out penyearah 24-pulsa dapat dilihat pada gambar dibawah ini



Gambar 22. penunjukkan hasil gelombang penyearah 24-pulsa dan 6-pulsa dan perbandingan gelombang penyearah antara 24-pulsa dan 6-pulsa

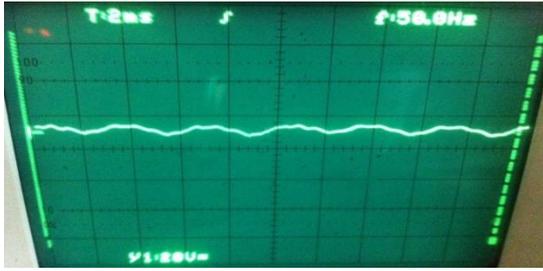
Dari gambar diatas, terlihat perbandingan antara gelombang 24-pulsa (atas) dan gelombang penyearah 6-pulsa (bawah), tanda panah merah menunjukkan jumlah pulsa sebanyak 24-pulsa (atas) dan tanda panah hitam menunjukkan jumlah pulsa sebanyak 6-pulsa (bawah).

Pengujian Berbeban

Pada pengujian berbeban, keluaran dari penyearah 24-pulsa akan dibeban, beban yang digunakan disini adalah sebuah variable resistor (tahanan geser).

Pada pengujian berbeban ini, pengujian ini bertujuan untuk mengetahui karakteristik Vdc terhadap Idc, pada saat dibebani, akan mengalir arus pada rangkaian dan akan terjadi drop tegangan.

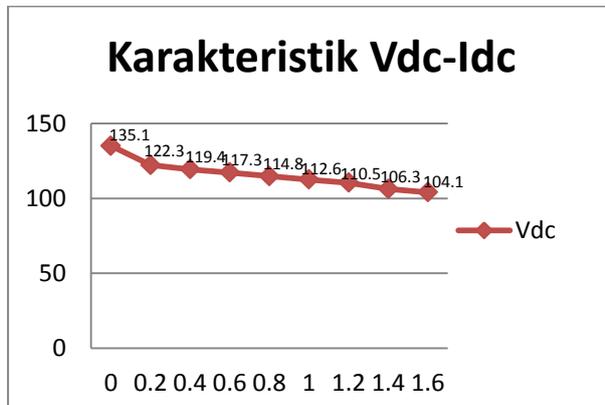
Gelombang keluaran dari penyearah 24-pulsa berbeban dilihat dari osiloskop sebagai berikut :



Gambar 23. Gelombang penyearah 24-pulsa pada saat dibebani dan mengalir arus 1,6 A

Tabel 6. Hasil pengujian transformator penyearah 24-pulsa bebani

| Input | Vdc | Idc |
|-------|-------|-----|
| 380 | 135,1 | 0 |
| | 122,3 | 0,2 |
| | 119,4 | 0,4 |
| | 117,3 | 0,6 |
| | 114,8 | 0,8 |
| | 112,6 | 1,0 |
| | 110,5 | 1,2 |
| | 106,3 | 1,4 |
| | 104,1 | 1,6 |



Gambar 24. Kurva karakteristik antara Vdc-Idc

Dari kurva terlihat jelas, pada saat arus naik maka terjadi drop tegangan atau penurunan tegangan, arus naik karna restansi beban semakin kecil, sedangkan drop tegangan terjadi karna impedansi trafo dan resistansi diode.

Jadi kurva dapat disimpulkan tegangan berbanding terbalik dengan arus yang melewati rangkaian.

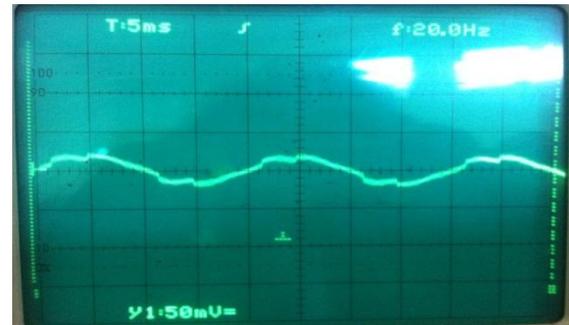
Regulasi tegangan dapat dihitung dengan persamaan berikut,

$$VR = \frac{V_{dc\text{no load}} - V_{dc\text{full load}}}{V_{dc\text{full load}}} = \frac{135,1 - 104,1}{104,1} = 0,298V = 2,98\%$$

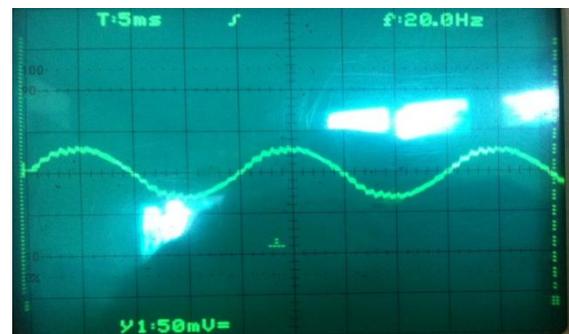
THD Arus Masukan Penyearah

Untuk melihat thd arus masukan penyearah dilakukan pengujian menggunakan alat pengukuran tegangan arus bolak-balik menggunakan sensor kumparan rogowski. Dengan menggunakan alat ini kita bisa melihat perbedaan thd arus masukan penyearah 6-pulsa dengan penyearah 24-pulsa.

Dibawah ini kita bisa melihat gelombang thd arus masukan penyearah.



Gambar 25. Gelombang arus masukan penyearah 6-pulsa



Gambar 26. Gelombang arus masukan penyearah 24-pulsa

Dari gambar 4.9 dan gambar 4.10, kita dapat melihat perbedaan gelombang

arus masukan penyearah 6-pulsa dengan penyearah 24-pulsa. Dari gambar tersebut kita dapat melihat bahwa gelombang arus penyearah 24-pulsa lebih sinusoidal dari pada gelombang arus penyearah 6-pulsa atau dengan kata lain thd arus penyearah 24-pulsa lebih kecil dari pada penyearah 6-pulsa.

Perhitungan THD Arus Masukan Penyearah

Perhitungan THD dari sinyal arus masukan penyearah dapat dihitung dengan menggunakan persamaan (14).

Nilai rms dari sinyal i dihitung menggunakan persamaan (15). Persamaan (15) dapat diselesaikan secara numerik menggunakan metode trapesium menggunakan persamaan berikut (16).

$$I_{rms} = \sqrt{\frac{\text{total luastrapesium}}{20}} = \sqrt{\frac{0,279592528}{20}} = 0,11823547A$$

Dengan T adalah perioda sinyal arus, N adalah jumlah sampel sinyal arus, $i[k]$ adalah sampel ke- k dari sinyal arus dalam 1 perioda, Δt adalah selisih waktu antara 2 sampel sinyal arus yang berdekatan, sehingga Δt dapat dihitung dengan persamaan (17).

Dalam penelitian ini, perioda dari sinyal arus adalah 20 ms, sedangkan jumlah sampel sinyal arus dalam 1 perioda adalah 21 sampel. Dengan demikian dari persamaan (17) diperoleh,

$$\Delta t = \frac{21-1}{20} = 1 \text{ ms}$$

Untuk nilai rms dari sinyal arus dengan ferkuensi dasar dapat dihitung dengan persamaan (18).

Amplitudo sinyal arus dengan frekuensi dasar dapat diperoleh melalui analisis Forier terhadap sinyal arus menggunakan persamaan (19) dan persamaan (20),

$$a = \frac{2}{20} \times \text{total luas trapesium (P[T])}$$

$$a = \frac{2}{20} \times 0,006563521 = 0,00065635210$$

$$b = \frac{2}{20} \times \text{total luas trapesium (P[T])}'$$

$$= \frac{2}{20} \times 1,670567181 = 0,167056718$$

$$c = \sqrt{a^2 + b^2}$$

$$= \sqrt{(0,00065635210)^2 + (0,167056718)^2}$$

$$= 0,167058007$$

Jadi nilai arus I_{1-rms} :

$$= \frac{c}{\sqrt{2}} = \frac{0,167058007}{\sqrt{2}} = 0,11812785 \text{ A}$$

Kemudian dari persamaan (14) didapatlah THD sinyal arus masukan penyearah 24-pulsa sebagai berikut,

$$\text{THD} = \sqrt{\frac{(0,11823547)^2 - (0,11812785)^2}{0,11812785}}$$

$$= 0,014674412 = 1,46\%$$

Untuk THD sinyal arus masukan penyearah 6-pulsa dilakukan perhitungan dengan persamaan yang sama dengan penyearah 24-pulsa,

$$I_{rms} = \sqrt{\frac{\text{total luastrapesium}}{20}}$$

$$= \sqrt{\frac{0,134269828}{20}} = 0,081935898$$

$$a = \frac{2}{20} \times \text{total luas trapesium (P[T])}$$

$$= \frac{2}{20} \times 0,091858832 = 0,009185883$$

$$b = \frac{2}{20} \times \text{total luas trapesium (P[T])}'$$

$$= \frac{2}{20} \times 1,145890784 = 0,114589078$$

$$\begin{aligned}
c &= \sqrt{a^2 + b^2} \\
&= \sqrt{(0,0091858832)^2 + (0,114589078)^2} \\
&= 0,114956676 \text{ A}
\end{aligned}$$

Jadi nilai arus I_{1-rms} :

$$= \frac{c}{\sqrt{2}} = \frac{0,114956676}{\sqrt{2}} = 0,081286645 \text{ A}$$

$$\begin{aligned}
\text{THD} &= \sqrt{\frac{(0,081935898)^2 - (0,081286645)^2}{0,081286645}} \\
&= 0,36106675 = 3,61\%
\end{aligned}$$

Jadi besar THD arus penyearah 24-pulsa adalah 1,46% sedangkan THD arus penyearah 6-pulsa adalah 3,61%.

Hasil persamaan (16), persamaan (22), persamaan (23) diselesaikan dengan bantuan tabel.

Tabel 7. Hasil perhitungan numerik nilai rms dari sinyal arus penyearah 24-pulsa

| k | t | m(t) |
|----|--------|-------------|
| 1 | 0 | 0,001409805 |
| 2 | 0,0028 | 0,007049025 |
| 3 | 0,0113 | 0,014450501 |
| 4 | 0,0176 | 0,021499526 |
| 5 | 0,0254 | 0,027124648 |
| 6 | 0,0289 | 0,025489274 |
| 7 | 0,0221 | 0,019864152 |
| 8 | 0,0176 | 0,014450501 |
| 9 | 0,0113 | 0,007049025 |
| 10 | 0,0028 | 0,001409805 |
| 11 | 0 | 0,001409805 |
| 12 | 0,0028 | 0,007049025 |
| 13 | 0,0113 | 0,014450501 |
| 14 | 0,0176 | 0,021499526 |
| 15 | 0,0254 | 0,027124648 |
| 16 | 0,0289 | 0,025489274 |
| 17 | 0,0221 | 0,019864152 |
| 18 | 0,0176 | 0,014450501 |
| 19 | 0,0113 | 0,007049025 |
| 20 | 0,0028 | 0,001409805 |
| 21 | 0 | 0 |

total 0,279592528

Tabel 8. Hasil perhitungan numerik nilai rms dari sinyal arus penyearah 6-pulsa

| k | t | m(t) |
|-------|----------|-------------|
| 1 | 0 | 0,000352451 |
| 2 | 0,000705 | 0,003115669 |
| 3 | 0,005526 | 0,006372319 |
| 4 | 0,007218 | 0,012420382 |
| 5 | 0,017623 | 0,015634737 |
| 6 | 0,013647 | 0,012462676 |
| 7 | 0,011278 | 0,008811281 |
| 8 | 0,006344 | 0,004581866 |
| 9 | 0,00282 | 0,001762256 |
| 10 | 0,000705 | 0,000352451 |
| 11 | 0 | 0,001409805 |
| 12 | 0,00282 | 0,005977573 |
| 13 | 0,009136 | 0,010206988 |
| 14 | 0,011278 | 0,010206988 |
| 15 | 0,009136 | 0,011391224 |
| 16 | 0,013647 | 0,012462676 |
| 17 | 0,011278 | 0,008811281 |
| 18 | 0,006344 | 0,00520218 |
| 19 | 0,00406 | 0,00238257 |
| 20 | 0,000705 | 0,000352451 |
| 21 | 0 | 0 |
| Total | | 0,134269828 |

Tabel 4.9 Hasil perhitungan numerik THD sinyal arus penyearah 24-pulsa

| k | k-1 | g(t) | t | pengali | f(t) | p(t) | At | P[T] | g(t)' | p(t)' | P[T]' |
|-------|-----|--------------|--------|---------|----------|--------------|----|--------------|--------------|-------------|-------------|
| 1 | 0 | 1 | 0 | 5,31 | 0 | 0 | 1 | 0,025250551 | 0 | 0 | 0,008204401 |
| 2 | 1 | 0,951056516 | 0,01 | 5,31 | 0,0531 | 0,050501101 | 1 | 0,068209353 | 0,309016994 | 0,016408802 | 0,039415798 |
| 3 | 2 | 0,809016994 | 0,02 | 5,31 | 0,1062 | 0,085917605 | 1 | 0,081973049 | 0,587785252 | 0,062422794 | 0,0849099 |
| 4 | 3 | 0,587785252 | 0,025 | 5,31 | 0,13275 | 0,078028492 | 1 | 0,06362745 | 0,809016994 | 0,107397006 | 0,129450155 |
| 5 | 4 | 0,309016994 | 0,03 | 5,31 | 0,1593 | 0,049226407 | 1 | 0,024613204 | 0,951056516 | 0,151503303 | 0,160711652 |
| 6 | 5 | 0 | 0,032 | 5,31 | 0,16992 | 0 | 1 | -0,022972323 | 1 | 0,16992 | 0,155661541 |
| 7 | 6 | -0,309016994 | 0,028 | 5,31 | 0,14868 | -0,045944647 | 1 | -0,061986569 | 0,951056516 | 0,141403083 | 0,124400044 |
| 8 | 7 | -0,587785252 | 0,025 | 5,31 | 0,13275 | -0,078028492 | 1 | -0,081973049 | 0,809016994 | 0,107397006 | 0,0849099 |
| 9 | 8 | -0,809016994 | 0,02 | 5,31 | 0,1062 | -0,085917605 | 1 | -0,068209353 | 0,587785252 | 0,062422794 | 0,039415798 |
| 10 | 9 | -0,951056516 | 0,01 | 5,31 | 0,0531 | -0,050501101 | 1 | -0,025250551 | 0,309016994 | 0,016408802 | 0,008204401 |
| 11 | 10 | -1 | 0 | 5,31 | 0 | 0 | 1 | 0,025250551 | 0 | 0 | 0,008204401 |
| 12 | 11 | -0,951056516 | -0,01 | 5,31 | -0,0531 | 0,050501101 | 1 | 0,068209353 | -0,309016994 | 0,016408802 | 0,039415798 |
| 13 | 12 | -0,809016994 | -0,02 | 5,31 | -0,1062 | 0,085917605 | 1 | 0,081973049 | -0,587785252 | 0,062422794 | 0,0849099 |
| 14 | 13 | -0,587785252 | -0,025 | 5,31 | -0,13275 | 0,078028492 | 1 | 0,06362745 | -0,809016994 | 0,107397006 | 0,129450155 |
| 15 | 14 | -0,309016994 | -0,03 | 5,31 | -0,1593 | 0,049226407 | 1 | 0,024613204 | -0,951056516 | 0,151503303 | 0,160711652 |
| 16 | 15 | 0 | -0,032 | 5,31 | -0,16992 | 0 | 1 | -0,022972323 | -1 | 0,16992 | 0,155661541 |
| 17 | 16 | 0,309016994 | -0,028 | 5,31 | -0,14868 | -0,045944647 | 1 | -0,061986569 | -0,951056516 | 0,141403083 | 0,124400044 |
| 18 | 17 | 0,587785252 | -0,025 | 5,31 | -0,13275 | -0,078028492 | 1 | -0,081973049 | -0,809016994 | 0,107397006 | 0,0849099 |
| 19 | 18 | 0,809016994 | -0,02 | 5,31 | -0,1062 | -0,085917605 | 1 | -0,068209353 | -0,587785252 | 0,062422794 | 0,039415798 |
| 20 | 19 | 0,951056516 | -0,01 | 5,31 | -0,0531 | -0,050501101 | 1 | -0,025250551 | -0,309016994 | 0,016408802 | 0,008204401 |
| 21 | 20 | 1 | 0 | 5,31 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Total | | | | | | | | 0,006563521 | Total | | 1,670567181 |

Table 4.10 Hasil perhitungana numerik THD penyearah 6-pulsa

| k | k-1 | g(t) | t | pengali | f(t) | p(t) | At | P[T] | g(t)' | p(t)' | P[T]' |
|-------|-----|--------------|--------|---------|----------|--------------|----|--------------|--------------|-------------|-------------|
| 1 | 0 | 1 | 0 | 5,31 | 0 | 0 | 1 | 0,012625275 | 0 | 0 | 0,004102201 |
| 2 | 1 | 0,951056516 | 0,005 | 5,31 | 0,02655 | 0,025250551 | 1 | 0,042696437 | 0,309016994 | 0,008204401 | 0,025950178 |
| 3 | 2 | 0,809016994 | 0,014 | 5,31 | 0,07434 | 0,060142323 | 1 | 0,055040279 | 0,587785252 | 0,043695956 | 0,05621502 |
| 4 | 3 | 0,587785252 | 0,016 | 5,31 | 0,08496 | 0,049938235 | 1 | 0,045480121 | 0,809016994 | 0,068734084 | 0,097493418 |
| 5 | 4 | 0,309016994 | 0,025 | 5,31 | 0,13275 | 0,041022006 | 1 | 0,020511003 | 0,951056526 | 0,126252753 | 0,121536376 |
| 6 | 5 | 0 | 0,022 | 5,31 | 0,11682 | 0 | 1 | -0,016408802 | 1 | 0,11682 | 0,108911101 |
| 7 | 6 | -0,309016994 | 0,02 | 5,31 | 0,1062 | -0,032817605 | 1 | -0,03981735 | 0,951056526 | 0,101002202 | 0,082720203 |
| 8 | 7 | -0,587785252 | 0,015 | 5,31 | 0,07965 | -0,046817095 | 1 | -0,044887949 | 0,809016994 | 0,064438204 | 0,0478248 |
| 9 | 8 | -0,809016994 | 0,01 | 5,31 | 0,0531 | -0,042958802 | 1 | -0,034104676 | 0,587785252 | 0,031211397 | 0,019707899 |
| 10 | 9 | -0,951056516 | 0,005 | 5,31 | 0,02655 | -0,025250551 | 1 | -0,012625275 | 0,309016994 | 0,008204401 | 0,004102201 |
| 11 | 10 | -1 | 0 | 5,31 | 0 | 0 | 1 | 0,025250551 | 0 | 0 | 0,008204401 |
| 12 | 11 | -0,951056516 | -0,01 | 5,31 | -0,0531 | 0,050501101 | 1 | 0,063913473 | -0,309016994 | 0,016408802 | 0,036294658 |
| 13 | 12 | -0,809016994 | -0,018 | 5,31 | -0,09558 | 0,077325844 | 1 | 0,069874319 | -0,587785252 | 0,056180514 | 0,07104906 |
| 14 | 13 | -0,587785252 | -0,02 | 5,31 | -0,1062 | 0,062422794 | 1 | 0,045979319 | -0,809016994 | 0,085917605 | 0,088409793 |
| 15 | 14 | -0,309016994 | -0,018 | 5,31 | -0,09558 | 0,029535844 | 1 | 0,014767922 | -0,951056526 | 0,090901982 | 0,103860991 |
| 16 | 15 | 0 | -0,022 | 5,31 | -0,11682 | 0 | 1 | -0,016408802 | -1 | 0,11682 | 0,108911101 |
| 17 | 16 | 0,309016994 | -0,02 | 5,31 | -0,1062 | -0,032817605 | 1 | -0,03981735 | -0,951056526 | 0,101002202 | 0,082720203 |
| 18 | 17 | 0,587785252 | -0,015 | 5,31 | -0,07965 | -0,046817095 | 1 | -0,049183829 | -0,809016994 | 0,064438204 | 0,05094594 |
| 19 | 18 | 0,809016994 | -0,012 | 5,31 | -0,06372 | -0,051550563 | 1 | -0,038400557 | -0,587785252 | 0,037453676 | 0,022829039 |
| 20 | 19 | 0,951056516 | -0,005 | 5,31 | -0,02655 | -0,025250551 | 1 | -0,012625275 | -0,309016994 | 0,008204401 | 0,004102201 |
| 21 | 20 | 1 | 0 | 5,31 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Total | | | | | | | | 0,091858832 | Total | | 1,145890784 |

Kesimpulan

1. Gelombang 24-pulsa didapatkan dengan memanfaatkan pergeseran sudut fasa $\pm 7,5^0$ dan $\pm 22,5^0$ dari fasa tegangan masukan transformator.
2. Transformator 3 fasa hubungan Δ dan Z step down dengan daya 150 VA, dengan tegangan primer 380 Vac diturunkan menjadi 24 Vac, kemudian disearahkan menjadi 128 Vdc mampu menahan arus sampai 1,6 A.
3. Pada saat dibebani akan mengalir arus yang melewati rangkaian namun terjadi drop atau penurunan tegangan, arus naik dikarenakan resistansi beban, sedangkan drop tegangan terjadi karna impedansi trafo dan resistansi maju dioda.
4. Perhitungan THD arus penyearah menunjukkan bahwa THD penyearah 24-pulsa lebih rendah dibandingkan dengan penyearah 6-pulsa, THD arus penyearah 24-pulsa sebesar 1,41% sedangkan penyearah 6-pulsa sebesar 3,61%.
5. Regulasi tegangan keluaran penyearah adalah sebesar 2,98%

Saran

1. Dalam merancang transformator, lakukan dengan teliti pada saat menggulung belitan, karna kesalahan 1 belitan saja akan berpengaruh terhadap kualitas transformator.
2. Dalam perancangan trafo penyearah ini, perlu diperhatikan bahwa fasa sumber yang tidak seimbang sangat berpengaruh

besar terhadap hasil dari penyearahan.

3. Untuk lebih memperbaiki harmonisa (riak), untuk kedepannya cabo rancang penyearah 36-pulsa dan 48-pulsa

Daftar pustaka

- Anto, Budhi, 2010. Analisis Riak Tegangan Keluaran Konverter AC-DC Berbasis Topologi Penyearah Banyak Pulsa Susunan Paralel. *Jurnal Rekayasa dan Teknologi Elektro*, Volume 4, No.1.
- Singh, Bhim, Sanjay Gairola, 2008. *Star-Connected Autotransformer-Based Full-Wave AC-DC Converter. International Journal of Emerging Electric Power System*, Volume 9, Issue.5.
- Samosir, Ahmad Saudi, 2008. Studi Penggunaan Penyearah 18 pulsa Dengan Transformator 3 Fasa ke 9 Fasa Hubungan Segi Enam. ISSN : 1693-6930, Volume 6, NO.1.
- Setiawan, Rommy, 2011. Pembuatan Transformator Untuk Penyearah 12-Pulsa. Tugas Akhir, Teknik Elektro, Fakultas Teknik Universitas Riau.
- Garg, Vipin, 2006. *A Tapped A Star Connected Autotransformer Based 24-Pulse AC-DC Converter For Power Quality Improvement In Induction Motor Drives*, Volume 7, Issue 4.
- Surbakti, Eka Rahmat, 2013. *Analisa Pengaruh Faktor-K Pada Transformator*. Medan: Skripsi USU.