

# PERANCANGAN MODUL GENERATOR HARMONISA ARUS LISTRIK DAN ANALISA HARMONISA ARUS YANG DIBANGKITKAN

Hendra Rizki Hadiputra<sup>1</sup>, Agung Nugroho<sup>2</sup>, Karnoto<sup>2</sup>  
Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik – Universitas Diponegoro  
Jl. Prof. Soedarto SH Tembalang, Semarang 50275  
email : mail@hendra.web.id

## ABSTRACT

*Harmonics is a problem in electric power quality, which can interfere with system performance. It requires a good simulation and modeling using the software and hardware to learn the phenomenon of harmonics. Simulation and modeling of harmonics using the software is commonly practiced. However, harmonic simulation using hardware not yet available in the Laboratory of Energy Conversion and Power Systems at the Electrical Engineering Department of Diponegoro University.*

*To resolve the issue, in this thesis the author designed and built an electrical current harmonics generator module. Harmonics generator module is a loads circuit with a controlled switching system. The switching is performed using MOSFETs, by dividing one period of fundamental wave into 32 triggering angles. To keep the ratio between the frequency of the trigger signal and the fundamental wave remains constant, the PLL control system is used. Generated current wave form and harmonics can be set by arranging the number of loads for each triggering angle.*

*The current harmonics generator module that has been made working on 220 volts AC 50 Hz, with 6 controlled loads and a linear load. It is able to generate even and odd order of harmonics current. The frequency of the generated harmonic currents is an integer multiple of the fundamental frequency, for example on third order harmonics current generation, the frequency of the fundamental current is 50.3Hz and the harmonic current is 150.8Hz. The higher harmonics order the less it's accuracy, and the other order of harmonic currents appear significantly. For example, on sixth order harmonics generation, the third order harmonic current appears up-to 13.1% and the fifth order harmonic current appears up-to 9.7%. On seventh order harmonics current generation, the third order harmonic current appears up-to 17.9% and the fifth order harmonic current appears up-to 15.5%. This is caused by the limit amount of load units and triggering angles. Installation of shunt passive filters on the module can reduce the harmonics on the order of that filtered, as on the third harmonic testing which can be reduced from 0.71A to 0.35A. But the value of other harmonic orders and the load current is increased.*

**Keywords:** harmonics generator, electric current, simulation, PLL.

## I. PENDAHULUAN

### 1.1. Latar Belakang

Harmonisa adalah deretan gelombang arus atau tegangan yang frekuensinya merupakan kelipatan bilangan bulat dari frekuensi dasar tegangan atau arus itu sendiri. Untuk mempelajari fenomena munculnya harmonisa pada arus listrik, dilakukan suatu simulasi dan pemodelan. Di Laboratorium Konversi Energi Listrik dan Sistem Tenaga Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Diponegoro, pembelajaran mengenai fenomena harmonisa dilakukan dengan simulasi dan pemodelan dengan perangkat lunak. Belum ada perangkat keras yang mendukung simulasi pembentukan harmonisa arus listrik.

Modul generator harmonisa arus listrik merupakan suatu modul pensaklaran beban terkontrol yang dirancang untuk memungkinkan rekayasa bentuk gelombang arus listrik. Gelombang arus yang muncul dapat diatur besar, bentuk gelombang, dan kandungan harmonisanya. Modul generator harmonisa arus listrik dapat digunakan untuk simulasi harmonisa arus listrik dengan perangkat keras, alat pembelajaran, pengujian tapis, dan kegunaan lain yang berhubungan dengan harmonisa arus listrik.

### 1.2. Tujuan

Tujuan yang hendak dicapai dalam Tugas Akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Merancang dan membuat modul generator harmonisa arus listrik dengan sistem pensaklaran beban menggunakan MOSFET yang bekerja pada tegangan 220 V AC frekuensi 50 Hz.
2. Mengetahui karakteristik rangkaian kontrol pemunculan MOSFET dengan sistem *phase-locked loop* pada modul generator harmonisa arus listrik.

3. Mengetahui karakteristik bentuk gelombang arus dan harmonisa arus listrik yang dihasilkan oleh modul generator harmonisa arus listrik.
4. Mengetahui perubahan yang terjadi pada bentuk gelombang arus dan harmonisa arus listrik apabila tapis pasif *shunt* dihubungkan dengan modul generator harmonisa arus listrik.

### 1.3. Batasan Masalah

Tugas akhir ini memiliki batasan masalah sebagai berikut:

1. Modul generator harmonisa arus yang dibuat berfungsi untuk rekayasa bentuk gelombang arus listrik dan bekerja pada tegangan AC 220V frekuensi 50Hz.
2. Modul generator harmonisa arus yang dibuat menggunakan pensaklaran beban dengan MOSFET dengan 32 sudut picu dalam satu periode gelombang arus AC 50 Hz.
3. Rangkaian kontrol pemunculan MOSFET menggunakan sistem PLL (*phase-locked loop*).
4. Modul generator harmonisa arus dibuat dengan 6 buah unit beban terkontrol dan satu buah beban tetap.
5. Besar arus listrik maksimal yang dapat dialirkan setiap unit beban sesuai dengan besar bola lampu pijar yang tersedia di laboratorium yaitu 200 watt dengan arus listrik sekitar 0,9 ampere.
6. Pengujian bentuk gelombang arus dan perhitungan harmonisa yang ditimbulkan oleh modul generator harmonisa arus dilakukan dengan alat ukur *Power Quality Analyzer* merk *LEM* tipe *3Q Analyst*.
7. Analisa hasil pengujian dengan cara membandingkan gelombang dan spektrum arus listrik hasil pengukuran dengan hasil perhitungan alokasi beban.

<sup>1</sup>Mahasiswa Jurusan Teknik Elektro UNDIP

<sup>2</sup>Dosen Jurusan Teknik Elektro UNDIP

8. Pengujian pengaruh tapis pada bentuk gelombang arus dan harmonisa arus dilakukan dengan tiga tapis pasif *shunt* jenis *single-tuned*, yang ditala pada harmonisa ke-3, ke-5, dan ke-7.

## II. DASAR TEORI

### 2.1. Harmonisa

Menurut Arrillaga<sup>[1]</sup>, sebuah harmonisa didefinisikan sebagai komponen dari suatu fungsi yang frekuensinya adalah kelipatan bulat dari frekuensi fundamental sistem. Gelombang tegangan atau arus yang terdistorsi oleh harmonisa merupakan suatu hasil penjumlahan antara fungsi gelombang fundamental dan fungsi gelombang harmonisa yang terkandung.

Sebagai contoh, gelombang arus listrik sinusoidal 50 Hz sebesar 1 ampere terdistorsi oleh gelombang arus sinusoidal 150 Hz (harmonisa ke-3) dengan besar 0,5 ampere, dapat dinyatakan dalam fungsi waktu sebagai berikut:

$$I(t) = I_f(t) + I_{h3}(t)$$

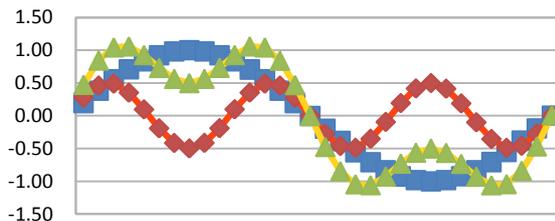
$$I(t) = 1\sin(2\pi 50t) + 0.5\sin(2\pi 150t)$$

$$I(t) = 1\sin(2\pi 50t) + 0.5\sin 3(2\pi 50t) \quad (2.1)$$

Nilai 50 Hz merupakan frekuensi fundamental, dalam hal ini dapat kita sebut sebagai  $f_0$ . Jika  $2\pi 50 = 2\pi f_0 = \omega_0$ , maka persamaan 2.1 dapat dinyatakan sebagai berikut:

$$I(t) = \sin\omega_0 t + 0.5\sin 3\omega_0 t \quad (2.2)$$

Persamaan di atas dapat dinyatakan dalam gambar gelombang pada gambar 2.1.



Gambar 2.1. Gelombang terdistorsi harmonisa ke-3.

Indeks harmonisa yang paling umum yang berhubungan dengan bentuk gelombang tegangan adalah THD (*Total Harmonic Distortion*) yang diartikan sebagai rms dari harmonisa yang dinyatakan dalam persentase terhadap komponen fundamentalnya. Nilai THD tegangan dihitung dengan persamaan berikut:

$$THD_I = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^n V_n^2}}{V_1} \quad (2.3)$$

dengan:

$V_n$  = tegangan rms harmonisa ke-n.

$V_1$  = tegangan rms fundamental.

Nilai THD arus juga dapat dihitung dengan cara yang sama melalui persamaan berikut:

$$THD_I = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^n I_n^2}}{I_1} \quad (2.4)$$

dengan:

$I_n$  = arus rms harmonisa ke-n.

$I_1$  = arus rms fundamental.

Namun karena biasanya arus harmonisa nilainya kecil, maka untuk arus lebih sering digunakan TDD (*Total*

*Demand Distortion*) dengan persamaan sebagai berikut:

$$TDD_I = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^n I_n^2}}{I_R} \quad (2.5)$$

dengan:

$I_R$  = arus beban maksimum tertera.

Distorsi harmonisa akibat beban tak linear menimbulkan berbagai efek, antara lain menjadi penyebab rusaknya kapasitor pada kapasitor bank, meningkatkan tahanan penghantar yang kemudian meningkatkan rugi daya, mengganggu peralatan telekomunikasi, menyebabkan kesalahan pengukuran pada alat ukur, dan lainnya.

### 2.2. Modul Generator Harmonisa Arus

Modul generator harmonisa arus listrik terdiri dari 3 bagian utama, yaitu blok rangkaian kontrol, rangkaian daya/*switching*, dan rangkaian beban.

#### 2.2.1. Rangkaian Kontrol

Rangkaian kontrol berfungsi untuk membangkitkan sinyal picu yang diperlukan untuk menyalakan saklar. Rangkaian kontrol membagi 1 periode gelombang tegangan fundamental (50Hz) menjadi 32 bagian sudut picu. Blok ini terdiri dari PLL, *counter* dan *decoder*.

Agar fasa sinyal picu selalu selaras dengan tegangan fundamental, digunakanlah sistem kendali PLL (*Phase Locked Loop*). PLL adalah suatu sistem kendali umpan balik negatif yang secara otomatis akan menyesuaikan fasa dari suatu sinyal yang dibangkitkan di sisi keluaran dengan suatu sinyal acuan di sisi masukannya.

Keluaran dari PLL adalah gelombang kotak dengan frekuensi N kali gelombang referensi. Gelombang kotak ini kemudian menjadi masukan bagi *counter* dan *decoder*. Fungsi *counter* adalah menghitung jumlah pulsa yang dikeluarkan VCO. Keluaran *counter* berupa angka biner yang kemudian menjadi masukan *decoder*. *Decoder* yang digunakan dalam Tugas Akhir ini adalah *5-to-32 Line Decoder*, dimana masukannya berupa angka biner 5 bit dan keluarannya adalah sinyal kotak di masing-masing pin keluarannya yang berjumlah 32 buah. Rangkaian *counter* dan *decoder* ini menjadi pembagi frekuensi bagi PLL, dengan keluaran *decoder* menjadi umpan balik bagi pembanding fasa PLL, sehingga frekuensi keluaran VCO adalah 32 kali frekuensi acuan, yaitu sekitar 1600 Hz.

#### 2.2.2. Rangkaian Daya

Fungsi rangkaian daya pada modul generator harmonisa arus listrik adalah sebagai saklar terkontrol bagi beban terkontrol. Komponen utama yang digunakan adalah MOSFET. MOSFET dipilih karena kemampuannya untuk bekerja pada tegangan jala-jala 220 volt dan disaklarkan dengan sinyal picu berfrekuensi tinggi.

Rangkaian daya dikendalikan oleh blok rangkaian kontrol untuk mengatur pensaklaran unit beban tak-linear yang berjumlah 6 buah.

#### 2.2.3. Rangkaian Beban

Rangkaian beban terdiri dari 6 buah unit beban terkontrol/tak-linear dan 1 buah unit beban linear. Rangkaian beban menggunakan lampu pijar yang merupakan beban yang bersifat mendekati resistif murni.

Besar beban yang dipasang dapat bervariasi dari 5 watt hingga 200 watt tergantung besar arus yang hendak ditimbulkan.

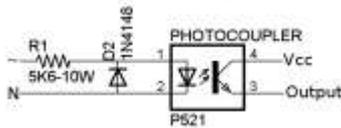
### III. PERANCANGAN DAN PEMBUATAN ALAT

#### 3.1. Perancangan Rangkaian Kontrol

Blok rangkaian kontrol terdiri dari *zero-cross detector*, PLL, *counter*, dan *decoder*.

##### 3.1.1. Perancangan Zero-Cross Detector

*Zero-cross detector* mendeteksi fasa dari tegangan acuan. Masukannya adalah tegangan AC dari PLN yang diberikan pada masukan *photocoupler*.



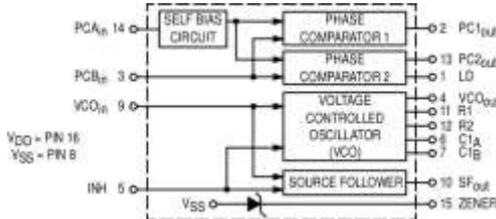
Gambar 3.1. Rangkaian *zero-cross detector*.

Keluaran dari *zero-cross detector* adalah gelombang kotak dengan sudut fasa sama dengan gelombang tegangan AC masukannya.

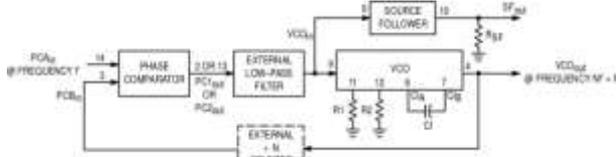
Keluaran dari *zero-cross detector* ini selanjutnya masuk ke pembanding fasa PLL sebagai sinyal acuan atau referensi..

##### 3.1.2. Perancangan Rangkaian PLL

Dalam modul generator harmonisa arus listrik yang dibuat, PLL yang digunakan adalah IC 4046. IC ini memiliki dua macam pembanding fasa, serta osilator terkendali tegangan (VCO) internal. Varian yang digunakan adalah MC14046BCP keluaran Motorola.



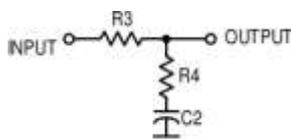
Gambar 3.2. IC MC14046BCP



Gambar 3.3. Rangkaian dasar PLL dengan MC14046BCP

Bagian yang harus ditambahkan pada rangkaian di luar IC yaitu tapis pelewat rendah (*low-pass filter*), pencacah (*external ÷N counter*), serta rangkaian R1, R2, dan C1 untuk menentukan rentang frekuensi keluaran VCO.

Rangkaian tapis pelewat rendah dapat dilihat pada gambar 3.5. Sesuai dengan hasil penelitian Priyo Sasmoko (2010)<sup>[6]</sup>, nilai komponen untuk R3, R4, dan C2 adalah sebesar 470kΩ, 1,5kΩ, dan 22μF. Keluaran tapis ini menjadi masukan untuk mengontrol frekuensi gelombang keluaran VCO.



Gambar 3.4. Rangkaian LPF pada PLL  
Keluaran dari VCO dibatasi pada rentang nilai

tertentu. Pada perancangan Tugas Akhir ini, rentang frekuensi yang dibutuhkan adalah sekitar 1600 Hz. Pemilihan nilai R1, R2, dan C1 dilakukan dengan melihat kurva logaritmik pada *datasheet*. Dengan nilai C1 sebesar 1 nF ( $10^3$  pF), dan R1 sebesar 100K Ohm, serta  $V_{DD}$  12V, maka frekuensi tengah keluaran VCO adalah sekitar 10KHz. R2 tidak dipasang pada rangkaian ini, sehingga tidak ada frekuensi offset. Dengan frekuensi tengah 10KHz, maka frekuensi maksimum keluaran VCO adalah dua kali frekuensi tengah yaitu 20KHz.

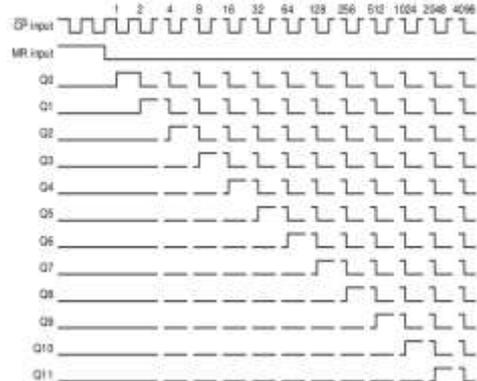
##### 3.1.3. Perancangan Rangkaian Counter dan Decoder

Sinyal keluaran VCO akan menjadi masukan bagi rangkaian pencacah (*counter*). *Counter* yang digunakan adalah IC 4040, yaitu *12-stage binary counter*.

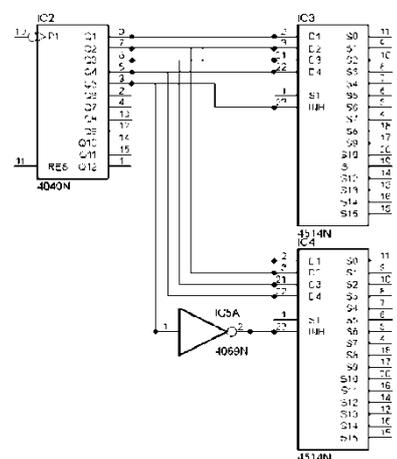
Masukan *counter* berupa gelombang kotak pada pin 10, dan keluarannya berupa angka biner 12 bit pada O<sub>0</sub> hingga O<sub>11</sub>. Pencacahan dilakukan saat sinyal masukan berubah dari *high* ke *low*.

*Decoder* 5 ke 32 disusun dari 2 buah *decoder* 4 ke 16. Komponen yang digunakan adalah IC 4514. Gambar rangkaian *decoder* 5 ke 32 dipaparkan pada gambar 3.6.

Keluaran pertama *decoder* dihubungkan ke pembanding fasa PLL sebagai umpan balik yang dibandingkan dengan referensi. Untuk satu siklus sinyal referensi, *decoder* harus memberikan keluaran secara bergantian dari pin pertama (IC1-O<sub>0</sub>) hingga pin ke-32 (IC2-O<sub>15</sub>). Dengan demikian nilai pembagi frekuensi (N) PLL adalah 32. Sehingga besarnya frekuensi keluaran VCO pada kondisi terkunci dengan frekuensi masukan 50 Hz adalah sekitar 1600 Hz.



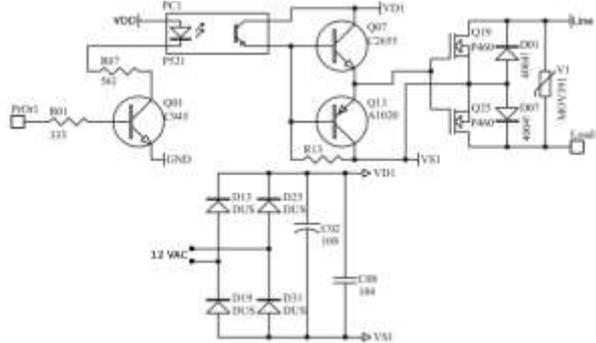
Gambar 3.5. *Timing diagram* IC 4040<sup>[10]</sup>



Gambar 3.6. Rangkaian *counter* dan *decoder* 5 ke 32.

### 3.2. Perancangan Rangkaian Daya

Rangkaian daya berfungsi sebagai saklar terkontrol yang dikendalikan oleh rangkaian kontrol. Rangkaian daya terdiri dari *photocoupler* sebagai pemisah antara rangkaian kontrol dan rangkaian daya, rangkaian transistor sebagai penguat sinyal picu atau *driver*, dan MOSFET sebagai saklar. Dua buah MOSFET jenis IRFP460 digunakan dalam rangkaian saklar ini. MOSFET jenis ini dipilih karena memiliki batasan tegangan kerja maksimal 500 volt dan arus maksimal sebesar 20 ampere.



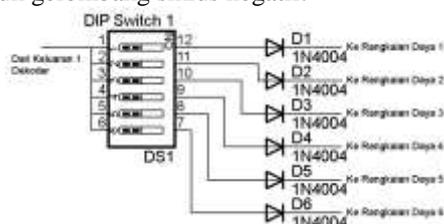
Gambar 3.7. Skema rangkaian daya.<sup>[6]</sup>

Untuk memisahkan antara rangkaian kontrol dengan rangkaian daya, digunakan *photocoupler* P521. Adanya sinyal picu pada R01 33kΩ menyebabkan arus mengalir pada basis transistor C945 yang menyebabkan transistor *on*. Hal ini membuat LED *photocoupler* menyala dan menyebabkan fototransistor pada *photocoupler* juga *on*. Aliran arus pada *photocoupler* untuk mengatur kerja transistor C2655 dan A1020. Transistor C2655 aktif saat ada aliran arus basis dan memberi picuan pada MOSFET, sedangkan transistor A1020 aktif saat tidak ada arus pada basis dan mengosongkan muatan dari *Gate* MOSFET yang menyebabkan MOSFET *off*. Pada rangkaian ini dibutuhkan 2 buah MOSFET untuk setiap rangkaian daya karena arah arus pada saat siklus positif dan negatif listrik AC adalah berkebalikan. Setiap rangkaian daya membutuhkan satu rangkaian catu tegangan untuk mensuplai VD1 dan VS1.

### 3.3. Perancangan Rangkaian Beban

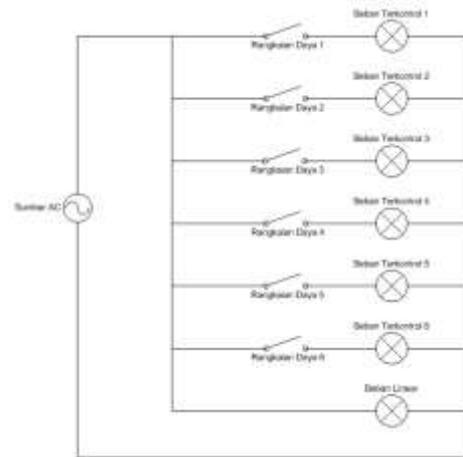
Rangkaian beban terdiri dari 6 buah beban terkontrol yang disaklarkan oleh rangkaian daya, dan 1 buah beban linear. Semua beban dirangkai secara paralel.

Untuk memilih beban pada masing-masing sudut picu, tiap slot keluaran dekoder dihubungkan dengan enam buah saklar yang diseri dengan dioda ke enam rangkaian daya yang tersedia. Pemasangan dioda ini difungsikan sebagai gerbang *or* bagi sinyal keluaran *decoder*, sehingga antara slot-slot yang terhubung ke unit beban yang sama tidak saling mengganggu. Rangkaian ini dipasang sebagai rangkaian pemilihan beban yang dibagi dalam dua papan, satu untuk gelombang siklus positif, dan satu untuk gelombang siklus negatif.



Gambar 3.8. Rangkaian pemilihan unit beban untuk setiap

slot keluaran *decoder*.



Gambar 3.9. Rangkaian beban terkontrol dan beban linear.

## IV. ANALISA DAN PEMBAHASAN

### 4.1. Pengujian Rangkaian Kontrol

Pengujian dilakukan pada keluaran *zero-cross detector*, keluaran pembanding fasa, keluaran *Voltage Controlled Oscillator*, dan keluaran *decoder*.

#### 4.1.1. Pengujian Keluaran Zero-Cross Detector

Pengujian gelombang keluaran pada *zero-cross detector* dilakukan dengan menghubungkan keluaran *photocoupler* TLP521 dengan probe osiloskop.

Pengujian dilakukan dengan osiloskop pada 5ms/div dan 5 volt/div, menunjukkan bahwa satu periode gelombang dengan panjang 4 div adalah 20 ms. Sehingga dapat dihitung frekuensi gelombang keluaran *zero-cross detector* sebesar 50 Hz. Hal ini sudah sesuai dengan perancangan.

#### 4.1.2. Pengujian Keluaran Pembanding Fasa

Pengujian keluaran pembanding fasa dilakukan dengan menempelkan probe osiloskop pada pin ke-13 IC 4046. Tegangan yang terbaca pada osiloskop adalah sekitar 5,5volt atau sama dengan setengah dari  $V_{DD}$ . Ini menunjukkan bahwa sistem sudah terkunci. Hasil pengujian ini sudah sesuai dengan perancangan.

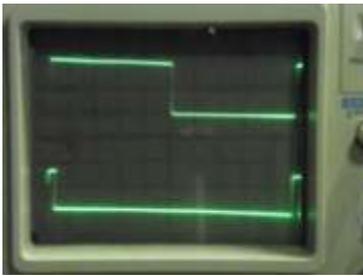
#### 4.1.3. Pengujian Keluaran VCO

Pengujian gelombang keluaran VCO dilakukan dengan mengukur frekuensi pin ke-4 IC 4046 yang merupakan keluaran VCO dengan multimeter. Pengukuran dilakukan pada kondisi operasi dan pada kondisi frekuensi VCO maksimum.

Pada kondisi operasi, terukur frekuensi keluaran VCO berkisar antara 1600Hz. Pada kondisi frekuensi maksimum, hasil pengukuran sebesar 17,54kHz, mendekati nilai perancangan sebesar 20kHz. Frekuensi yang dibutuhkan sebesar 1600Hz, masih berada dalam jangkauan rentang frekuensi. Hal ini sudah sesuai dengan perancangan.

#### 4.1.4. Pengujian Keluaran Counter-Decoder

Pengujian sinyal keluaran *counter-decoder* dilakukan dengan menghubungkan probe osiloskop pada pin tertentu IC *decoder* yang merupakan keluaran ke-0, ke-8, ke-16 dan ke-24 *decoder*. Hal ini untuk menunjukkan sudut picu 0°, 90°, 180°, dan 270°.



Gambar 4.1. Keluaran ke-0 decoder sebagai sudut picu  $0^\circ$

Pada gambar 4.1 di atas, dapat diamati bahwa keluaran decoder sesuai dengan sudut picu yang diperlukan. Hal ini sesuai dengan perancangan.

#### 4.2. Pengujian Rangkaian Daya

Pengujian rangkaian daya dilakukan dengan memeriksa bentuk sinyal dan gelombang pada kaki gate MOSFET, dan tegangan antara kaki drain dan source MOSFET. Pengambilan data dilakukan dengan sample pada unit beban 1. Kondisi pada saat pengujian, unit beban 1 terhubung dengan keluaran decoder ke-0, 1, 2, 4, 10, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 20, 26, 28, 29, 30, 31. Sinyal picu pada kaki gate MOSFET dapat diamati pada gambar 4.2. Sedangkan bentuk tegangan keluaran unit beban 1 dipaparkan pada gambar 4.3.



Gambar 4.2. Sinyal picu pada kaki gate MOSFET unit beban 1



Gambar 4.3. Gelombang keluaran rangkaian daya unit beban 1

#### 4.3. Pengujian Pembangkitan Harmonisa

Pengujian dilakukan dengan pembangkitan gelombang arus sinus yang mengandung harmonisa sinus genap, yaitu harmonisa dominan ke-2, ke-4, dan ke-6, serta harmonisa sinus ganjil, yaitu harmonisa dominan ke-3, ke-5, dan ke-7. Persamaan umum yang digunakan untuk pengujian dalam Tugas Akhir ini adalah:

$$f(t) = I_1 \sin(\omega_0 t) + I_n \sin(n\omega_0 t) \quad (4.1)$$

dengan:

$f(t)$  = fungsi arus yang dibentuk.

$I_1$  = amplitudo arus fundamental.

$I_n$  = amplitudo arus harmonisa ke-n.

$n$  = orde kandungan harmonisa.

##### 4.3.1. Pembangkitan Harmonisa Genap

Pada tugas akhir ini, dibangkitkan gelombang arus terdistorsi harmonisa ke-2, dengan arus fundamental sebesar 1 ampere dan arus harmonisa sebesar 0,5 ampere.

Persamaan yang digunakan adalah sebagai berikut:

$$f(t) = I_0 \sin(\omega_0 t) + I_2 \sin(2\omega_0 t) \quad (4.2)$$

Besar arus rms fundamental yang diperlukan adalah 1 ampere. Karena arus fundamental merupakan gelombang sinusoidal, maka besar  $I_0$  adalah:

$$I_0 = 1 \cdot \sqrt{2} = 1,4142 \quad (4.3)$$

Demikian juga perhitungan untuk nilai  $I_2$  sebagai berikut:

$$I_2 = 0,5 \cdot \sqrt{2} = 0,7071 \quad (4.4)$$

Substitusi nilai  $I_1$  dan  $I_2$  pada persamaan 4.2 menghasilkan persamaan sebagai berikut:

$$f(t) = 1,4142 \sin(\omega_0 t) + 0,7071 \sin(2\omega_0 t) \quad (4.5)$$

Karena satu periode gelombang (T) dibagi dalam 32 slot sudut picu, maka nilai  $\omega t$  juga dapat ditentukan sebagai berikut.

$$\omega t = 2\pi f t \quad (4.6)$$

$$\omega t = 2\pi \frac{t}{T} \quad (4.7)$$

Selanjutnya substitusi nilai  $1/32$  hingga  $32/32$  dengan  $t/T$  pada persamaan 4.5 dan 4.7, akan diperoleh nilai besarnya arus yang diperlukan masing-masing sudut picu. Dari nilai arus tersebut kemudian dapat dihitung besarnya tahanan (R) yang dibutuhkan untuk masing-masing sudut picu. Perhitungan nilai R dan nilai beban dapat dilakukan dengan persamaan berikut.

$$R_n = \frac{V \cdot \sin \omega t_n}{I_n} \quad (4.8)$$

dengan:

$R_n$  = nilai tahanan untuk sudut picu ke-n

V = amplitudo tegangan yang diterapkan

$I_n$  = nilai arus pada sudut picu ke-n

Nilai R pada setiap sudut picu dapat dipenuhi dengan pemasangan lampu pijar. Untuk menghitung daya lampu pijar yang dibutuhkan digunakan persamaan berikut.

$$S = \frac{V_{RMS}^2}{R_n} \quad (4.9)$$

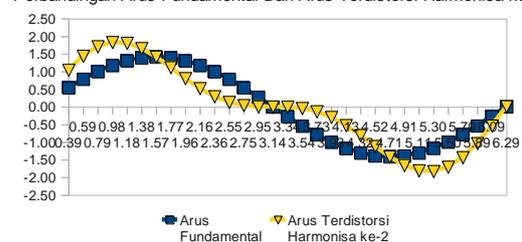
dengan:

S = daya lampu pijar

$V_{RMS}$  = tegangan RMS jala-jala

Bentuk gelombang hasil perhitungan dapat diamati pada gambar 4.4.

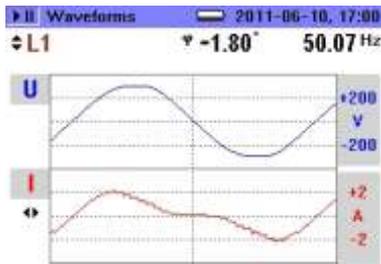
Perbandingan Arus Fundamental Dan Arus Terdistorsi Harmonisa ke-2



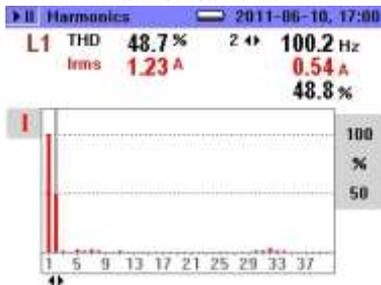
Gambar 4.4. Gelombang arus terdistorsi harmonisa ke-2.

Dari gambar 4.4 dapat diamati bahwa pada  $t$  tertentu, gelombang terdistorsi berhimpit dengan sumbu x. Oleh karena itu, beban linear tidak dapat digunakan.

Selanjutnya dibuat alokasi beban pada tiap unit untuk dipilih pensaklarannya pada tiap slot. Kemudian modul generator harmonisa arus dioperasikan untuk membangkitkan gelombang arus terdistorsi harmonisa ke-2. Hasilnya ditampilkan pada gambar 4.5 dan 4.6



Gambar 4.5. Gelombang tegangan dan arus terdistorsi harmonisa ke-2.

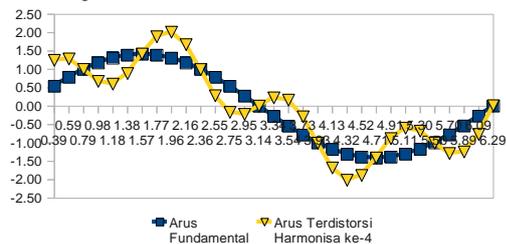


Gambar 4.6. Spektrum arus terdistorsi harmonisa ke-2.

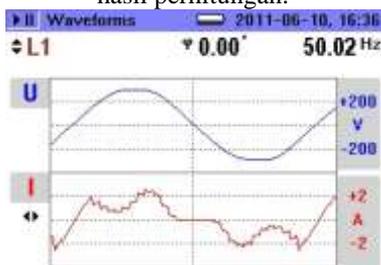
Dengan cara membandingkan gelombang arus yang dihasilkan oleh modul generator harmonisa pada gambar 4.5 dengan gelombang hasil perhitungan pada gambar 4.4, dapat diamati bahwa hasil pengujian sudah sesuai dengan perhitungan.

Dengan cara yang sama, dibangkitkan pula gelombang arus yang mengandung harmonisa dominan ke-4 dan ke-6. Hasilnya dipaparkan sebagai berikut.

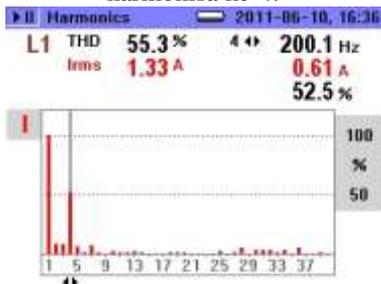
Perbandingan Arus Fundamental Dan Arus Terdistorsi Harmonisa ke-4



Gambar 4.7. Gelombang arus terdistorsi harmonisa ke-4 hasil perhitungan.

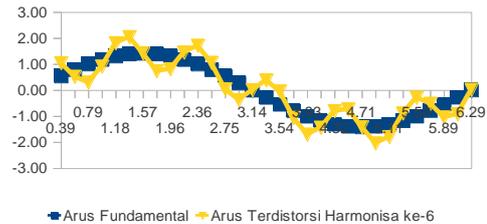


Gambar 4.8. Gelombang tegangan dan arus terdistorsi harmonisa ke-4.



Gambar 4.9. Spektrum arus terdistorsi harmonisa ke-4.

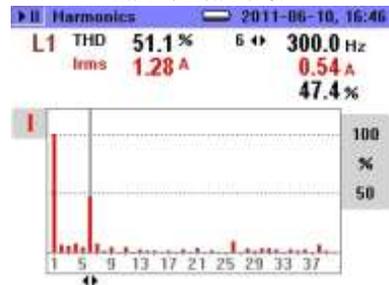
Perbandingan Arus Fundamental dan Arus Terdistorsi Harmonisa ke-6



Gambar 4.10. Gelombang arus terdistorsi harmonisa ke-6 hasil perhitungan.



Gambar 4.11. Gelombang tegangan dan arus terdistorsi harmonisa ke-6.



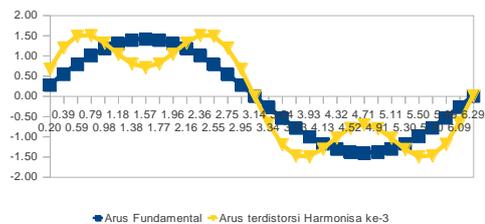
Gambar 4.12. Spektrum arus terdistorsi harmonisa ke-6.

Dari pengujian pembangkitan harmonisa ke-2, ke-4, dan ke-6 dapat disimpulkan bahwa semakin tinggi orde harmonisa yang dibangkitkan, nilai beban per sudut picu semakin besar, sehingga variasi beban yang dibutuhkan semakin banyak. Hal ini juga berarti semakin besar arus yang akan dibangkitkan, jumlah variasi beban yang dibutuhkan semakin banyak. Selain itu, bentuk tangga pada gelombang semakin terlihat. Hal ini menunjukkan perlunya penambahan jumlah slot sudut picu untuk membangkitkan orde harmonisa yang lebih tinggi.

### 4.3.2. Pembangkitan Harmonisa Ganjil

Cara yang sama dilakukan untuk pembangkitan harmonisa ganjil. Dimulai dengan gelombang terdistorsi harmonisa ke-3, bentuk gelombang hasil perhitungan sebagai berikut.

Perbandingan Arus Fundamental Dan Arus Terdistorsi Harmonisa ke-3



Gambar 4.13. Gelombang arus terdistorsi harmonisa ke-3 hasil perhitungan.

Berdasarkan pengamatan pada gambar 4.13, antara sudut  $0^\circ$  hingga  $180^\circ$  dan antara sudut  $180^\circ$  hingga  $360^\circ$  gelombang tidak menyentuh sumbu x, sehingga dapat ditambahkan suatu beban tetap dengan besar tidak lebih

dari nilai terendah arus terdistorsi antara sudut  $0^\circ$  dan  $180^\circ$ . Dari tabel 4.7, nilai arus pada saat  $\omega t = 1,57$  adalah 0,71 ampere. Maka nilai arus rms maksimal untuk beban tetap adalah dapat dihitung sebagai berikut.

$$I_{peak} = \frac{I_{max}}{\sin \omega t} \quad (4.10)$$

$$I_{peak} = \frac{0,71}{\sin 1,57}$$

$$I_{peak} = 0,71 \text{ ampere}$$

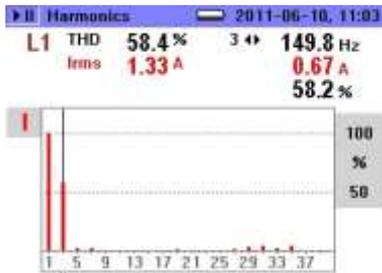
$$I_{RMS} = \frac{I_{peak}}{\sqrt{2}} \quad (4.11)$$

$$I_{RMS} = \frac{0,71}{\sqrt{2}} = 0,5 \text{ ampere}$$

Pada pengujian yang dilakukan, digunakan beban tetap sebesar 100 watt, dengan nilai arus rms sekitar 0,45 ampere. Arus dan tegangan yang terbentuk diukur dengan *LEM 3Q Analyst*, sehingga diperoleh sebagai berikut.



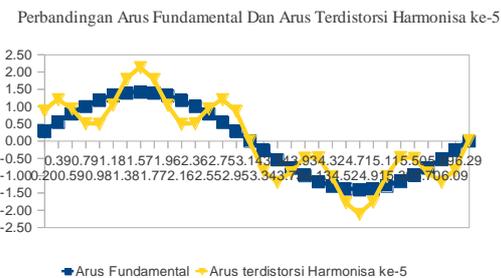
Gambar 4.14 Gelombang tegangan dan arus terdistorsi harmonisa ke-3.



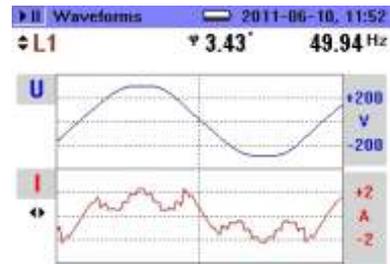
Gambar 4.15. Spektrum arus terdistorsi harmonisa ke-3.

Dengan membandingkan gelombang arus yang dihasilkan oleh modul generator harmonisa pada gambar 4.14 dengan gelombang hasil perhitungan pada gambar 4.13, dapat diamati bahwa hasil pengujian sudah sesuai dengan perhitungan.

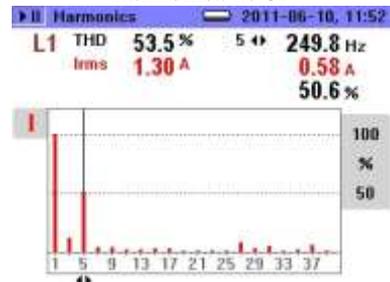
Dengan cara yang sama, dibangkitkan pula gelombang arus yang mengandung harmonisa dominan ke-5 dan ke-7. Hasilnya dipaparkan sebagai berikut.



Gambar 4.16. Gelombang arus terdistorsi harmonisa ke-5 hasil perhitungan.

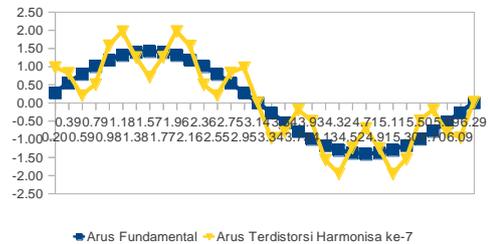


Gambar 4.17. Gelombang tegangan dan arus terdistorsi harmonisa ke-5.



Gambar 4.18. Spektrum arus terdistorsi harmonisa ke-5.

Perbandingan Arus Fundamental dan Arus Terdistorsi Harmonisa ke-7



Gambar 4.19. Gelombang arus terdistorsi harmonisa ke-7 hasil perhitungan.



Gambar 4.20. Gelombang tegangan dan arus terdistorsi harmonisa ke-7.



Gambar 4.21. Spektrum arus terdistorsi harmonisa ke-7.

Dari pengujian pembangkitan harmonisa ke-3, ke-5, dan ke-7, dapat disimpulkan bahwa semakin tinggi orde harmonisa yang dibangkitkan, nilai beban per sudut picu semakin besar, sehingga variasi beban yang dibutuhkan semakin banyak. Hal ini juga berarti semakin besar arus yang akan dibangkitkan, jumlah variasi beban yang dibutuhkan semakin banyak. Selain itu, semakin tinggi orde harmonisa, bentuk gelombang semakin kasar. Oleh karena itu perlu penambahan jumlah slot sudut picu untuk membangkitkan orde harmonisa yang lebih tinggi.

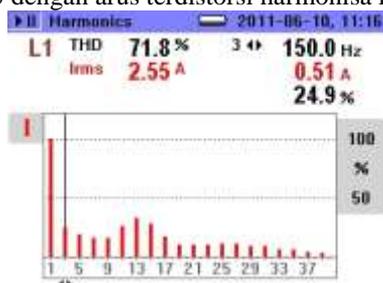
### 4.3.3. Pengujian Harmonisa Ganjil Dengan Tapis Pasif

Dalam tugas akhir ini modul generator harmonisa arus listrik digunakan untuk menguji tapis pasif shunt jenis *single-tuned* untuk harmonisa ke-3, ke-5 dan ke-7. Arus harmonisa yang digunakan untuk pengujian adalah harmonisa ganjil yang dibangkitkan pada subbab 4.3.2.

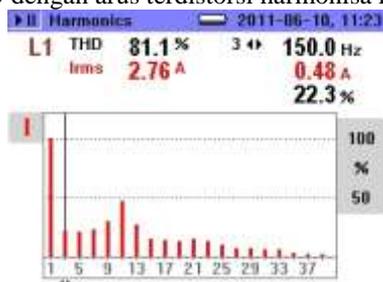
Pengujian dilakukan dengan cara menghubungkan tapis ke *jack* tambahan yang terhubung secara paralel dengan unit-unit beban. Pengujian dilakukan secara bergantian untuk masing-masing tapis, dan dilanjutkan dengan pengujian ketiga tapis secara bersamaan. Data pengujian berupa bentuk gelombang tegangan, arus, dan spektrum harmonisa arus, diukur dengan *LEM 3Q Analyst*. Data-data pengujian ditampilkan sebagai berikut.



Gambar 4.22. Spektrum arus pengujian tapis harmonisa ke-3 dengan arus terdistorsi harmonisa ke-3.



Gambar 4.24. Spektrum arus pengujian tapis harmonisa ke-5 dengan arus terdistorsi harmonisa ke-3.



Gambar 4.25. Spektrum arus pengujian tapis harmonisa ke-7 dengan arus terdistorsi harmonisa ke-3.



Gambar 4.25. Spektrum arus pengujian tapis harmonisa ke-3, ke-5, dan ke-7 dengan arus terdistorsi harmonisa ke-3.

Dari pengujian yang dilakukan, dapat diamati bahwa pemasangan satu buah tapis dapat mereduksi nilai

harmonisa orde tertentu. Akan tetapi, orde harmonisa yang lain justru muncul secara signifikan ketika tapis dipasang. Untuk mereduksi harmonisa orde yang lain dapat dipasang tapis yang ditala untuk orde harmonisa yang lain, akan tetapi hal ini justru meningkatkan nilai arus beban yang mengalir.

## V. PENUTUP

### 5.1. Kesimpulan

Berdasarkan perancangan, pengujian dan analisa yang telah dilakukan pada Tugas Akhir ini, dapat diambil kesimpulan sebagai berikut:

1. Modul generator harmonisa arus yang dirancang dan dibuat bekerja pada tegangan AC 220 volt frekuensi 50 hertz dengan 6 buah unit beban terkontrol dengan pensaklaran MOSFET, satu buah unit beban tetap, dan rangkaian kontrol pemicuan MOSFET dengan pembagian satu periode gelombang tegangan menjadi 32 sudut picu.
2. Pengujian pembangkitan harmonisa memberikan data arus fundamental yang frekuensinya sama dengan frekuensi fundamental tegangan. Misalnya pada pengujian harmonisa-3, frekuensi fundamental arus dan tegangan sama sebesar 50,3Hz dan frekuensi arus harmonisa ke-3 sebesar 150,8Hz. Hal ini menunjukkan rangkaian *Phase-Locked Loop* bekerja dengan baik.
3. Semakin tinggi orde harmonisa yang dibuat, bentuk gelombang arus semakin kasar dan arus harmonisa pada orde lain yang muncul semakin besar. Pada pengujian pembangkitan harmonisa ke-6 muncul arus harmonisa ke-3 hingga 13,1% dan harmonisa ke-5 hingga 9,7%. Pada pengujian pembangkitan harmonisa ke-7 muncul arus harmonisa ke-3 hingga 17,9% dan harmonisa ke-5 hingga 15,5%. Selain itu, besar arus yang mengalir juga terbatas karena terbatasnya jumlah unit beban terkontrol. Ini menunjukkan perlunya penambahan slot sudut picu dan penambahan jumlah unit beban terkontrol.
4. Hasil pengukuran arus listrik dan harmonisanya pada rangkaian kontrol menunjukkan nilai yang setara pada semua pengujian dan tidak terpengaruh oleh harmonisa pada rangkaian beban. Nilai yang terukur adalah sekitar 0,11A, dengan arus fundamental sekitar 0,1A, harmonisa ke-3 sekitar 0,03A (30%) dan harmonisa ke-5 sekitar 0,003A (3%).
5. Pemasangan tapis pasif shunt pada modul generator harmonisa arus listrik dapat mengurangi nilai harmonisa pada orde yang ditapis, akan tetapi meningkatkan nilai harmonisa pada orde yang lain dan juga membuat arus beban yang mengalir semakin besar. Misalnya pada pengujian tapis dengan arus harmonisa ke-3. Nilai harmonisa ke-3 bisa turun dari 0,71A menjadi 0,35A. Akan tetapi arus harmonisa pada orde lain muncul secara signifikan, dan arus total meningkat hingga 2,89A.

### 5.2. Saran

Saran yang dapat diberikan untuk pengembangan Tugas Akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Penambahan jumlah unit beban sangat diperlukan agar variasi beban yang tersedia untuk pembentukan gelombang arus lebih banyak. Sehingga pendekatan nilai beban untuk tiap sudut picu lebih optimal dan gelombang yang dibentuk lebih presisi. Juga agar nilai

- arus untuk setiap sudut picu bisa lebih besar.
2. Penambahan slot sudut picu akan lebih baik, sehingga resolusi cuplikan juga semakin bagus. Dengan demikian, gelombang yang dibentuk juga lebih presisi.
  3. Sistem pemilihan unit beban untuk tiap sudut picu perlu diganti agar penggunaan modul generator harmonisa arus lebih praktis dan mudah digunakan.
  4. Modul yang telah dirancang dalam tugas akhir ini dapat dikembangkan lagi untuk dijadikan pembangkit harmonisa tegangan.

#### DAFTAR PUSTAKA

- [1] Arrillaga, J. and N.R. Watson, *Power System Harmonics*, 2<sup>nd</sup> ed., John Wiley & Sons, New York, 2003.
- [2] Dugan, R.C., M.F. McGranaghan, Surya Santoso and H.W. Beaty, *Electrical Power Systems Quality*, 2<sup>nd</sup> ed., McGraw-Hill, Inc., New York, 2004.
- [3] Nugroho, Agung, "Harmonisa Arus Mesin Induksi", *Jurnal Transmisi*, 8, 7-10, 2004.
- [4] Rashid, Muhammad, *Power Electronics Handbook*, Academic Press, 2001.
- [5] Rizqiawan, Arwindra, *Phase-Locked Loop*, <http://konversi.wordpress.com>, Juli 2010.
- [6] Sasmoko, Priyo, *Modul Simulator Generator Harmonik*, Tesis S-2, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta, 2010.
- [7] Sopyandi, Endi, *Perancangan Single Tuned Filter Untuk Mereduksi Harmonik Arus Dengan Simulasi Program ETAP Power Station 5.0.3*, Skripsi S-1, Universitas Indonesia, Depok, 2009.
- [8] Sudarno, Harsono, Liem Ek Bien, "Pengujian Harmonisa dan Upaya Pengurangan Gangguan Harmonisa pada Lampu Hemat Energi", *Journal Teknik Elektro Trisakti*, Teknik Elektro Universitas Trisakti, 4, 53-64, 2004.
- [9] Suweden, I Nengah dan I Wayan Rinas, "Analisa Penanggulangan THD Dengan Filter Pasif Pada Sistem Kelistrikan di RSUP Sanglah", *Majalah Ilmiah Teknologi Elektro*, Prodi Teknik Elektro Universitas Udayana Bali, 8, 7-13, 2009.
- [10] Tocci, Ronald J., *Digital Systems: Principles And Applications*, Prentice Hall, London, 2004.
- [11] Zuhail, *Dasar Teknik Tenaga Listrik dan Elektronika Daya*, Gramedia Pustaka Utama, Jakarta, 1988.
- [12] IEEE Standard 519-1992, *Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems*
- [13] ---, *Phase Locked Loop 4046*, <http://noorhalimah.wordpress.com>, Juli 2010.

#### BIODATA



Hendra Rizki Hadiputra (L2F004482), dilahirkan di Kudus, Jawa Tengah, pada tanggal 27 April 1987. Menempuh pendidikan di SD Cendono 01, SLTP 1 Kudus, SMA 1 Kudus, dan saat ini sedang menyelesaikan pendidikan di Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Diponegoro Semarang.

Menyetujui,  
Pembimbing I

Ir. Agung Nugroho, M.Kom  
NIP 195901051987031002

Pembimbing II

Karnoto, ST, MT  
NIP 196907091997021001