

BAB IV

PENGUJIAN DAN ANALISIS

1.1. Pengujian Beban Rumah Tangga di Laboratorium

Pengujian tiap beban rumah tangga dalam penelitian ini dilakukan di Laboratorium Dasar Elektrik dan Pengukuran Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Brawijaya. Tujuan dari pengujian ini yaitu mengetahui pengaruh harmonisa pada kWh meter digital yang dibebani dengan beban linier dan nonlinier.

Untuk pelaksanaan pengujian ini digunakan dua jenis beban, yaitu beban linier dan nonlinier. Hal ini dimaksudkan untuk membandingkan seberapa besar kesalahan penunjukan kWh meter digital apabila dihubungkan dengan dua jenis beban yang berbeda, dimana beban nonlinier menimbulkan adanya harmonisa.

Beban yang digunakan sebagai beban linier yaitu lampu pijar, elemen pemanas seperti setrika, *rice cooker*, dan *dispenser* sedangkan beban yang digunakan sebagai beban nonlinier adalah lampu hemat energi, *Personal Computer*(PC), dan *Air Conditioner* (AC).

1.2. Metode Pengambilan Data pada Pengujian

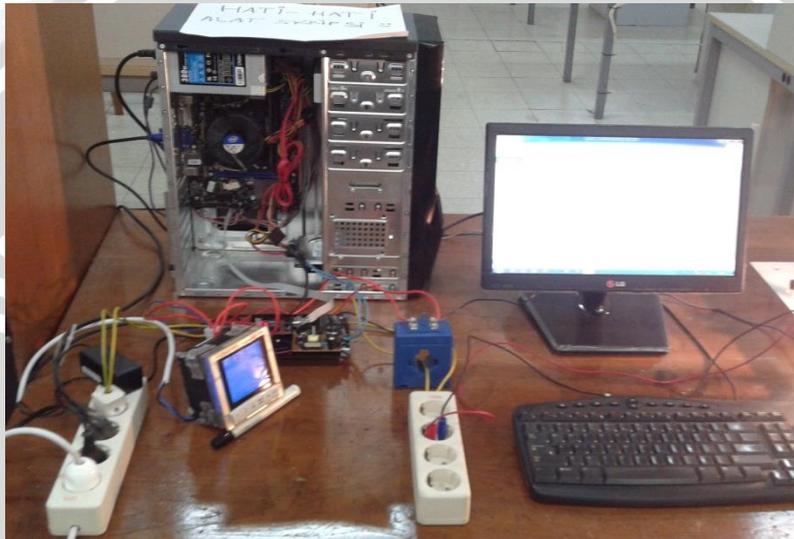
Pengambilan data dilakukan dengan dua macam pengujian yaitu pengukuran besaran-besaran kelistrikan menggunakan alat ukur energi kWh meter digital, dan pengukuran THD arus dan THD tegangan dengan menggunakan alat ukur listrik yaitu *Power Quality Analyzer* fluke 43B. Variabel yang diukur di alat ukur energi(kWh) antara lain tegangan, arus, energi, daya nyata, daya semu, daya reaktif, *power faktor*. Sedangkan, variabel yang diukur di alat ukur fluke 43B yaitu THD arus dan THD tegangan.

Pengambilan data yang dilakukan, meliputi:

1. kWh meter digital dibebani dengan beban linier (lampu pijar, elemen pemanas seperti setrika, *rice cooker* (pemanas nasi) dan *dispenser* (pemanas air),
2. kWh meter digital dibebani dengan beban nonlinier (lampu hemat energi, *Personal Computer*(PC) dan *Air Conditioner*(AC).

1.3. Rangkaian Pengujian

Pada pengujian alat ukur energi kWh meter digital dengan berbagai jenis beban menggunakan dua jenis beban yang berbeda yaitu beban linier dan beban nonlinier. Rangkaian dari kedua jenis pengujian diatas sama hanya diubah-ubah pada sisi bebannya saja. Rangkaian pengujian ditunjukkan pada Gambar 3.3 dan 3.4, sedangkan foto pengujian tanpa beban secara keseluruhan terlihat pada Gambar 4.1.



Gambar 4. 1 Foto Pengujian Tanpa Beban
Sumber : Pengujian

1.4. Pengujian Beban Linier

1.4.1. Peralatan

Peralatan yang dibutuhkan pada saat pengambilan data adalah sebagai berikut:

1. *Power Supply*
2. Seperangkat alat ukur meter elektronik sebagai kWh meter digital satu fasa tipe Socomec Diris A40
3. PC / CPU type LG intel inside core i5
4. Monitor LG LED 16EN33
5. Kabel Penghubung
6. *Voltage Regulator*
7. Fuse

8. Kabel Roll NYM 2 x 1.5 mm² 380 V/500 V
9. *Power Quality Analyzer* Fluke 43B
10. Beban-beban linier, elemen pemanas seperti lampu pijar 3 x 40 watt, setrika 300 watt, dan *rice cooker* (pemanas nasi) 280W/50W, dan *dispenser* (pemanas air).

1.4.2. Prosedur Pengujian

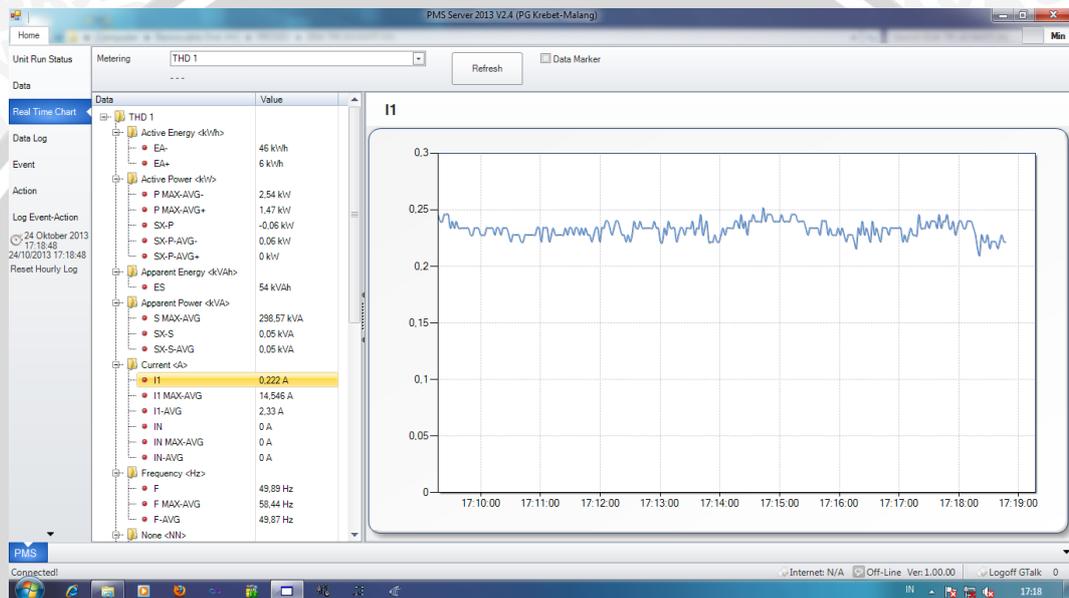
Adapun prosedur percobaan yang dilakukan pada pengujian di laboratorium dasar elektrik dan pengukuran sebagai berikut:

1. Rangkaian pengujian terlihat seperti Gambar 4.2
2. Hubungkan sumber tegangan (*power supply*) ke *voltage regulator* untuk mengatur tegangan masukan hingga 220 volt dan diamati menggunakan voltmeter
3. Kabel roll yang digunakan untuk beban dihubungkan pada CT (*Current Transformer*) agar arus yang terdeteksi pada CT akan terbaca pada rangkaian elektronik untuk interface ke CPU dan ditampilkan di monitor.
4. Pada beban lampu menggunakan modul fitting, dimana terdapat 12 fitting yang dibagi dalam 3 fasa dan dihubungkan parallel. Satu fasanya terdiri dari 4 fitting. Untuk pengujian ini, modul fitting dibebani 3 lampu pijar dengan besar daya tiap lampu pijarnya 40 watt sehingga total daya yang digunakan sebesar 120 watt.



Gambar 4. 2 Rangkaian Pengujian Pengukuran Beban Lampu Pijar
Sumber : Pengujian Laboratorium

5. Data-data yang diinginkan seperti besarnya arus, tegangan, daya nyata, daya semu, daya reaktif power faktor, dan lain-lain terukur secara *real time* pada alat ukur energi tipe Socomec Diris A40 sehingga progresnya akan ditunjukkan pada grafik pembebanan tiap bebannya
6. Arus yang terbaca nantinya ditampilkan pada software, selain arus besaran-besaran listrik lainnya juga dapat ditampilkan pada grafik software dibawah ini. Tampilan software ditunjukkan pada Gambar 4.3



Gambar 4. 3 Tampilan software alat ukur energi Socomec Diris A40
 Sumber : Pengujian Laboratorium

7. Kemudian ukur besar THD arus dan THD tegangan dengan menggunakan alat ukur harmonisa tipe *Power Quality Analyzer* fluke 43B
8. Ulangi prosedur diatas untuk pengujian terhadap beban linier yang lainnya seperti lampu pijar, elemen pemanas seperti setrika, *rice cooker*, dan *dispenser*. Tetapi untuk prosedur nomor 4 diatas tidak digunakan selain pengujian lampu.
9. Catat hasil pengukuran pada tabel yang telah disediakan

1.4.3. Data Hasil Pengujian

Hasil pengujian dengan menggunakan beban linier yang berupa lampu pijar, elemen pemanas setrika, *dispenser* dan *rice cooker* ditunjukkan pada Tabel 4.1.

Tabel 4. 1 Hasil Pengukuran Besaran-Besaran Listrik Beban Linier

| Jenis Beban | V (V) | I (A) | P (kW) | Q (kVar) | S (kVA) | cos ϕ |
|-------------|--------|-------|--------|----------|---------|------------|
| Lampu Pijar | 229,66 | 0,52 | 0,13 | 0,01 | 0,12 | 1 |
| Setrika | 226,25 | 1,42 | 0,35 | 0,01 | 0,34 | 1 |
| Dispenser | 230,74 | 0,87 | 0,21 | 0,01 | 0,19 | 1 |
| Rice cooker | 228,23 | 0,14 | 0,03 | 0 | 0,04 | 1 |

Keterangan:

V = Tegangan Masukan Beban (volt)

I = Arus Beban (ampere)

P = Daya Nyata Beban (kW)

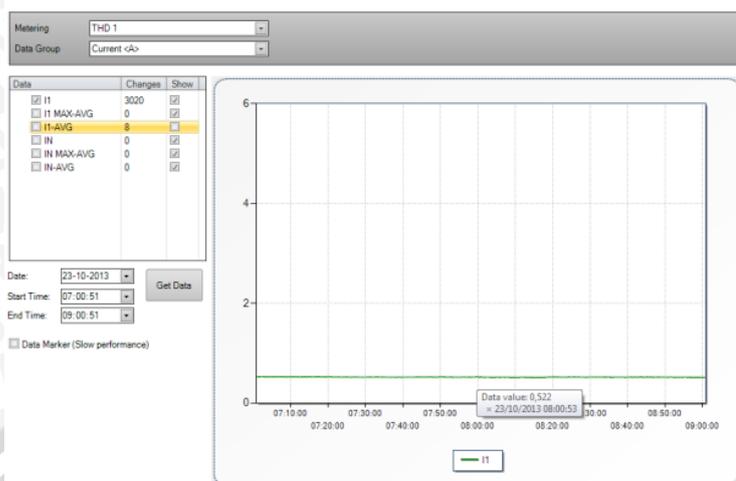
Q = Daya Reaktif Beban (kVar)

S = Daya Semu Beban (kVA)

Cos ϕ = Faktor Daya Beban

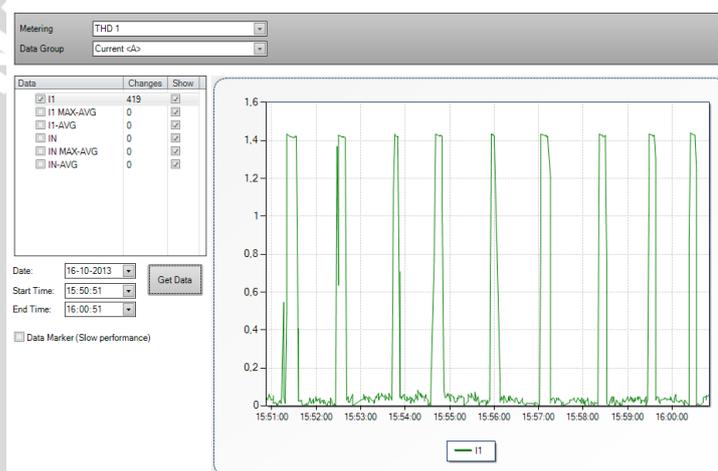
Pada beban linier untuk tabel pengukuran THD arus dan THD tegangan tidak dicantumkan karena nilai harmonisa dari beban linier sangatlah kecil sekali, dan nilai harmonisa yang muncul tersebut pun dikarenakan adanya faktor eksternal. Karakteristik gelombang arus beban linier berupa lampu pijar, setrika, dan *rice cooker* dari hasil pembacaan pada alat ukur digital Socomec Diris A40 ditunjukkan pada Gambar 4.4 sampai 4.7.

Data Source



Gambar 4. 4 Grafik Arus Beban Lampu Pijar

Data Source

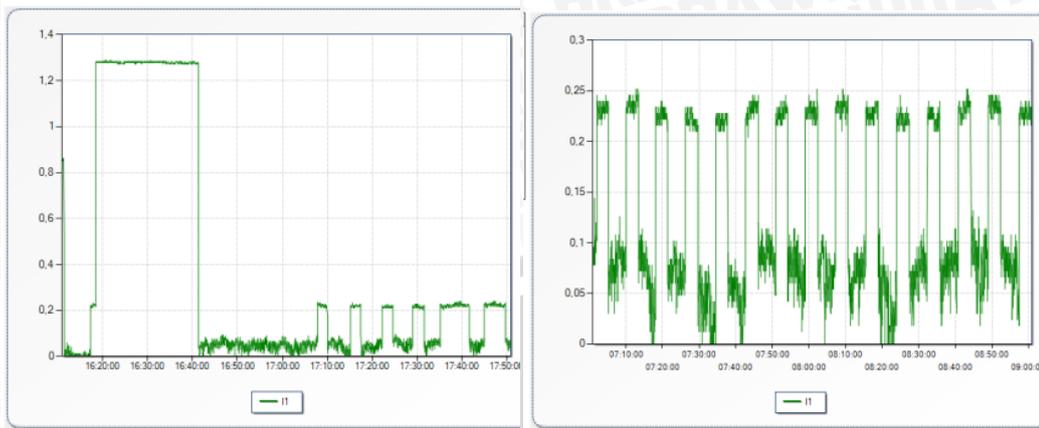


Gambar 4. 5 Grafik Arus Beban Setrika

Data Source



Gambar 4. 6 Grafik Arus Beban Dispenser



Gambar 4. 7 Grafik Arus Beban *Rice cooker* saat sedang memasak nasi dan saat sebagai pemanas/warmer

Tiap beban linier memiliki karakteristik arus yang berbeda, hal ini mempengaruhi dari nilai besaran energi yang terukur. Pada Gambar 4.4 grafik arus yang ditunjukkan adalah garis konstan horizontal sehingga membuat pemakaian energi tiap detiknya terhitung. Berbeda dengan grafik arus yang ditunjukkan pada Gambar 4.5, 4.6, dan 4.7 yang seakan membentuk gelombang kotak, hal ini disebabkan karena fungsi beban linier yang sebagai elemen pemanas seperti setrika, *dispenser* dan *rice cooker* yang bekerja saat suhu telah mencapai titik tertentu akan turun kembali, penyesuaian suhu inilah yang membuat grafik karakteristik arus berbentuk seperti yang terlihat pada Gambar 4.5, 4.6 dan 4.7.

1.4.4. Analisis

Untuk lebih mempermudah analisis maka analisis terhadap masing-masing beban dikelompokkan berdasarkan jenisnya yaitu analisis beban linier dan analisis beban nonlinier. Pada masing-masing beban diklasifikasikan kembali menjadi tiap-tiap bebannya, pada beban linier terdapat empat beban yaitu beban lampu pijar, beban setrika (elemen pemanas), beban *dispenser* (pemanas air), dan *rice cooker* (pemanas nasi). Dari hasil pengujian di laboratorium, dapat dilakukan Analisis pengaruh harmonisa terhadap hasil penunjukan kwh meter digital dengan melakukan perhitungan daya aktif hasil pengukuran dan prosentase kesalahan hasil penunjukan energi kWh meter digital terhadap energi yang diserap beban.

Dari hasil data pengukuran, maka selanjutnya akan dihitung berdasarkan teori berupa besar daya aktif yang terpakai oleh beban, baik daya aktif

fundamental maupun daya aktif harmonisa total. Namun, dalam beban linier tidak dilakukan perhitungan daya aktif harmonisa total dikarenakan tidak ada harmonisa pada beban linier. Berdasarkan persamaan 2-1, perhitungan daya aktif tiap beban nonlinier secara teori adalah sebagai berikut:

- Daya Fundamental

Daya fundamental (P fundamental) untuk beban linier lampu pijar dengan hasil pengukuran,

$$V_1 (\text{Tegangan masukan beban}) = 229,66 \text{ volt}$$

$$I_1 (\text{Arus masukan beban}) = 0,52 \text{ ampere}$$

$$\cos \varphi (\text{Faktor Daya beban}) = 1$$

dapat dihitung dengan menggunakan persamaan 2-1 sebagai berikut:

$$\begin{aligned} P \text{ fundamental beban Lampu Pijar} &= V_1 \times I_1 \times \cos \varphi \\ &= 229,66 \times 0,52 \times 1 \\ &= 119,4232 \text{ W} = 0,1194 \text{ kW} \end{aligned}$$

Hasil Penunjukan daya aktif yang terukur pada kWh meter digital untuk beban lampu pijar adalah 0,13 kW

Dengan menggunakan persamaan 2-2 dapat dihitung

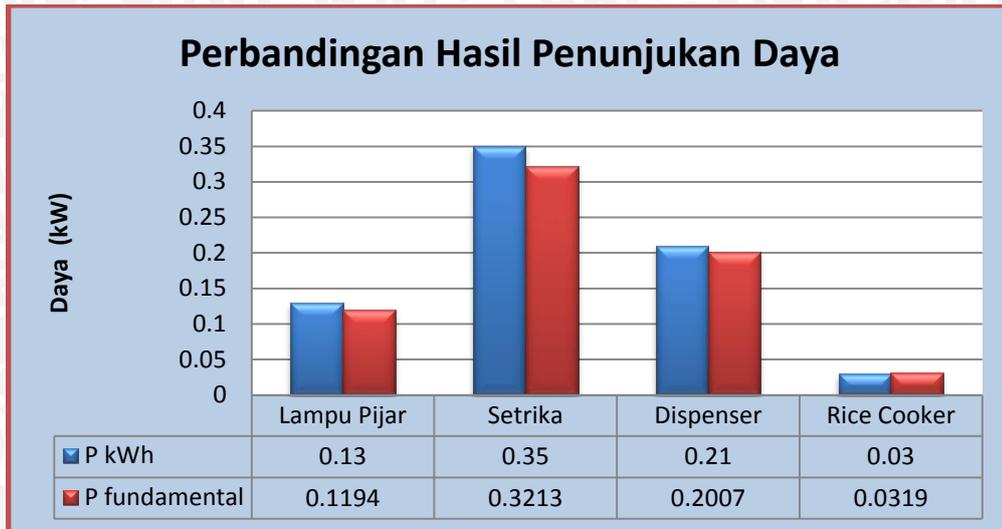
$$\begin{aligned} E \text{ fundamental beban lampu pijar} &= V_1 \times I_1 \times \cos \varphi \times t = P \times t \\ &= 0,1194 \times 8,25 \\ &= 0,9851 \text{ kWh} \end{aligned}$$

Hasil penunjukan energi pada kWh meter digital adalah 1 kWh

Hasil perhitungan untuk beban-beban linier yang lain dapat dilihat pada Tabel 4.2.

Tabel 4. 2 Perbandingan daya aktif dan energi hasil pengukuran dan hasil perhitungan secara teori

| BEBAN | | t (hour) | HASIL PENGUKURAN | | HASIL PERHITUNGAN | |
|--------|-------------|-------------|------------------|---------------|-------------------|----------------|
| | | | PkWh (kW) | EkWh (kWh) | Pfund (kW) | Efund (kWh) |
| Linier | Lampu Pijar | 8,25 | 0,13 | 1 | 0,1194 | 0,9851 |
| | Setrika | 3,1 | 0,35 | | 0,3213 | 0,9960 |
| | Dispenser | 4,85 | 0,21 | | 0,2007 | 0,9734 |
| | Rice cooker | 30,52 | 0,03 | | 0,0319 | 0,9752 |



Gambar 4. 8 Hasil Penunjukan Daya yang terukur pada alat ukur kWh meter digital untuk Beban Linier

Efek pembebanan kWh meter digital = $1 - 0,9851 = 0,0149$

Presentase kesalahan hasil penunjukan energi kWh meter digital terhadap energi yang diserap beban dihitung dengan menggunakan persamaan 2-14

Presentase kesalahan(%error) adalah sebagai berikut:

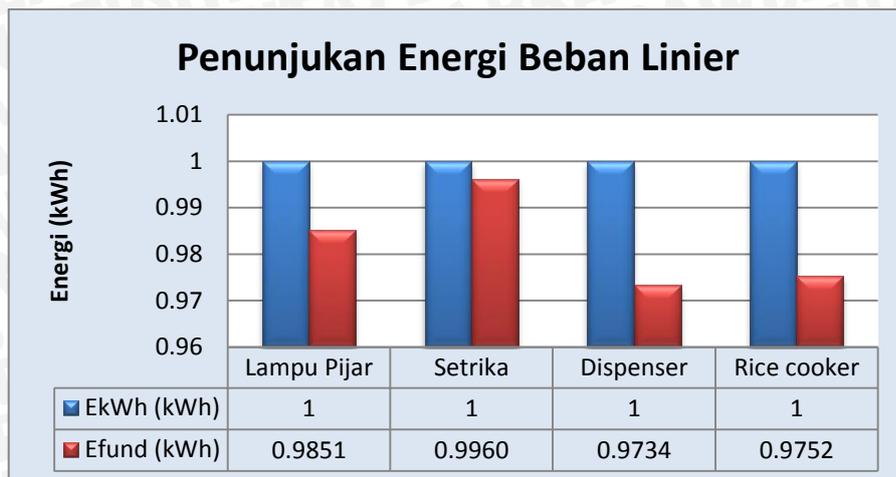
$$\begin{aligned} \% \text{ Kesalahan} &= \frac{\text{Energi yang diukur oleh meter} - \text{Energi sebenarnya}}{\text{Energi sebenarnya}} \times 100\% \\ &= \frac{1 - 0,9851}{0,9851} \times 100\% = \frac{0,0149}{0,9851} \times 100\% = 1,5125\% \end{aligned}$$

Hasil perhitungan lainnya ditunjukkan pada Tabel 4.3

Tabel 4. 3 Hasil Perbandingan Energi untuk Beban Linier

| Beban | EkWh (kWh) | Efund (kWh) | Efek Pembebanan | Error (%) |
|-------------|------------|-------------|-----------------|-----------|
| Lampu Pijar | 1 | 0,9851 | 0,0149 | 1,5125 |
| Setrika | 1 | 0,9960 | 0,0040 | 0,4016 |
| Dispenser | 1 | 0,9734 | 0,0266 | 2,7326 |
| Rice cooker | 1 | 0,9752 | 0,0248 | 2,5431 |

Sumber: Hasil Perhitungan



Gambar 4. 9 Grafik Hasil Penunjukan Energi

Perbandingan daya yang terukur pada kWh meter digital dan daya yang didapatkan secara teori melalui perhitungan untuk beban linier terlihat pada Gambar 4.8, nilai daya fundamental lebih kecil dari nilai daya yang terukur pada alat ukur kWh meter digital, hal tersebut dapat mempengaruhi dari hasil penunjukan energi. Dari hasil pengujian dan analisis beban linier dapat disimpulkan bahwa tidak ada pengaruh harmonisa yang terjadi pada beban linier rumah tangga sehingga nilai energi fundamental yang dihasilkan tanpa adanya harmonisa masih dibawah hasil penunjukan energi kWh meter digital, selisih kedua nilai energi tersebut dipengaruhi efek pembebanan pada alat ukur kWh digital dan memberikan *error* kesalahan di tiap-tiap beban linier rumah tangga yang ditimbulkan. Pada Gambar 4.9 *error* kesalahan yang paling besar terjadi pada beban *dispenser* yaitu sebesar 2,7326 % dan yang terkecil yaitu pada beban setrika yaitu 0,4016 %.

1.5. Pengujian Beban Nonlinier

1.5.1. Peralatan

Peralatan yang dibutuhkan pada saat pengambilan data adalah sebagai berikut:

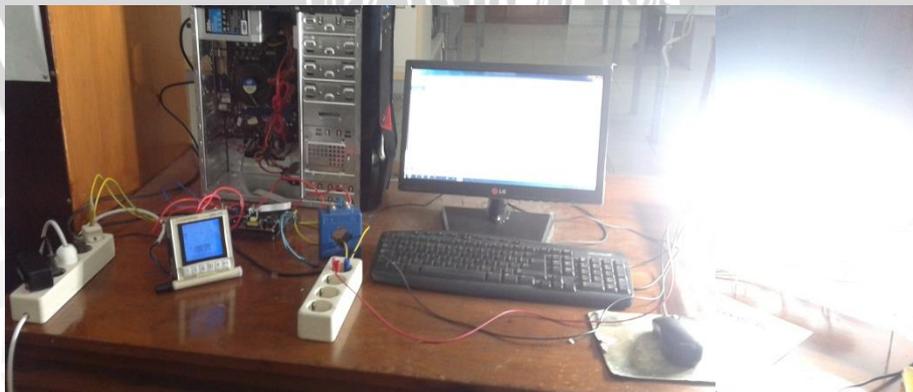
1. *Power Supply*
2. Seperangkat alat ukur meter elektronik sebagai kWh meter digital satu fasa tipe Socomec Diris A40
3. PC / CPU type LG intel inside core i5

4. Monitor LG LED 16EN33
5. Kabel Penghubung
6. Fuse
7. Kabel Roll NYM 2x2.5 mm² 300/500 V
8. *Power Quality Analyzer* Fluke 43B
9. Beban-beban nonlinier, seperti lampu hemat energi 5 x 24 watt, *Air Conditioner (AC)* 2PK, dan *Personal Computer(PC)*.

1.5.2. Prosedur Pengujian

Adapun prosedur percobaan yang dilakukan pada pengujian di laboratorium dasar elektrik dan pengukuran sebagai berikut:

1. Rangkaian pengujian terlihat seperti pada Gambar 4.10
2. Hubungkan sumber tegangan (*power supply*) ke stop kontak sebagai mengatur tegangan masukan jala-jala PLN
3. Kabel roll yang digunakan untuk beban dihubungkan pada CT (Current Transformator) agar arus yang terdeteksi pada CT akan terbaca untuk ditampilkan di monitor
4. Modul fitting terdapat 12 fitting yang dibagi dalam 3 fasa dan dihubungkan parallel. Satu fasanya terdiri dari 4 fitting. Untuk pengujian ini, modul fitting dibebani 5 lampu hemat energi dengan besar daya tiap lampu hemat energi 24 watt sehingga total daya 120 watt.



Gambar 4. 10 Foto Pengujian Pengukuran Beban Lampu Hemat Energi
Sumber: Pengujian Laboratorium

5. Data-data yang diinginkan seperti besarnya arus, tegangan, daya nyata, daya semu, daya reaktif power faktor, dan lain-lain terukur secara *real time* pada alat ukur energi tipe Socomec Diris 40A sehingga progresnya akan ditunjukkan pada grafik pembebanan tiap bebannya
6. Kemudian ukur pula besar THD arus dan THD tegangan dengan menggunakan alat ukur harmonisa tipe Power Quality Analyzer Fluke 43B
7. Ulangi prosedur diatas untuk pengujian terhadap beban nonlinier yang lainnya seperti Lampu Hemat Energi, *Personal Computer(PC)* dan *Air Conditioner(AC)*. Tetapi untuk prosedur nomor 4 diatas tidak digunakan selain pengujian lampu.
8. Catat hasil pengukuran pada tabel yang telah disediakan

1.5.3. Data Hasil Pengujian

Hasil pengujian dengan menggunakan beban nonlinier yang berupa Lampu Hemat Energi, *Personal Computer(PC)* dan *Air Conditioner (AC)* ditunjukkan sebagai berikut:

1.5.3.1. Hasil Pembacaan alat ukur digital Socomec Diris A40

Pengambilan data hasil pembacaan alat ukur digital Socomec Diris A40 dimaksudkan untuk membandingkan hasil pengukuran yang didapatkan dengan hasil penunjukan dari alat ukur digital kWh meter digital. Berikut hasil pembacaan dari alat ukur digital kWh meter

Tabel 4. 4 Hasil Pembacaan Besaran Listrik Beban Nonlinier

| Jenis Beban | V (V) | I (A) | P (kW) | Q (kVar) | S (kVA) | cos ϕ |
|------------------------------|----------|----------|-----------|-------------|------------|---------------|
| Lampu Hemat Energi | 226,29 | 0,7 | 0,11 | 0,05 | 0,12 | 0,9 |
| <i>Personal Computer(PC)</i> | 219,02 | 0,29 | 0,05 | 0,02 | 0,04 | 0,91 |
| <i>Air Conditioner (AC)</i> | 218,17 | 9,42 | 2,06 | 0,25 | 2,07 | 0,99 |

Keterangan:

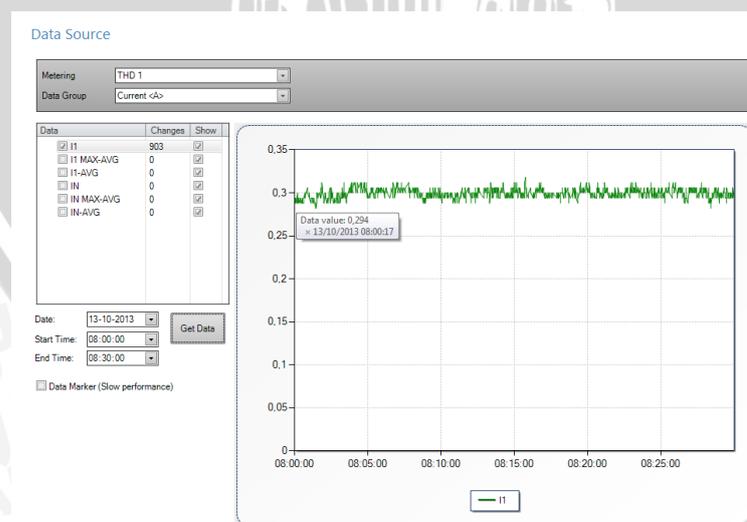
V = Tegangan Masukan Beban (volt)

- I = Arus Beban (ampere)
- P = Daya Nyata Beban (kW)
- Q = Daya Reaktif Beban (kVar)
- S = Daya Semu Beban (kVA)
- Cos ϕ = Faktor Daya Beban

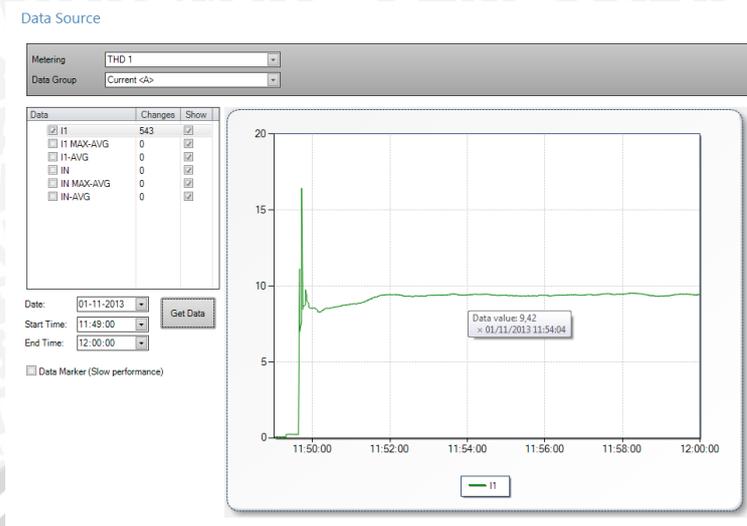
Karakteristik gelombang arus beban nonlinier berupa lampu hemat energi, *Personal Computer(PC)*, dan *Air Conditioner (AC)* dari hasil pembacaan pada alat ukur digital Socomec Diris A40 ditunjukkan pada Gambar 4.11 sampai 4.13.



Gambar 4. 11 Grafik Arus Beban Lampu Hemat Energi



Gambar 4. 12 Grafik Arus Beban *Personal Computer(PC)*



Gambar 4. 13 Grafik Arus Beban Monitor Air Conditioner (AC)

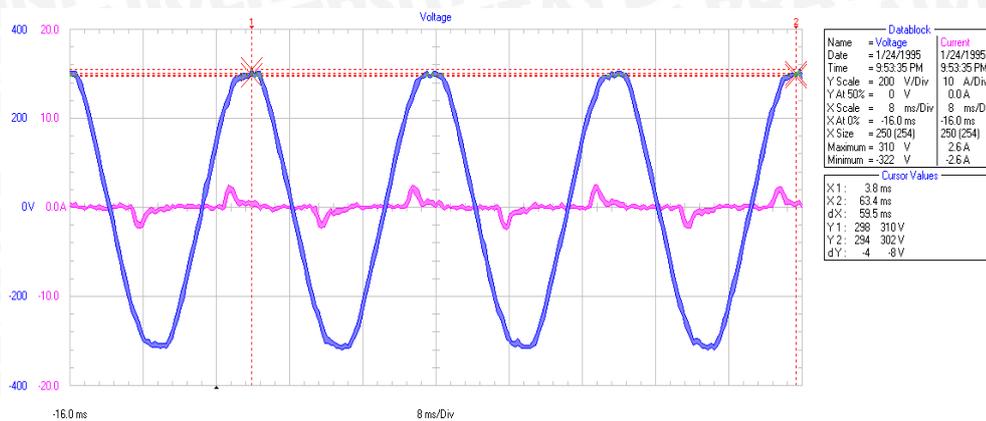
Karakteristik arus beban nonlinier pada Gambar 4.11, 4.12 dan 4.13 menunjukkan bahwa pemakaian beban secara *real time*, dalam pemakaian beban Lampu Hemat Energi, *Personal computer*(PC), dan *Air Conditioner*(AC) grafik arus yang ditunjukkan adalah garis horizontal sehingga membuat pemakaian energi tiap detiknya terhitung. Berbeda dengan grafik arus yang ditunjukkan pada beban linier yang seakan membentuk gelombang kotak, hal tersebut disebabkan karena fungsi beban linier yang sebagai elemen pemanas sehingga tiap detiknya ada nilai arus yang bernilai nol menyesuaikan suhu yang digunakan, sedangkan pada beban nonlinier karena digunakan tiap detiknya tidak ada arus yang bernilai nol dan membuat grafik karakteristik arus seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.11, 4.12 dan 4.13.

1.5.3.2. Hasil Pengukuran Harmonisa dengan Fluke 43 B

Hasil pengukuran harmonisa arus dan harmonisa tegangan pada beban nonlinier dapat dilihat pada Tabel 4.5.

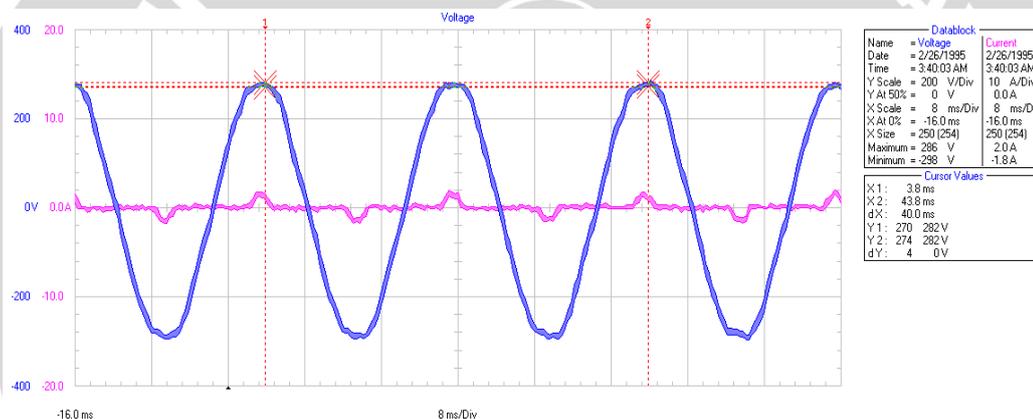
Tabel 4. 5 Pengukuran Tegangan, Arus Fundamental dan Harmonisa

| Jenis Beban | V _{fund} | V _{THD} | I _{fund} | I _{THD} |
|-------------------------------|-------------------|------------------|-------------------|------------------|
| Lampu Hemat Energi | 223,2 | 223,3 V 2,5 % | 0,6 | 0,66 A 68,4 % |
| <i>Personal Computer</i> (PC) | 226,2 | 226,3 V 2,4 % | 0,24 | 0,29 A 67,6% |
| <i>Air Conditioner</i> (AC) | 216,7 | 217,5 V 2% | 8,76 | 8,87 A 16,9 % |



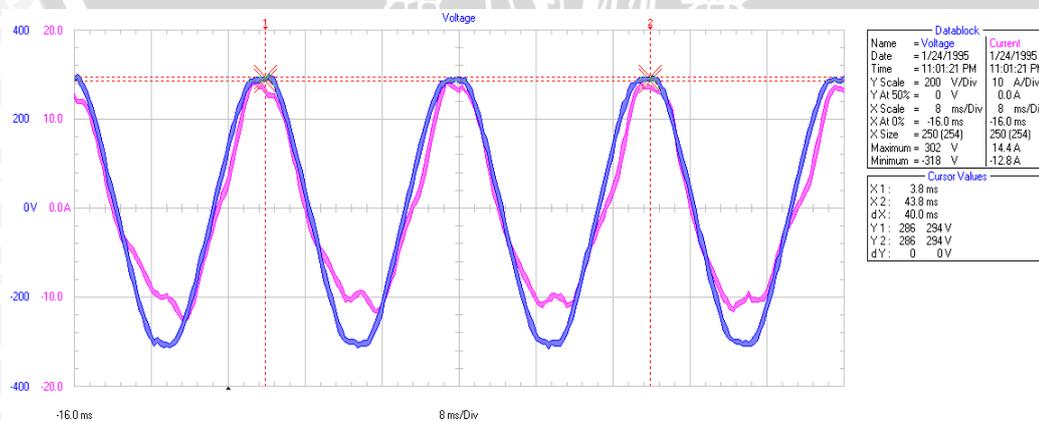
Gambar 4. 14 Gelombang Hasil Pengujian Beban Lampu Hemat Energi

Sumber : Hasil Pengujian



Gambar 4. 15 Gelombang Hasil Pengujian Beban Personal Computer(PC)

Sumber : Hasil Pengujian



Gambar 4. 16 Gelombang Hasil Pengujian Beban Air Conditioner (AC)

Sumber : Hasil Pengujian

Warna biru dan merah muda pada Gambar 4.14, 4.15 dan 4.16 merupakan gelombang arus dan gelombang tegangan hasil tampilan alat ukur fluke 43 B. hasil tampilan yang berupa gelombang ini nantinya akan dilakukan segmentasi yang nanti akan dijelaskan pada subbab nalisis selanjutnya.

1.5.4. Analisis

Untuk lebih mempermudah analisis maka analisis terhadap masing-masing beban dikelompokkan berdasarkan jenisnya yaitu analisis beban linier dan analisis beban nonlinier. Dari hasil pengujian di laboratorium, dapat dilakukan analisis sebagai berikut:

1.5.4.1. Analisis Harmonisa Arus Beban Nonlinier

Dari hasil percobaan yang dilakukan di laboratorium dapat dilakukan segmentasi pada masing-masing gelombang yang ditunjukkan pada lampiran, dalam rentang 1 periode pada frekuensi 50 Hz yaitu sebesar $T_0 = 20$ ms didapatkan titik di tiap satu gelombangnya sebanyak 64 sesegmentasi maka lebar segmen adalah dalam 1 periode gelombang adalah sebesar 0.3125 ms. Selanjutnya dilakukan perhitungan analisis gelombang dengan prosedur numerik dilakukan menggunakan persamaan (2-16) sampai (2-21). Bentuk gelombang didapatkan berdasarkan pengukuran pada pengujian yang ditunjukkan pada Gambar 4.14 sampai dengan 4.16. Perhitungan dilakukan dengan menggunakan program berbasis *software* MATLAB 7.5(R2007B), listing program ditunjukkan pada lampiran.

Perhitungan koefisien arus fundamental beban nonlinier lampu hemat energi adalah

$$h=1$$

$$k= 64$$

$$i= 1$$

$$fi= -0,5$$

maka,

$$a_h = \frac{2}{k} \sum_{i=1}^k f_i \cos\left(n \frac{i2\pi}{k}\right)$$

$$a_1 = \frac{2}{64} \sum_{i=1}^k -0,5 \cos\left(1 \frac{1,2\pi}{64}\right) = -0,0155$$

$$b_h = \frac{2}{k} \sum_{i=1}^k f_i \sin\left(n \frac{i2\pi}{k}\right)$$

$$b_1 = \frac{2}{64} \sum_{i=1}^k -0,5 \sin\left(1 \frac{1,2\pi}{64}\right) = -0,0015$$

Hasil perhitungan koefisien arus fundamental untuk data yang lainnya ditunjukkan pada Tabel 4.5

Tabel 4. 6 Hasil Perhitungan koefisien arus fundamental lampu hemat energi

| i | fi | ai | bi | i | fi | ai | bi |
|----|------|---------|-----------|----|------|---------|---------|
| 1 | -0,5 | -0,0155 | -0,001531 | 33 | -0,1 | 0,00311 | 0,0003 |
| 2 | -0,1 | -0,0031 | -0,000609 | 34 | -0,3 | 0,0092 | 0,00181 |
| 3 | -0,3 | -0,009 | -0,00272 | 35 | 0,3 | -0,009 | -0,0027 |
| 4 | -0,3 | -0,0087 | -0,003586 | 36 | -0,3 | 0,00867 | 0,00357 |
| 5 | -0,1 | -0,0028 | -0,001472 | 37 | 0 | 0 | 0 |
| 6 | -0,3 | -0,0078 | -0,005206 | 38 | 0 | 0 | 0 |
| 7 | -0,1 | -0,0024 | -0,001982 | 39 | -0,1 | 0,00242 | 0,00198 |
| 8 | -0,3 | -0,0066 | -0,006626 | 40 | -0,1 | 0,00221 | 0,00221 |
| 9 | -0,1 | -0,002 | -0,002415 | 41 | -0,3 | 0,00596 | 0,00723 |
| 10 | -0,1 | -0,0017 | -0,002597 | 42 | -0,3 | 0,00522 | 0,00778 |
| 11 | -0,1 | -0,0015 | -0,002755 | 43 | -0,3 | 0,00444 | 0,00826 |
| 12 | 0 | 0 | 0 | 44 | -0,1 | 0,0012 | 0,00288 |
| 13 | -0,1 | -0,0009 | -0,00299 | 45 | -0,1 | 0,00091 | 0,00299 |
| 14 | -0,1 | -0,0006 | -0,003065 | 46 | 0 | 0 | 0 |
| 15 | -0,1 | -0,0003 | -0,00311 | 47 | -0,3 | 0,00094 | 0,00933 |
| 16 | -0,1 | -2E-06 | -0,003125 | 48 | -0,5 | 3,7E-05 | 0,01562 |
| 17 | -0,1 | 0,0003 | -0,00311 | 49 | -0,5 | -0,0015 | 0,01555 |
| 18 | -0,1 | 0,00061 | -0,003065 | 50 | -0,4 | -0,0024 | 0,01227 |
| 19 | 0,7 | -0,0063 | 0,0209391 | 51 | -2,3 | -0,0207 | 0,06883 |
| 20 | 2,1 | -0,0251 | 0,0606546 | 52 | -2,3 | -0,0273 | 0,06647 |
| 21 | 2,3 | -0,0338 | 0,0634235 | 53 | -2,3 | -0,0337 | 0,06348 |
| 22 | 1,7 | -0,0295 | 0,0442041 | 54 | -2,3 | -0,0398 | 0,05987 |
| 23 | 0,5 | -0,0099 | 0,0120896 | 55 | -2,1 | -0,0415 | 0,05084 |
| 24 | 0,9 | -0,0199 | 0,0199111 | 56 | -0,9 | -0,0198 | 0,01994 |
| 25 | 0,5 | -0,0121 | 0,0099274 | 57 | -0,9 | -0,0217 | 0,0179 |
| 26 | 0,5 | -0,013 | 0,0086976 | 58 | -0,7 | -0,0182 | 0,01221 |

| | | | | | | | |
|----------|------|---------|-----------|----|------|----------------|---------------|
| 27 | 0,3 | -0,0083 | 0,0044305 | 59 | -0,7 | -0,0193 | 0,01037 |
| 28 | 0,5 | -0,0144 | 0,0059995 | 60 | -0,5 | -0,0144 | 0,00602 |
| 29 | 0 | 0 | 0 | 61 | -0,7 | -0,0209 | 0,00641 |
| 30 | 0 | 0 | 0 | 62 | -0,7 | -0,0214 | 0,00433 |
| 31 | -0,1 | 0,00311 | -0,000311 | 63 | -0,5 | -0,0155 | 0,00158 |
| 32 | -0,3 | 0,00937 | -1,49E-05 | 64 | -0,5 | -0,0156 | 5E-05 |
| Σ | | | | | | -0,5201 | 0,6774 |

Sumber : Hasil Perhitungan

Perhitungan amplitudo dari komponen arus fundamental beban nonlinier lampu hemat energi berdasarkan persamaan 2-28 diperoleh:

$$A = \sqrt{a_h^2 + b_h^2}$$

$$A_1 = \sqrt{-0,5201^2 + -0,6774^2} = 0,6039$$

Berdasarkan persamaan 2-27 sudut fasa diperoleh:

$$\varphi_h = \tan^{-1} \left(\frac{b_h}{a_h} \right)$$

$$\varphi_1 = \tan^{-1} \left(\frac{0,6774}{-0,5201} \right) = -0,916$$

Tabel 4. 7 Hasil Perhitungan Analisis Gelombang Arus

| Beban | Orde | a_h (volt) | b_h (volt) | A (volt) | Φ |
|-----------------------|------|--------------|--------------|----------|---------|
| Lampu Hemat Energi | 1 | -0,5201 | 0,6774 | 0,6039 | -0,916 |
| | 2 | 0,0094 | 0,0653 | 0,0466 | 1,4277 |
| | 3 | 0,5154 | 0,0767 | 0,3684 | 0,1478 |
| | 4 | -0,0443 | -0,0455 | 0,0449 | 0,7982 |
| | 5 | -0,1923 | -0,308 | 0,2567 | 1,0127 |
| | 6 | -0,052 | 0,0535 | 0,0527 | -0,8002 |
| | 7 | -0,0291 | 0,2862 | 0,2034 | -1,4694 |
| | 8 | -0,0578 | -0,0073 | 0,0412 | 0,1261 |
| Personal Computer(PC) | 1 | 0,0192 | -0,4314 | 0,3054 | -1,5263 |
| | 2 | -0,0249 | -0,0364 | 0,0312 | 0,9715 |
| | 3 | -0,1800 | 0,3725 | 0,2925 | -1,1207 |
| | 4 | 0,0493 | -0,0300 | 0,0408 | -0,5458 |
| | 5 | 0,2270 | -0,2088 | 0,2181 | -0,7437 |
| | 6 | -0,0456 | 0,0531 | 0,0495 | -0,8617 |

| | | | | | |
|-------------------------|---|---------|----------|--------|---------|
| | 7 | -0,2262 | 0,0624 | 0,1659 | -0,2691 |
| | 8 | 0,0171 | -0,0745 | 0,0540 | -1,3453 |
| Air Conditioner (AC) | 1 | 3,0700 | -11,8852 | 8,6799 | -1,3180 |
| | 2 | -1,7766 | -0,1773 | 1,2625 | 0,0994 |
| | 3 | -0,2869 | -0,0789 | 0,2104 | 0,2683 |
| | 4 | 0,1577 | -0,0291 | 0,1134 | -0,1824 |
| | 5 | -0,8065 | 0,0218 | 0,5705 | -0,0270 |
| | 6 | 0,2577 | 0,0498 | 0,1856 | 0,1909 |
| | 7 | 0,1940 | 0,1986 | 0,1963 | 0,7970 |
| | 8 | -0,1022 | 0,0718 | 0,0883 | -0,6124 |

Sumber: Hasil Perhitungan

Dari Tabel 4.7, bentuk gelombang diuraikan menjadi jumlah dari beberapa komponen fundamental, harmonisa orde genap dan harmonisa orde ganjil dengan amplitude, sudut fasa dan frekuensi yang berlainan dalam kawasan waktu. Komponen fundamental dan harmonisa pembentuk gelombang didapatkan dengan cara menghitung koefisien fundamental dan koefisien tiap harmonisa serta sudut fasa dari masing-masing gelombang sehingga diperoleh persamaan dari bentuk gelombang tersebut.

Setelah melakukan prosedur pendekatan numerik yang telah dilakukan sebelumnya maka didapatkan persamaan fungsi gelombang arus sebagai berikut:

Gelombang Harmonisa Arus Beban Nonlinier Lampu Hemat Energi :

$$i(t) = 0,6039 \cos(1\omega_0t + 0,916) + 0,0466 \cos(2\omega_0t - 1,4277) + 0,3684 \cos(3\omega_0t - 0,1478) + 0,0449 \cos(4\omega_0t - 0,7982) + 0,2567 \cos(5\omega_0t - 1,0127) + 0,0527 \cos(6\omega_0t + 0,8002) + 0,2034 \cos(7\omega_0t + 1,4694) + 0,0412 \cos(8\omega_0t - 0,1261) + 0,6039 \sin(1\omega_0t + 0,916) + 0,0466 \sin(2\omega_0t - 1,4277) + 0,3684 \sin(3\omega_0t - 0,1478) + 0,0449 \sin(4\omega_0t - 0,7982) + 0,2567 \sin(5\omega_0t - 1,0127) + 0,0527 \sin(6\omega_0t + 0,8002) + 0,2034 \sin(7\omega_0t + 1,4694) + 0,0412 \sin(8\omega_0t - 0,1261)$$

Gelombang Harmonisa Arus Beban Nonlinier *Personal Computer*(PC) :

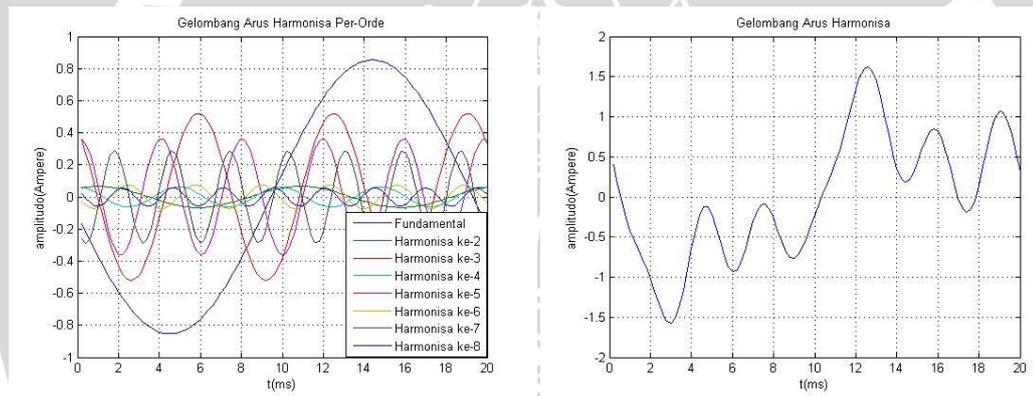
$$i(t) = 0,3054 \cos(1\omega_0t + 1,5263) + 0,0312 \cos(2\omega_0t - 0,9715) + 0,2925 \cos(3\omega_0t + 1,1207) + 0,0408 \cos(4\omega_0t + 0,5458) + 0,2181 \cos(5\omega_0t + 0,7437) + 0,0495 \cos(6\omega_0t + 0,8617) + 0,1659 \cos(7\omega_0t + 0,2691) + 0,0540 \cos(8\omega_0t + 1,3453) + 0,3054 \sin(1\omega_0t + 1,5263) + 0,0312 \sin(2\omega_0t - 0,9715) + 0,2925 \sin(3\omega_0t + 1,1207) + 0,0408 \sin(4\omega_0t + 0,5458) + 0,2181 \sin(5\omega_0t + 0,7437) + 0,0495 \sin(6\omega_0t + 0,8617) + 0,1659 \sin(7\omega_0t + 0,2691) + 0,0540 \sin(8\omega_0t + 1,3453)$$

$$\sin(6\omega_0t + 0,8617) + 0,1659 \sin(7\omega_0t + 0,2691) + 0,0540 \sin(8\omega_0t + 1,3453)$$

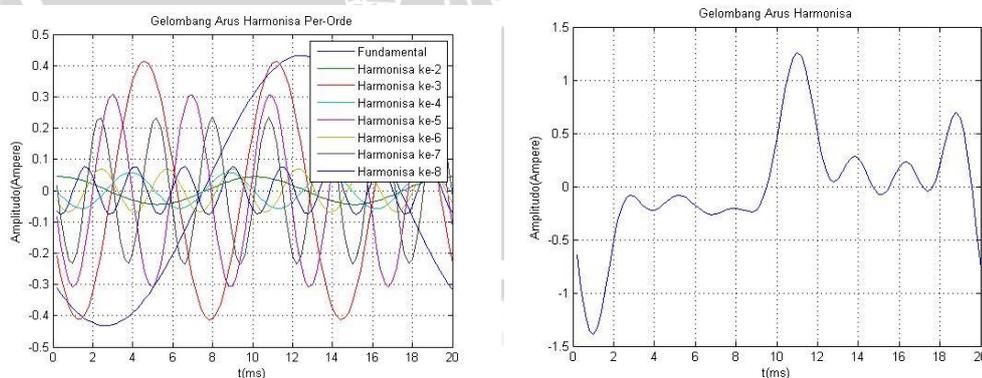
Gelombang Harmonisa Arus Beban Nonlinier Air Conditioner (AC) :

$$i(t)= 8,6799 \cos(1\omega_0t + 1,3180) + 1,2625 \cos(2\omega_0t - 0,0994) + 0,2104 \cos(3\omega_0t - 0,2683) + 0,1134 \cos(4\omega_0t + 0,1824) + 0,5705 \cos(5\omega_0t + 0,0270) + 0,1856 \cos(6\omega_0t - 0,1909) + 0,1963 \cos(7\omega_0t - 0,7970) + 0,0883 \cos(8\omega_0t + 0,6124) + 8,6799 \cos(1\omega_0t + 1,3180) + 1,2625 \cos(2\omega_0t - 0,0994) + 0,2104 \cos(3\omega_0t - 0,2683) + 0,1134 \cos(4\omega_0t + 0,1824) + 0,5705 \cos(5\omega_0t + 0,0270) + 0,1856 \cos(6\omega_0t - 0,1909) + 0,1963 \cos(7\omega_0t - 0,7970) + 0,0883 \cos(8\omega_0t + 0,6124)$$

berdasarkan persamaan fungsi diatas, bentuk gelombang arus yang diakibatkan oleh masing-masing jenis beban ditampilkan pada Gambar 4.17 sampai dengan gambar 4.19.

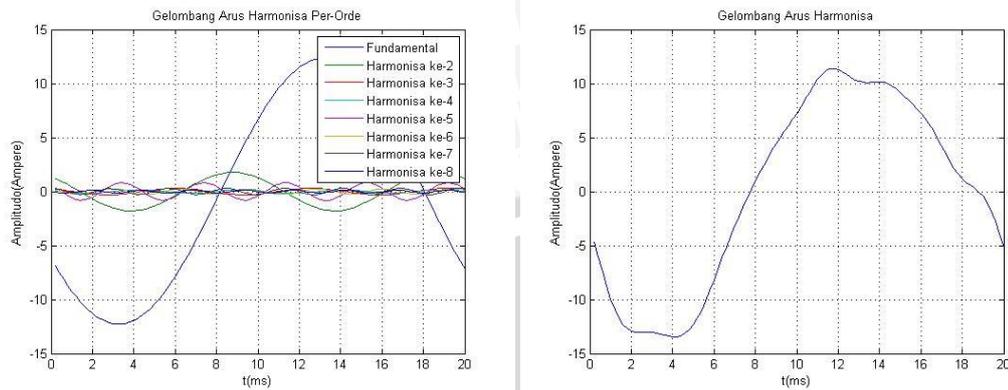


Gambar 4. 17 Gambar Bentuk Gelombang Harmonisa Arus per-orde dan Fundamental Terdistorsi Akibat Beban Nonlinier Lampu Hemat Energi



Gambar 4. 18 Gambar Bentuk Gelombang Harmonisa Arus per-orde dan Fundamental Terdistorsi Akibat Beban Nonlinier Personal Computer(PC)





Gambar 4. 19 Gambar Bentuk Gelombang Harmonisa Arus per-orde dan Fundamental Terdistorsi Akibat Beban Nonlinier *Air Conditioner* (AC)

Gambar 4.17 sampai dengan gambar 4.19 memperlihatkan bentuk gelombang fundamental, harmonisa arus per orde dan gelombang arus fundamental yang terdistorsi. Gelombang harmonisa arus per orde yang ditunjukkan adalah harmonisa orde 2, 3, 4, 5, 6, 7, dan 8. Jika ditinjau dari bentuk gelombang terlihat bahwa dengan jenis beban yang merupakan jenis beban nonlinier terlihat menyerupai gelombang sinusoidal tetapi terdapat gerigi-gerigi pada gelombang seperti yang ditunjukkan pada gambar 4.19. Hal tersebut diakibatkan oleh adanya pengaruh harmonisa arus dengan nilai amplitudo yang sangat kecil sehingga terjadi perbedaan yang cukup besar antara gelombang fundamental dan gelombang harmonisanya. Sedangkan beban nonlinier lampu hemat energi dan *Personal Computer*(PC) bentuk gelombang arus yang terdistorsi tidak menyerupai bentuk gelombang sinusoidal seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.17 dan 4.18. hal tersebut diakibatkan oleh adanya pengaruh harmonisa arus dengan nilai amplitudo yang cukup besar.

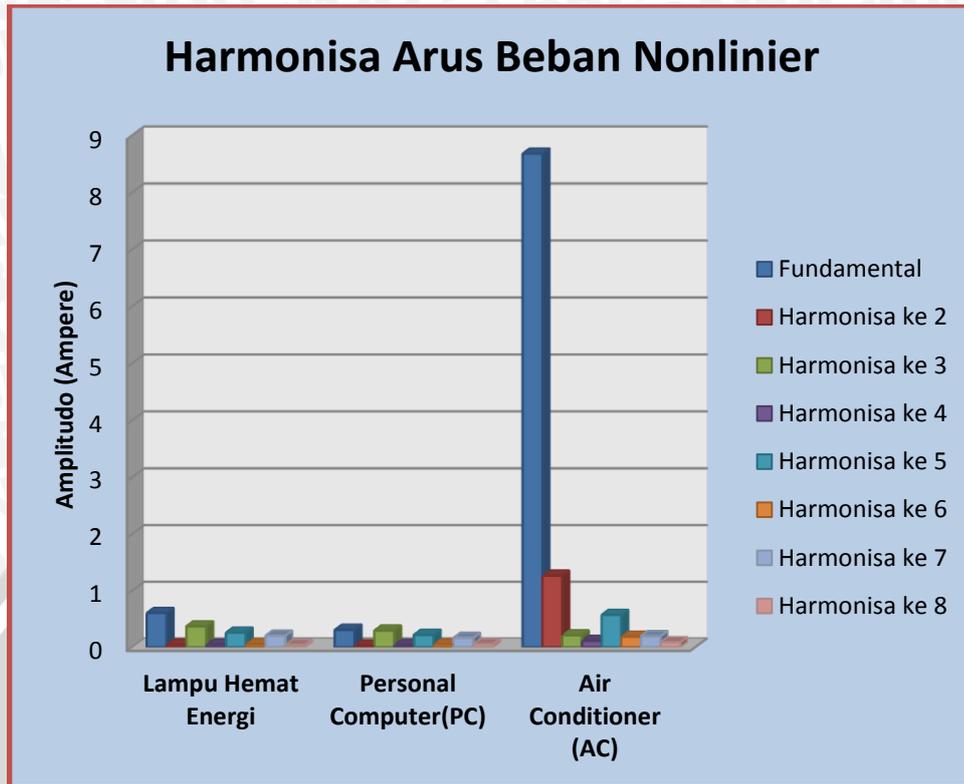
Distorsi gelombang harmonisa arus dipengaruhi oleh jenis beban yang digunakan, dimana beban-beban rumah tangga yang merupakan beban nonlinier memberikan kontribusi harmonisa yang cukup besar pada jaringan listrik. Dari hasil percobaan yang dilakukan di Laboratorium Dasar Elektrik dan Pengukuran, seluruh jenis beban nonlinier menimbulkan harmonisa yang mengakibatkan gelombang fundamental arus menjadi terdistorsi. Adapun perbandingan besar amplitudo harmonisa arus ditunjukkan pada Tabel 4.7.

Tabel 4. 8 Hasil Perhitungan Nilai Amplitudo Harmonisa Arus

| Beban Nonlinier | Lampu Hemat Energi (Ampere) | Personal Computer (Ampere) | Air Conditioner (Ampere) |
|-----------------|-----------------------------|----------------------------|--------------------------|
| Fundamental | 0,6039 | 0,3054 | 8,6799 |
| Harmonisa ke 2 | 0,0466 | 0,0312 | 1,2625 |
| Harmonisa ke 3 | 0,3684 | 0,2925 | 0,2104 |
| Harmonisa ke 4 | 0,0449 | 0,0408 | 0,1134 |
| Harmonisa ke 5 | 0,2567 | 0,2181 | 0,5705 |
| Harmonisa ke 6 | 0,0527 | 0,0495 | 0,1856 |
| Harmonisa ke 7 | 0,2034 | 0,1659 | 0,1963 |
| Harmonisa ke 8 | 0,0412 | 0,054 | 0,0883 |

Dari Tabel 4.8 terlihat bahwa yang memiliki nilai amplitude gelombang harmonisa arus terbesar dari gelombang fundamentalnya adalah jenis beban nonlinier *Personal Computer(PC)* dan yang terkecil adalah jenis beban nonlinier *Air Conditioner(AC)*. Pada Gambar 4.20 terlihat bahwa nilai arus fundamental pada beban nonlinier *Air Conditioner(AC)* sangatlah besar, hal tersebut dikarenakan daya beban yang terpakai sebesar 2PK, sehingga dibandingkan daya beban lampu hemat energi dan *Personal Computer(PC)* yang kecil membuat terlihat perbedaan yang cukup besar.





Gambar 4. 20 Grafik Perbandingan Harmonisa Arus Beban Nonlinier

Dari hasil pengujian yang telah dilakukan, terbukti bahwa jenis beban nonlinier memberikan pengaruh yang cukup besar terhadap harmonisa arus. Hal ini terlihat pada gelombang harmonisa arus orde genap dan orde ganjil yang muncul. Nilai amplitude gelombang harmonisa arus ganjil lebih besar dibandingkan dengan nilai amplitude gelombang harmonisa arus orde genap. Nilai amplitude gelombang arus orde ganjil pada jenis beban nonlinier mendominasi dibandingkan dengan harmonisa orde genap terkecuali pada beban *Air Conditioner*(AC) dimana harmonisa orde ke 2 memiliki nilai yang cukup besar. Jika nilai amplitude gelombang harmonisa arus semakin mendekati nilai amplitude gelombang fundamentalnya maka distorsi gelombang pada gelombang fundamental akan semakin besar pula.

1.5.4.2. Analisis Harmonisa Tegangan Beban Nonlinier

Perhitungan koefisien tegangan fundamental beban nonlinier lampu hemat energi adalah

$$h=1$$

$$k= 64$$

$$i=1$$

$$f_i=52$$

maka,

$$a_n = \frac{2}{k} \sum_{i=1}^k f_i \cos\left(n \frac{i2\pi}{k}\right)$$

$$a_1 = \frac{2}{64} \sum_{i=1}^{64} 52 \cos\left(1 \frac{i2\pi}{64}\right) = 1,61718$$

$$b_n = \frac{2}{k} \sum_{i=1}^k f_i \sin\left(n \frac{i2\pi}{k}\right)$$

$$b_1 = \frac{2}{64} \sum_{i=1}^{64} 52 \sin\left(1 \frac{i2\pi}{64}\right) = 0,1592$$

Hasil perhitungan koefisien tegangan fundamental untuk data yang lainnya ditunjukkan pada Tabel 4.9

Tabel 4. 9 Hasil Perhitungan Koefisien Tegangan Fundamental Beban Nonlinier Lampu Hemat Energi

| i | f_i | a_i | b_i | i | f_i | a_i | b_i |
|-----------|----------------------|----------------------|----------------------|-----------|----------------------|----------------------|----------------------|
| 1 | 52 | 1,61718 | 0,1592 | 33 | -8 | 0,24884 | 0,024096 |
| 2 | 24 | 0,7356 | 0,14624 | 34 | 32 | -0,9811 | -0,19343 |
| 3 | -4 | -0,1196 | -0,0363 | 35 | 60 | -1,7952 | -0,54116 |
| 4 | -40 | -1,1549 | -0,4781 | 36 | 91 | -2,6292 | -1,08355 |
| 5 | -72 | -1,9846 | -1,0601 | 37 | 119 | -3,2829 | -1,74696 |
| 6 | -99 | -2,5729 | -1,718 | 38 | 151 | -3,9284 | -2,61417 |
| 7 | -131 | -3,1654 | -2,5959 | 39 | 179 | -4,3309 | -3,54024 |
| 8 | -163 | -3,6033 | -3,6004 | 40 | 203 | -4,4946 | -4,47677 |
| 9 | -187 | -3,7093 | -4,5156 | 41 | 223 | -4,4319 | -5,37788 |
| 10 | -215 | -3,7355 | -5,5846 | 42 | 243 | -4,2321 | -6,30514 |
| 11 | -231 | -3,4064 | -6,3645 | 43 | 266 | -3,9342 | -7,32257 |
| 12 | -250 | -2,994 | -7,216 | 44 | 282 | -3,3902 | -8,13428 |
| 13 | -270 | -2,4545 | -8,0726 | 45 | 290 | -2,6501 | -8,66636 |
| 14 | -290 | -1,7742 | -8,8871 | 46 | 294 | -1,813 | -9,00684 |
| 15 | -294 | -0,9074 | -9,1426 | 47 | 302 | -0,947 | -9,38987 |
| 16 | -298 | -0,0074 | -9,3125 | 48 | 298 | -0,0222 | -9,31247 |
| 17 | -298 | 0,90494 | -9,2684 | 49 | 294 | 0,87823 | -9,14543 |
| 18 | -306 | 1,85715 | -9,3804 | 50 | 298 | 1,79404 | -9,13806 |

| | | | | | | | |
|----------|------|---------|---------|----|-----|----------------|-----------------|
| 19 | -302 | 2,73102 | -9,0337 | 51 | 298 | 2,68065 | -8,91834 |
| 20 | -302 | 3,60289 | -8,7227 | 52 | 302 | 3,589 | -8,72843 |
| 21 | -306 | 4,49891 | -8,4381 | 53 | 294 | 4,30957 | -8,11405 |
| 22 | -290 | 5,0266 | -7,5407 | 54 | 286 | 4,94542 | -7,44458 |
| 23 | -278 | 5,5036 | -6,7218 | 55 | 278 | 5,49289 | -6,73059 |
| 24 | -262 | 5,78252 | -5,7963 | 56 | 254 | 5,597 | -5,62828 |
| 25 | -231 | 5,57447 | -4,5865 | 57 | 235 | 5,66356 | -4,67491 |
| 26 | -207 | 5,37391 | -3,6008 | 58 | 211 | 5,47191 | -3,6791 |
| 27 | -179 | 4,9297 | -2,6435 | 59 | 175 | 4,81542 | -2,5921 |
| 28 | -151 | 4,35704 | -1,8119 | 60 | 147 | 4,2388 | -1,77062 |
| 29 | -119 | 3,55706 | -1,0846 | 61 | 119 | 3,55533 | -1,0903 |
| 30 | -91 | 2,78828 | -0,559 | 62 | 95 | 2,90991 | -0,58816 |
| 31 | -64 | 1,99006 | -0,1991 | 63 | 64 | 1,98974 | -0,20227 |
| 32 | -36 | 1,125 | -0,0018 | 64 | 32 | 0,99999 | -0,00319 |
| Σ | | | | | | 46,6837 | -303,804 |

Sumber: Hasil Perhitungan

Perhitungan amplitudo dari komponen tegangan fundamental beban nonlinier lampu hemat energi berdasarkan persamaan 2-28 diperoleh:

$$A = \sqrt{a_h^2 + b_h^2}$$

$$A_1 = \sqrt{46,6837^2 + -303,804^2} = 217,344$$

Berdasarkan persamaan 2-27 sudut fasa diperoleh:

$$\varphi_h = \tan^{-1} \left(\frac{b_h}{a_h} \right)$$

$$\varphi_1 = \tan^{-1} \left(\frac{-303,8043}{46,6837} \right) = -1,4183$$

Tabel 4. 10 Hasil Perhitungan Analisis Gelombang Tegangan

| Beban | Orde | a_h (volt) | b_h (volt) | A (volt) | Φ |
|--------------------|------|--------------|--------------|----------|---------|
| Lampu Hemat Energi | 1 | 46,6837 | -303,8043 | 217,344 | -1,4183 |
| | 2 | 5,1127 | 13,4294 | 10,1609 | 1,207 |
| | 3 | -2,5827 | 2,5913 | 2,587 | -0,7871 |
| | 4 | -2,7816 | 3,586 | 3,2091 | -0,9111 |
| | 5 | -2,8954 | 9,0352 | 6,7089 | -1,2607 |
| | 6 | -0,7224 | 3,2886 | 2,3808 | -1,3546 |

| | | | | | |
|------------------------------|---|---------|-----------|----------|---------|
| | 7 | 2,3769 | 2,0499 | 2,2194 | 0,7117 |
| | 8 | -1,6831 | 1,9326 | 1,8121 | -0,8543 |
| <i>Personal Computer(PC)</i> | 1 | 50,7110 | -280,5871 | 201,6193 | -1,3920 |
| | 2 | 4,8547 | 11,5792 | 8,8783 | 1,1738 |
| | 3 | -1,3695 | 3,8797 | 2,9092 | -1,2315 |
| | 4 | -2,4652 | 4,1520 | 3,4144 | -1,0350 |
| | 5 | -2,1149 | 9,5483 | 6,9153 | -1,3528 |
| | 6 | -0,7201 | 3,0186 | 2,1944 | -1,3366 |
| | 7 | 2,1542 | 3,6995 | 3,0271 | 1,0435 |
| | 8 | -1,4401 | 2,7286 | 2,1816 | -1,0852 |
| <i>Air Conditioner (AC)</i> | 1 | 47,9217 | -297,9884 | 213,4169 | -1,4113 |
| | 2 | 7,1217 | 12,5015 | 10,1736 | 1,0530 |
| | 3 | -1,9276 | 4,0508 | 3,1721 | -1,1267 |
| | 4 | -3,4690 | 3,5813 | 3,5256 | -0,8013 |
| | 5 | -3,8468 | 7,4672 | 5,9396 | -1,0951 |
| | 6 | -0,3036 | 1,8959 | 1,3577 | -1,4120 |
| | 7 | 1,2769 | 0,8064 | 1,0679 | 0,5633 |
| | 8 | -1,0262 | 1,9535 | 1,5603 | -1,0871 |

Sumber: Hasil Perhitungan

Dari Tabel 4.10, bentuk gelombang diuraikan menjadi jumlah dari beberapa komponen fundamental, harmonisa orde genap dan harmonisa orde ganjil dengan amplitude, sudut fasa dan frekuensi yang berlainan dalam kawasan waktu. Komponen fundamental dan harmonisa pembentuk gelombang didapatkan dengan cara menghitung koefisien fundamental dan koefisien tiap harmonisa serta sudut fasa dari masing-masing gelombang sehingga diperoleh persamaan dari bentuk gelombang tersebut.

Setelah melakukan prosedur pendekatan numerik yang telah dilakukan sebelumnya maka didapatkan persamaan fungsi gelombang tegangan sebagai berikut:

Gelombang Harmonisa Tegangan Beban Nonlinier Lampu Hemat Energi :

$$v(t)= 217,344 \cos(1\omega_0t + 1,4183) + 10,1609 \cos(2\omega_0t - 1,207) + 2,587 \cos(3\omega_0t + 0,7871) + 3,2091 \cos(4\omega_0t + 0,9111) + 6,7089 \cos(5\omega_0t + 1,2607) + 2,3808 \cos(6\omega_0t + 1,3546) + 2,2194 \cos(7\omega_0t - 0,7117) + 1,8121 \cos(8\omega_0t + 0,8543) + 217,344 \sin(1\omega_0t + 1,4183) + 10,1609 \sin(2\omega_0t - 1,207) + 2,587 \sin(3\omega_0t + 0,7871) + 3,2091 \sin(4\omega_0t + 0,9111) + 6,7089 \sin(5\omega_0t + 1,2607) + 2,3808 \sin(6\omega_0t + 1,3546) + 2,2194 \sin(7\omega_0t - 0,7117) + 1,8121 \sin(8\omega_0t + 0,8543)$$

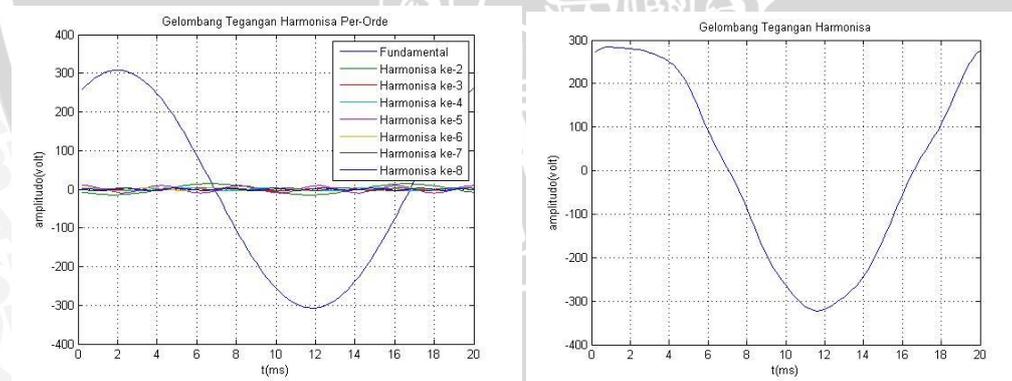
Gelombang Harmonisa Tegangan Beban Nonlinier *Personal Computer(PC)* :

$$v(t)= 201,6193 \cos(1\omega_0t + 1,3920) + 8,8783 \cos(2\omega_0t - 1,1738) + 2,9092 \cos(3\omega_0t + 1,2315) + 3,4144 \cos(4\omega_0t + 1,0350) + 6,9153 \cos(5\omega_0t + 1,3528) + 2,1944 \cos(6\omega_0t + 1,3366) + 3,0271 \cos(7\omega_0t - 1,0435) + 2,1816 \cos(8\omega_0t + 1,0852) + 201,6193 \sin(1\omega_0t + 1,3920) + 8,8783 \sin(2\omega_0t - 1,1738) + 2,9092 \sin(3\omega_0t + 1,2315) + 3,4144 \sin(4\omega_0t + 1,0350) + 6,9153 \sin(5\omega_0t + 1,3528) + 2,1944 \sin(6\omega_0t + 1,3366) + 3,0271 \sin(7\omega_0t - 1,0435) + 2,1816 \sin(8\omega_0t + 1,0852)$$

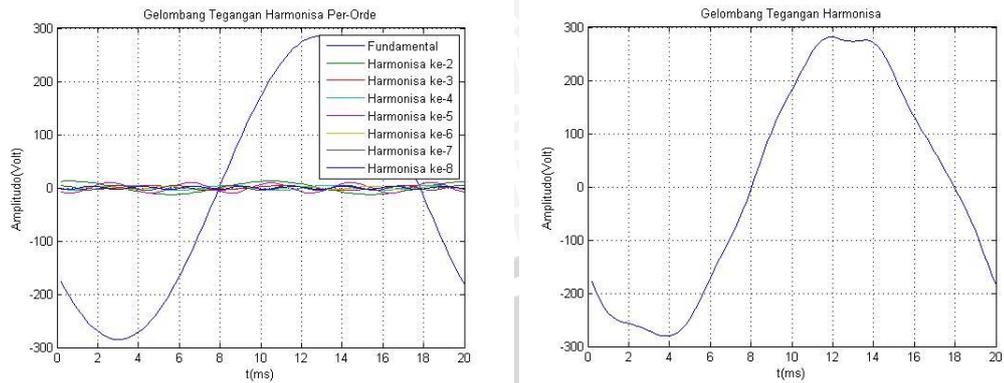
Gelombang Harmonisa Tegangan Beban Nonlinier *Air Conditioner (AC)* :

$$v(t)= 213,4169 \cos(1\omega_0t + 1,4113) + 10,1736 \cos(2\omega_0t - 1,0530) + 3,1721 \cos(3\omega_0t + 1,1267) + 3,5256 \cos(4\omega_0t - 0,8013) + 5,9396 \cos(5\omega_0t + 1,0951) + 1,3577 \cos(6\omega_0t + 1,4120) + 1,0679 \cos(7\omega_0t - 0,5633) + 1,5603 \cos(8\omega_0t + 1,0871) + 213,4169 \cos(1\omega_0t + 1,4113) + 10,1736 \cos(2\omega_0t - 1,0530) + 3,1721 \cos(3\omega_0t + 1,1267) + 3,5256 \cos(4\omega_0t - 0,8013) + 5,9396 \cos(5\omega_0t + 1,0951) + 1,3577 \cos(6\omega_0t + 1,4120) + 1,0679 \cos(7\omega_0t - 0,5633) + 1,5603 \cos(8\omega_0t + 1,0871)$$

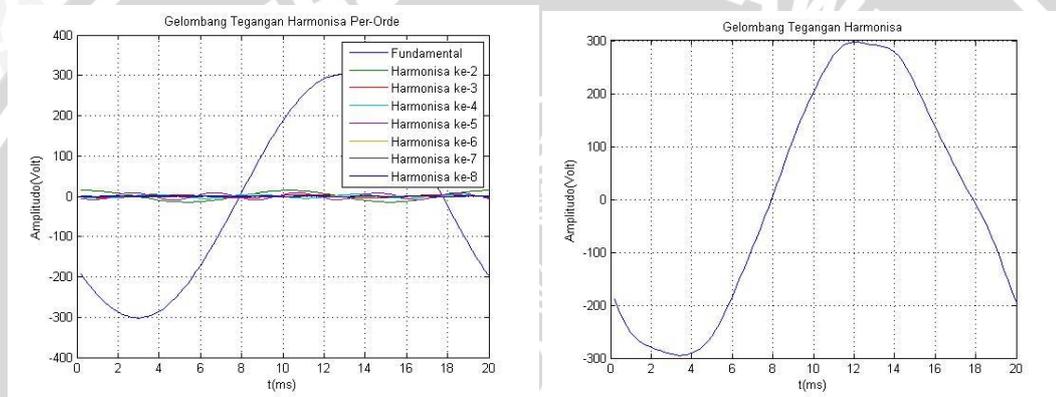
berdasarkan persamaan fungsi diatas, bentuk gelombang arus yang diakibatkan oleh masing-masing jenis beban ditampilkan pada gambar 4.21 sampai dengan Gambar 4.23



Gambar 4. 21 Gambar Bentuk Gelombang Harmonisa Tegangan arus per-orde Akibat Beban Nonlinier Lampu Hemat Energi



Gambar 4. 22 Gambar Bentuk Gelombang Fundamental Tegangan Terdistorsi Akibat Beban Nonlinier *Personal Computer(PC)*



Gambar 4. 23 Gambar Bentuk Gelombang Fundamental Tegangan Terdistorsi Akibat Beban Nonlinier *Air Conditioner (AC)*

Gambar 4.21 sampai dengan Gambar 4.23 memperlihatkan bentuk gelombang fundamental, harmonisa tegangan per orde dan gelombang tegangan fundamental yang terdistorsi. Gelombang harmonisa tegangan per orde yang ditunjukkan adalah harmonisa orde 2, 3, 4, 5, 6, 7, dan 8. Jika ditinjau dari bentuk gelombang terlihat bahwa dengan jenis beban yang merupakan jenis beban nonlinier terlihat menyerupai gelombang sinusoidal tetapi terdapat gerigi-gerigi pada gelombang, hal tersebut diakibatkan oleh adanya pengaruh harmonisa tegangan dengan nilai amplitudo yang sangat kecil sehingga terjadi perbedaan yang cukup besar antara gelombang fundamental dan gelombang harmonisanya.

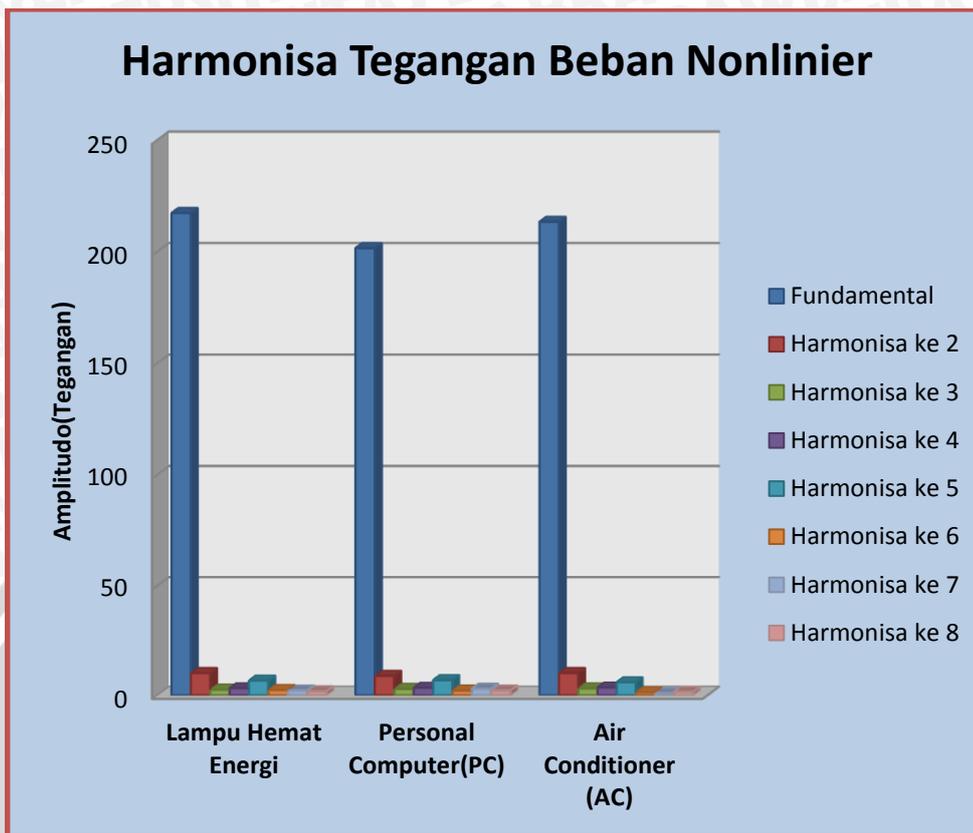
Dari hasil percobaan yang dilakukan di Laboratorium Dasar Elektrik dan Pengukuran, seluruh jenis beban nonlinier menimbulkan harmonisa yang

mengakibatkan gelombang fundamental tegangan menjadi terdistorsi. Adapun perbandingan besar amplitudo harmonisa tegangan ditunjukkan pada Tabel 4.11.

Tabel 4. 11 Hasil Perhitungan Nilai Amplitudo Harmonisa Tegangan

| Beban Nonlinier | Lampu Hemat Energi (volt) | Personal Computer (volt) | Air Conditioner (volt) |
|-----------------------|---------------------------|--------------------------|------------------------|
| Fundamental | 217,344 | 201,6193 | 213,4169 |
| Harmonisa ke 2 | 10,1609 | 8,8783 | 10,1736 |
| Harmonisa ke 3 | 2,5870 | 2,9092 | 3,1721 |
| Harmonisa ke 4 | 3,2091 | 3,4144 | 3,5256 |
| Harmonisa ke 5 | 6,7089 | 6,9153 | 5,9396 |
| Harmonisa ke 6 | 2,3808 | 2,1944 | 1,3577 |
| Harmonisa ke 7 | 2,2194 | 3,0271 | 1,0679 |
| Harmonisa ke 8 | 1,8121 | 2,1816 | 1,5603 |

Dibandingkan hasil perhitungan untuk nilai amplitude dari gelombang arus dengan gelombang tegangan beban nonlinier didapatkan nilai amplitude gelombang fundamental dan harmonisa tegangan yang lebih besar karena tegangan masukan beban merupakan skala 220 volt dari tegangan jala-jala PLN, sedangkan gelombang fundamental dan harmonisa arus mengikuti dari beban beban yang digunakan dan konsumsi daya yang terpakai pada beban tersebut. Seperti pada beban *Personal Computer(PC)* dan lampu hemat energi yang memiliki arus beban yang cukup kecil dibandingkan arus yang terukur pada beban *Air Conditioner (AC)*.



Gambar 4. 24 Grafik Perbandingan Harmonisa Tegangan Beban Nonlinier

Dari Gambar 4.24 terlihat sekali perbandingan besar harmonisa tegangan pada tiap beban nonlinier, nilai amplitudo gelombang harmonisa tegangan sangat kecil dibandingkan dengan nilai amplitudo gelombang asli fundamentalnya, sehingga pengaruh harmonisa tegangan sangatlah kecil. Jika nilai amplitudo gelombang harmonisa tegangan semakin mendekati nilai amplitudo gelombang fundamentalnya maka distorsi gelombang pada gelombang fundamental akan semakin besar pula.

1.5.4.3. Analisis Pengaruh Harmonisa terhadap hasil penunjukan kWh Meter Digital 1 Fasa

Dalam menganalisis pengaruh harmonisa dilakukan Analisis perhitungan daya aktif hasil pengukuran dan prosentase kesalahan *error*nya. Berdasarkan rumus persamaan 2.10 maka dapat dicari nilai arus harmonisa total dan tegangan harmonisa total pada setiap beban beban nonlinier (lampu hemat energi, *Personal Computer (PC)*, dan *Air Conditioner (AC)*). Berikut perhitungan secara teori:

- Pada beban Lampu Hemat Energi
 - Kenaikan Total Tegangan Harmonisa

$$THD_V = \frac{[\sum_{h=2}^N V_h^2]^{\frac{1}{2}}}{V_1} \times 100 \%$$

$$2,5 \% = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^N V_h^2}}{V_1} \times 100 \%$$

$$\sqrt{\sum_{h=2}^N V_h^2} = \frac{2,5 \%}{100 \%} \times 223,2 \text{ V}$$

$$\sum_{h=2}^N V_h^2 = \left[\frac{2,5 \%}{100 \%} \times 223,2 \right]^2$$

$$\sum_{h=2}^N V_h^2 = [5,58]^2$$

$$\sum_{h=2}^N V_h^2 = 31,1364 \text{ V}$$

- Kenaikan Total Arus Harmonisa

$$THD_I = \frac{[\sum_{h=2}^N I_h^2]^{\frac{1}{2}}}{I_1} \times 100 \%$$

$$68,4 \% = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^N I_h^2}}{I_1} \times 100 \%$$

$$\sqrt{\sum_{h=2}^N I_h^2} = \frac{68,4 \%}{100 \%} \times 0,6 \text{ A}$$

$$\sum_{h=2}^N I_h^2 = \left[\frac{68,4 \%}{100 \%} \times 0,6 \right]^2$$

$$\sum_{h=2}^N I_h^2 = [0,4104]^2$$

$$\sum_{h=2}^N I_h^2 = 0,1684 \text{ A}$$

- Pada *Personal Computer(PC)*
 - Kenaikan Total Tegangan Harmonisa

$$THD_V = \frac{[\sum_{h=2}^N V_h^2]^{\frac{1}{2}}}{V_1} \times 100 \%$$

$$2,4 \% = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^N V_h^2}}{V_1} \times 100 \%$$

$$\sqrt{\sum_{h=2}^N V_h^2} = \frac{2,4 \%}{100 \%} \times 226,2 \text{ V}$$

$$\sum_{h=2}^N V_h^2 = \left[\frac{2,4 \%}{100 \%} \times 226,2 \right]^2$$

$$\sum_{h=2}^N V_h^2 = [5,4288]^2$$

$$\sum_{h=2}^N V_h^2 = 29,4718 \text{ V}$$

- Kenaikan Total Arus Harmonisa

$$THD_I = \frac{[\sum_{h=2}^N I_h^2]^{\frac{1}{2}}}{I_1} \times 100 \%$$

$$77 \% = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^N I_h^2}}{I_1} \times 100 \%$$

$$\sqrt{\sum_{h=2}^N I_h^2} = \frac{77 \%}{100 \%} \times 0,24 \text{ A}$$

$$\sum_{h=2}^N I_h^2 = \left[\frac{77 \%}{100 \%} \times 0,24 \right]^2$$

$$\sum_{h=2}^N I_h^2 = [0,1622]^2$$

$$\sum_{h=2}^N I_h^2 = 0,0263 \text{ A}$$

- Pada beban *Air Conditioner* (AC)
 - Kenaikan Total Tegangan Harmonisa

$$THD_V = \frac{[\sum_{h=2}^N V_h^2]^{\frac{1}{2}}}{V_1} \times 100 \%$$

$$2 \% = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^N V_h^2}}{V_1} \times 100 \%$$

$$\sqrt{\sum_{h=2}^N V_h^2} = \frac{2 \%}{100 \%} \times 216,7 \text{ V}$$

$$\sum_{h=2}^N V_h^2 = \left[\frac{2 \%}{100 \%} \times 216,7 \right]^2$$

$$\sum_{h=2}^N V_h^2 = [4,3334]^2$$

$$\sum_{h=2}^N V_h^2 = 18,7835 \text{ V}$$

- Kenaikan Total Arus Harmonisa

$$THD_I = \frac{[\sum_{h=2}^N I_h^2]^{\frac{1}{2}}}{I_1} \times 100 \%$$

$$16,9 \% = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^N I_h^2}}{I_1} \times 100 \%$$

$$\sqrt{\sum_{h=2}^N I_h^2} = \frac{16,9 \%}{100 \%} \times 8,76 \text{ A}$$

$$\sum_{h=2}^N I_h^2 = \left[\frac{16,9 \%}{100 \%} \times 8,76 \right]^2$$

$$\sum_{h=2}^N I_h^2 = [1,48044]^2$$

$$\sum_{h=2}^N I_h^2 = 2,1917 \text{ A}$$

Dengan perhitungan diatas, hasil nilai arus dan tegangan harmonisa tiap beban nonlinier ditunjukkan dalam Tabel 4.12

Tabel 4. 12 Kenaikan Tegangan dan Arus Harmonisa Berdasarkan Perhitungan

| Beban Nonlinier | Tegangan Harmonisa | Arus Harmonisa |
|-----------------------|--------------------|----------------|
| Lampu Hemat Energi | 31,1364 V | 0,1684 A |
| Personal Computer(PC) | 29,4718 V | 0,0263 A |
| Air Conditioner (AC) | 18,7835 V | 2,1917 A |

Dari Tabel 4.12 diatas dapat dilihat bahwa nilai total arus harmonisa yang ditimbulkan pada beban lampu hemat energi dan *Personal Computer(PC)* sangat kecil, berbeda dengan tegangan. Hal ini dikarenakan nilai yang terukur untuk tegangan lebih besar sehingga dengan presentase harmonisa yang kecil dapat menimbulkan selisih nilai tegangan yang lebih besar meskipun nilai THD arus yang terukur lebih besar dari pada nilai THD tegangan pada beban nonlinier. Timbulnya harmonisa yang terjadi karena banyaknya beban-beban rumah tangga yang merupakan beban nonlinier sehingga memberikan kontribusi harmonisa yang cukup besar pada jaringan listrik.

Dari hasil data pengukuran, maka selanjutnya akan dihitung berdasarkan teori berupa besar daya aktif yang terpakai oleh beban, baik daya aktif fundamental maupun daya aktif harmonisa total. Berdasarkan persamaan 2-1, perhitungan daya aktif tiap beban nonlinier secara teori adalah sebagai berikut:

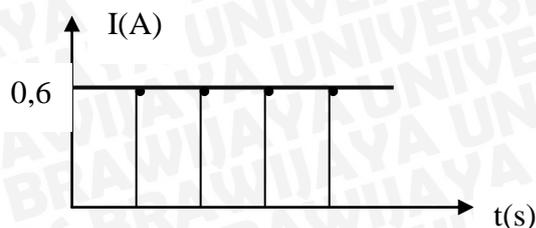
- Daya Fundamental

Daya fundamental (P fundamental) untuk beban nonlinier lampu hemat energi dengan hasil pengukuran,

$$V_1 \text{ (Tegangan masukan beban)} = 223,2 \text{ volt}$$

$$I_1 \text{ (Arus masukan beban)} = 0,6 \text{ ampere}$$

$$\cos \phi \text{ (Faktor Daya beban)} = 0,89$$



dapat dihitung dengan menggunakan persamaan 2-1 sebagai berikut:

$$\begin{aligned} P \text{ fundamental beban lampu hemat energi} &= V_1 \times I_1 \times \cos \varphi \\ &= 223,2 \times 0,6 \times 0,89 \\ &= 119,1888 \text{ W} = 0,1192 \text{ kW} \end{aligned}$$

Hasil Penunjukan daya aktif yang terukur pada kWh meter digital untuk beban lampu hemat energi adalah 0,12 kW

Dengan menggunakan persamaan 2-2 dapat dihitung

$$\begin{aligned} E \text{ fundamental beban lampu hemat energi} &= V_1 \times I_1 \times \cos \varphi \times t = P \times t \\ &= 0,1192 \times 8,15 \\ &= 0,97148 \text{ kWh} \end{aligned}$$

Hasil penunjukan energi pada kWh meter digital adalah 1 kWh

Efek pembebanan kWh meter digital = 1 - 0,97148 = 0,02852

Presentase kesalahan hasil penunjukan energi kWh meter digital terhadap energi yang diserap beban dihitung dengan menggunakan persamaan 2-14

Presentase kesalahan(%error) adalah sebagai berikut:

$$\begin{aligned} \% \text{ Kesalahan} &= \frac{\text{Energi yang diukur oleh meter} - \text{Energi sebenarnya}}{\text{Energi sebenarnya}} \times 100\% \\ &= \frac{1 - 0,9715}{0,9715} \times 100\% = \frac{0,0285}{0,9715} \times 100\% = 2,9336 \% \end{aligned}$$

Hasil perhitungan beban-beban nonlinier yang lain dapat dilihat pada Tabel 4.13.

- Daya Fundamental dan Harmonisa

Daya Fundamental dan Harmonisa yang didapatkan dari penjumlahan nilai tegangan dan arus dari hasil perhitungan dengan hasil pengukuran untuk beban nonlinier lampu hemat energi

$$V_1 \text{ (Tegangan masukan beban)} = 223,2 \text{ V} + 31,1364 \text{ V} = 254,3364 \text{ volt}$$

$$I_1 \text{ (Arus masukan beban)} = 0,6 \text{ A} + 0,1684 \text{ A} = 0,7684 \text{ ampere}$$

$$\cos \varphi \text{ (Faktor Daya beban)} = 1$$

dapat dihitung dengan menggunakan persamaan 2-1 sebagai berikut:

Daya Fundamental dan Harmonisa lampu hemat energi

$$\begin{aligned} &= V_1 \times I_1 \times \cos \varphi \\ &= 254,3364 \times 0,7684 \times 0,89 \end{aligned}$$

$$= 173,9345 \text{ W} = 0,1739 \text{ kW}$$

Dengan menggunakan persamaan 2-2 dapat dihitung

E Fundamental dan Harmonisa beban lampu hemat energi

$$= V_1 \times I_1 \times \cos \varphi \times t = P \times t$$

$$= 0,1739 \times 8,15$$

$$= 1,4173 \text{ kWh}$$

Hasil penunjukan energi pada kWh meter digital adalah 1 kWh

Efek pembebanan kWh meter digital = 1 – 1,4173 = 0,4173

Presentase kesalahan hasil penunjukan energi kWh meter digital terhadap energi yang diserap beban dihitung dengan menggunakan persamaan 2-14

Presentase kesalahan(%error) adalah sebagai berikut:

$$\% \text{ Kesalahan} = \frac{\text{Energi yang diukur oleh meter} - \text{Energi sebenarnya}}{\text{Energi sebenarnya}} \times 100\%$$

$$= \frac{1 - 1,4173}{1,4173} \times 100\% = \frac{-0,4173}{1,4173} \times 100\% = 29,44 \%$$

Dengan perhitungan diatas, hasil nilai daya aktif dan energi fundamental dan fundamental dengan harmonisa tiap beban nonlinier ditunjukkan dalam Tabel 4.13

Tabel 4. 13 Perbandingan daya aktif dan energi hasil pengukuran dan hasil perhitungan secara teori

| BEBAN | t (hour) | HASIL PENGUKURAN | | HASIL PERHITUNGAN | | | | |
|------------|----------|------------------|------------|-------------------|------------------|-------------|-------------------|--------|
| | | PkWh (kW) | EkWh (kWh) | Pfund (kW) | P fund+harm (kW) | Efund (kWh) | E fund+harm (kWh) | |
| Non linier | LHE | 8,15 | 0,12 | 1 | 0,1192 | 0,1739 | 0,9715 | 1,4173 |
| | PC | 20,22 | 0,05 | | 0,0488 | 0,0613 | 0,9867 | 1,2395 |
| | AC | 0,5 | 2,06 | | 1,8793 | 2,5531 | 0,9397 | 1,2766 |

Dari Tabel 4.13 diatas terlihat adanya perbedaan hasil perhitungan daya aktif antara daya aktif fundamental saja dengan daya aktif fundamental dan harmonisa, dimana dari hasil perhitungan daya aktif fundamental dan harmonisa lebih besar dari pada perhitungan daya aktif fundamental.



Tabel 4. 14 Perbandingan energi yang terukur pada kWh digital dan energi fundamental hasil perhitungan secara teori

| Beban Nonlinier | E_{kWh} (kWh) | $E_{fundamental}$ (kWh) | Efek Pembebanan | Error (%) |
|----------------------|-----------------|-------------------------|-----------------|-----------|
| Lampu Hemat Energi | 1 | 0,9715 | 0,0285 | 2,93 |
| Monitor LED, CPU | | 0,9867 | 0,0133 | 1,35 |
| Air Conditioner (AC) | | 0,9397 | 0,0603 | 6,42 |

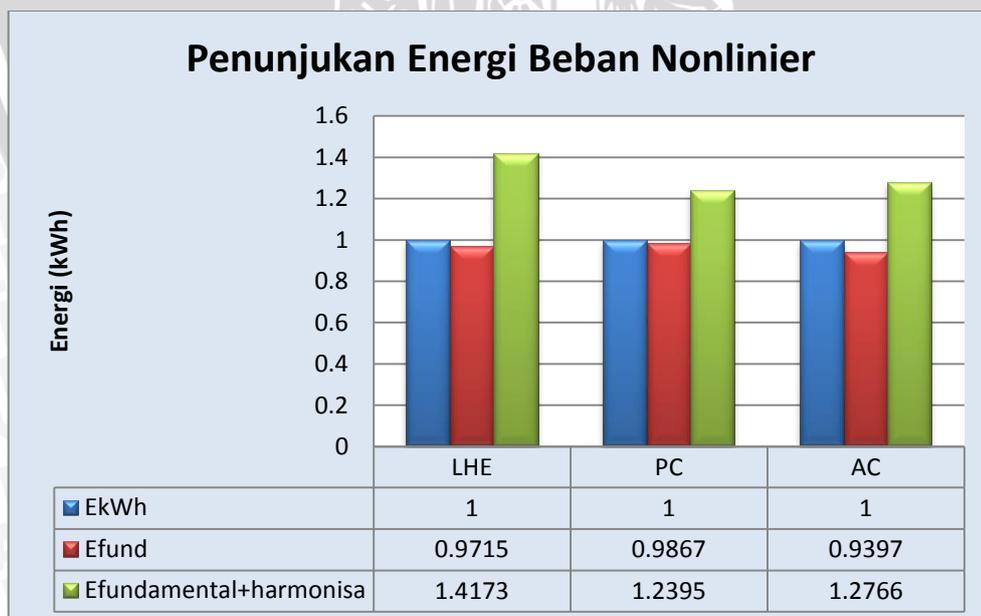
Tabel 4. 15 Perbandingan energi yang terukur pada kWh digital dan energi saat terdapat harmonisa hasil perhitungan secara teori

| Beban Nonlinier | E_{kWh} (kWh) | $E_{fundamental+harmonisa}$ (kWh) | Efek Pembebanan | Error (%) |
|----------------------|-----------------|-----------------------------------|-----------------|-----------|
| Lampu Hemat Energi | 1 | 1,4173 | -0,4173 | -29,44 |
| Monitor LED, CPU | | 1,2395 | -0,2395 | -19,32 |
| Air Conditioner (AC) | | 1,2766 | -0,2766 | -21,67 |

Jika kita bandingkan antara Tabel 4.14 dan 4.15 Didapatkan nilai error yang berbeda. Dimana saat hanya memperhitungkan daya aktif fundamental saja error yang didapatkan lebih kecil daripada saat penjumlahan daya aktif fundamental dengan harmonisa. Dengan kata lain, bahwa alat ukur kWh meter digital yang digunakan belum dapat mengukur nilai daya fundamental dan harmonisa. Tetapi dapat mengukur nilai daya aktif fundamental lebih akurat tidak melebihi dari hasil penunjukan daya kWh meter digital itu sendiri. Hal ini sesuai dengan teori prinsip kerja dari kWh meter digital itu sendiri. Dimana dalam prinsip kerjanya pengukuran fundamental dan harmonisa pada kWh meter digital menggunakan metode analisis spektrum frekuensi gelombang. Analisa spektrum frekuensi gelombang ini dilakukan dengan metode transformasi fourier yang telah dijelaskan di dasar teori sebelumnya. Setelah spektrum frekuensi didapatkan, maka akan dilakukan perhitungan daya aktif untuk masing-masing frekuensi baik fundamental dan harmonisa. Setelah itu nilai daya fundamental dan harmonisa masing-masing frekuensi dijumlahkan. Hal ini yang membuat kWh meter digital mempunyai tingkat akurasi yang tinggi tetapi dalam perhitungan daya aktif

pengaruh harmonisa, penunjukan kWh meter digital menunjukkan error yang cukup besar dan melebihi dari hasil penunjukan daya energi itu sendiri, hal ini dikarenakan pada alat ukur kWh meter digital tipe Socomec Diris A40 belum dapat memperhitungkan harmonisa. Untuk dapat memperhitungkan adanya hsrmonisa perlu ditambahkannya modul khusus sesuai spesifikasi alat ukur Socomec Diris A40 itu sendiri.

Error antara daya yang terukur pada kWh meter digital dengan perhitungan seperti yang terlihat pada Tabel 4.14 dan 4.15 di atas mempunyai presentase yang cukup besar. Adanya error yang cukup besar dikarenakan oleh beberapa faktor. Pada beban nonlinier rumah tangga yang terukur untuk beban lampu hemat energi, *Personal Computer(PC)* arus yang terukur tidak lebih dari 1 ampere, sedangkan arus yang terukur pada beban *Air Conditioner(AC)* sangatlah besar hampir mencapai 10 ampere. Faktor paling utama yang terjadi yaitu karena arus yang diukur sangat kecil yaitu dibawah 5 A sedangkan untuk tang ampere mempunyai spesifikasi range pengukuran 1-500 A, dimana setiap range pengukuran mempunyai akurasi yang berbeda. Dengan tingkat akurasi yang cukup besar tersebut mengakibatkan pengukuran menjadi kurang presisi, sehingga pada saat perhitungan daya aktif secara teori menjadi kurang akurat dan error yang didapatkan cukup besar yaitu diatas 5%.



Gambar 4. 25 Perbandingan Hasil Penunjukan Energi yang Terukur

Perbandingan energi yang terukur pada kWh meter digital dan energi yang didapatkan secara teori melalui perhitungan terlihat pada Gambar 4.25, nilai energi fundamental lebih kecil dari nilai energi yang terukur pada alat ukur kWh meter digital sedangkan nilai energi setelah adanya harmonisa lebih besar dari energi fundamental dan energi yang terukur pada alat ukur kWh meter digital, sehingga dapat disimpulkan bahwa pengaruh harmonisa yang terjadi pada beban nonlinier rumah tangga dapat mempengaruhi kenaikan pembebanan pada alat ukur kWh digital dan memberikan *error* kesalahan yang cukup besar akibat adanya beban nonlinier rumah tangga yang ditimbulkan.

Jika dibandingkan dengan beban linier, prosentase kesalahan penunjukan kWh meter digital 1 fasa yang terjadi pada beban nonlinier relative lebih besar. Hal ini disebabkan pada beban nonlinier terdapat komponen semikonduktor dan penyearah yang merupakan terjadinya harmonisa

