

Analisis Pengaruh Harmonisa terhadap Rugi-Rugi Daya pada Sistem Tegangan Rendah dan Transformator GR088 di Penyulang Menjangan

Salim Afif¹, I W. Sukerayasa², W. G. Ariastina³

Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Udayana Denpasar – Bali
Email : salim.afif@pln.co.id¹, sukerayasa@unud.ac.id², w.ariastina@unud.ac.id³

Abstrak

Penyulang Menjangan merupakan sistem jaringan tegangan menengah 20 kV yang melayani daerah Gilimanuk dan sebagian Buleleng. Penyulang Menjangan memiliki total gardu terpasang sebanyak 69 buah, dimana Gardu GR088 adalah salah satu gardu yang menjadi penyumbang kandungan harmonisa arus (THD_i) tertinggi. Pada penelitian ini akan dikaji mengenai pengaruh harmonisa terhadap rugi-rugi daya pada sisi sistem tegangan rendah di gardu distribusi GR088 Penyulang Menjangan. Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah metode pengukuran harmonisa langsung pada masing-masing beban pelanggan tegangan rendah gardu distribusi GR088 di Penyulang Menjangan. Selanjutnya dilakukan simulasi analisis aliran daya harmonisa dengan menggunakan perangkat lunak yang tersedia. Rugi-rugi daya total pada Transformator dan Sistem Tegangan Rendah di GR088 Penyulang Menjangan kondisi tanpa harmonisa adalah sebesar 1481,7 Watt dan total rugi-rugi daya kondisi dengan kandungan harmonisa adalah sebesar 1552,5 Watt. Selisih antara rugi-rugi daya pada kondisi tanpa kandungan harmonisa dan rugi-rugi daya pada kondisi dengan kandungan harmonisa adalah sebesar 70,8 Watt. Dari kondisi tersebut selain dapat mempengaruhi kinerja transformator karena panas yang ditimbulkan harmonisa, potensi rugi-rugi daya yang terjadi akibat dampak pengaruh harmonisa tersebut yaitu sebesar 1,7 kWh per hari atau sekitar 620 kWh setahun. Jika dikonversikan kedalam rupiah maka Gardu GR088 ikut menyumbangkan kerugian terhadap PT PLN (Persero) sebesar Rp.910.018,8 per tahunnya akibat harmonisa arus (THD_i).

Kata kunci : Kondisi tanpa Harmonisa, Kondisi dengan Harmonisa, Harmonic Analysis Load Flow, Rugi Daya, Sistem Tegangan Rendah

Abstract

Menjangan feeder is a medium-voltage network system which distributes electricity throughout Gilimanuk and some areas in Buleleng. It has 69 distribution substations, which one of them, substation GR088, contributes to the highest value of the total harmonic distortion (THD_i). In this research, the effect of harmonic distortions on losses at low voltage system of substation GR088 will be evaluated. The method used in this study is direct measurement of harmonic distortions at each low-voltage customer whose electricity is generated by substation GR088 at Menjangan Feeder. Software is also used to perform harmonic load flow analysis and simulations. The total value of losses on transformer and low voltage system of substation GR088 Menjangan feeder, in a no-harmonic condition is 1481,7 Watt. On under-harmonic condition, the total value of losses is 1552,5 Watt. Therefore there is a 70,8 Watt difference between the two conditions. At this case, beside the heat created by the harmonic distortion that can affect the performance of transformers, it also cause a quite great value of losses, which is 1,7 kWh per day, or approximately 620 kWh per year. It means the harmonic distortion in substation GR088 can cause PT PLN (Persero) lose Rp.910.018,8 per year.

Keywords : No-Harmonic Condition, Under-Harmonic Condition, Harmonic Analysis Load Flow, Power Losses, Low-Voltage System

1. PENDAHULUAN

Harmonisa adalah gelombang tegangan atau arus sinusoidal yang memiliki frekuensi yang merupakan hasil kali integer dari frekuensi dasar

dimana suplai sistem dirancang untuk beroperasi (biasanya 50 atau 60 Hz). Pada dasarnya, harmonisa adalah gejala pembentukan gelombang-gelombang dengan frekuensi berbeda yang merupakan perkalian bilangan bulat dengan frek-

uensi dasarnya. Pada batas tertentu harmonisa kelipatan ganjil dapat berpengaruh buruk terhadap peralatan elektronika rumah tangga. Harmonisa juga dapat meningkatkan rugi daya pada sistem jaringan listrik. Harmonisa dapat meningkatkan rugi daya pada penyulang. Penelitian yang dilakukan oleh Wisnu pada penyulang Menjangan PT.PLN Persero Area Bali Utara dengan melakukan pengukuran THD_i pada semua trafo sisi tegangan rendah didapatkan bahwa trafo GR 88 mempunyai THD_i paling tinggi sebesar 24,70 %[1].

Penelitian ini akan dilanjutkan untuk menganalisis pada sisi tegangan rendah dengan mengukur THD_i pada semua pelanggan gardu GR088. Hasil ukur tersebut kemudian dilakukan simulasi menggunakan bantuan perangkat lunak sebagai analisis arus harmonisa pada sisi sistem tegangan rendah sehingga dapat dilakukan perhitungan rugi-rugi daya pada sistem tegangan rendah di Trafo Distribusi GR088.

2. TINJAUAN PUSTAKA

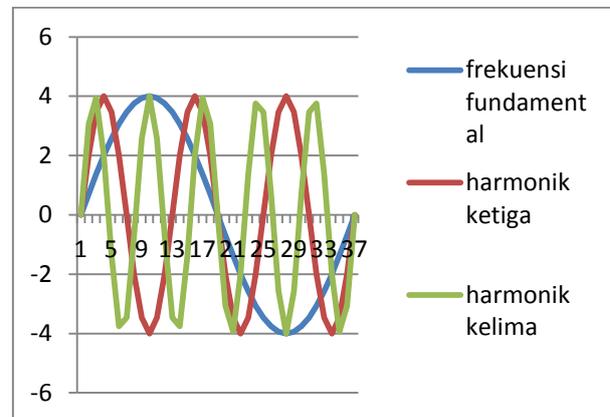
Berdasarkan Standar IEC (*International Electrotechnical Commission*) 1000.4-11, gangguan harmonisa tergolong kedalam Distorsi Bentuk Gelombang. Fenomena ini terjadi perubahan bentuk gelombang dari gelombang dasarnya [2].

Harmonisa disebabkan oleh adanya beban nonlinear yang digunakan dalam sistem tenaga listrik. Peralatan seperti *converter*, penyearah, *adjustable speed drive* untuk mengendalikan motor-motor industri, *thyristor controlled reactor*, serta berbagai peralatan yang didasarkan pada proses pensaklaran dapat menyebabkan terjadinya harmonisa. Sedangkan untuk beban, yang dapat menimbulkan harmonisa antara lain *electric arc furnace*, *induction furnace*, serta mesin las, dimana beban tersebut berubah-ubah dari waktu ke waktu dengan cepat secara nonlinier [3]. Harmonisa yang ditimbulkan oleh peralatan yang digunakan menyebabkan perubahan pada bentuk gelombang.

2.1. Harmonisa pada Jaringan Distribusi

Sistem tenaga listrik dirancang untuk beroperasi pada frekuensi 50 atau 60 Hz. Akan tetapi pada aplikasinya beberapa beban menyebabkan munculnya arus/tegangan yang frekuensinya merupakan kelipatan 50/60Hz [4]. Seperti yang terlihat pada Gambar 1

Umumnya keberadaan harmonik ini membawa kerugian pada berbagai alat, salah satunya adalah transformator distribusi.



Gambar 1: Frekuensi Fundamental, Harmonik Ketiga, Harmonik Kelima

2.2. Pengaruh Harmonisa

Frekuensi harmonik yang lebih tinggi dari frekuensi kerjanya akan mengakibatkan penurunan efisiensi atau terjadi kerugian daya. Secara khusus, efek atau dampak jangka panjang yang ditimbulkan oleh harmonik pada sistem tenaga listrik sebagai berikut [4]:

- Pemanasan kapasitor
- Tegangan non-sinusoidal yang diterapkan pada mesin listrik dapat meningkatkan rugi inti dan rugi belitan, serta pemanasan lebih.
- Frekuensi harmonik yang lebih tinggi dari frekuensi kerjanya akan mengakibatkan penurunan efisiensi dan pada akhirnya mengakibatkan kerugian daya pada transformator.
- Pemanasan pada kabel dan peralatan lainnya, rugi-rugi kabel yang dilewati oleh arus harmonik akan semakin besar.

2.3. Rugi-Rugi pada Penghantar

Rugi-rugi yang terjadi pada penghantar bergantung besar arus yang mengalir dan besar tahanan yang dimiliki penghantar tersebut. Dengan mengalirnya arus harmonisa (I_{rms}) pada penghantar, maka akan menyebabkan terjadinya penambahan panas sehingga terjadi peningkatan rugi-rugi I^2R pada penghantar tersebut. Besarnya rugi-rugi penghantar (P_{Loss}) dapat dihitung dengan Persamaan (1) akibat terdapatnya komponen harmonisa di dalam arus beban [5] :

$$P_{Loss} = \sum_{n=1}^{\infty} I_n^2 \cdot R_n \quad (1)$$

Keterangan :

P_{Loss} adalah rugi-rugi penghantar (Watt)

I_n adalah arus komponen harmonisa (Ampere)

R_n adalah tahanan untuk frekuensi harmonik (Ohm)

2.4. Rugi-Rugi pada Transformator

Rugi-rugi transformator dikelompokkan menjadi rugi tanpa beban dan rugi berbeban (*load losses*). Rugi-rugi transformator keseluruhan dihitung melalui Persamaan (2) sebagai berikut [6].

$$P_{TL} = P_{NL} + P_{LL} \quad (2)$$

Keterangan :

P_{TL} adalah rugi total transformator

P_{NL} adalah rugi tanpa beban

P_{LL} adalah rugi berbeban

2.4.1. Rugi Transformator Tanpa Beban

Susut trafo tanpa beban (beban nol) terdiri dari susut *eddy current* (P_{EC}) dan susut *hysteresis*. Susut *eddy current* adalah besaran dari *eddy current* yang dihasilkan oleh tegangan induksi pada laminasi sebagai respon terhadap *alternating flux* yang merupakan proporsional dari kuadrat ketebalan laminasi, kuadrat dari frekuensi dan kuadrat dari nilai efektif (*rms*) kerapatan flux. Menurut *IEEE Std C57.110-2008*, susut tanpa beban tidak berpengaruh terhadap arus harmonisa [8].

2.4.2. Rugi Transformator Berbeban

Perhitungan yang digunakan untuk rugi-rugi transformator pada ratingnya dalam per-unit (pu) dihitung dengan Persamaan (3).

$$P_{LL-R} (pu) = 1 + P_{EC-R} (pu) + P_{OSL-R} (pu) \quad (3)$$

Keterangan :

P_{LL-R} adalah rugi berbeban pada rating transformator.

P_{EC-R} adalah rugi arus eddy pada belitan pada rating trafo

P_{OSL-R} adalah rugi sasaran lain pada rating transformator

Untuk menghitung kemampuan transformator menggunakan data desain, mengacu kepada *IEEE Std C57.12.90-1993* [6] dan *IEEE Std. C57.12.91-1995* [7], maka rugi transformator karena mengalirnya arus beban melalui belitan transformator.

Rugi Ohmik (I^2R), akibat arus beban mengalir pada konduktor atau belitan dan ini disebut "Rugi dc" dihitung dengan Persamaan (4).

$$P_{IR-R}^2 = K \cdot [(I_{1-R})^2 \cdot R_1] + [(I_{2-R})^2 \cdot R_2] \text{ Watt} \quad (4)$$

Keterangan :

P_{IR-R}^2 adalah rugi Ohmik pada rating transformator.

K adalah 1.5 untuk transformator tiga fasa.

I_{1-R} adalah rating arus pada sisi tegangan tinggi primer.

I_{2-R} adalah rating arus pada sisi tegangan rendah sekunder.

R_1 adalah nilai resistansi (3 fasa) pada sisi tegangan tinggi.

R_2 adalah nilai resistansi (3 fasa) pada sisi tegangan rendah.

Rugi Sasar/*Stray Losses* (P_{TSL-R}) merupakan rugi-rugi transformator berbeban (P_{LL-R}) dikurangi Rugi Ohmik atau Rugi dc (P_{IR-R}^2) seperti Persamaan (5).

$$P_{TSL-R} = P_{LL-R} - \{K \cdot [(I_{1-R})^2 \cdot R_1] + [(I_{2-R})^2 \cdot R_2]\} \text{ Watt} \quad (5)$$

Keterangan :

K adalah 1.5 untuk transformator tiga fasa

P_{TSL-R} adalah rugi sasaran total sesuai rating

P_{LL-R} adalah rugi berbeban sesuai rating

R_1 adalah nilai resistansi (3 fasa pada sisi tegangan tinggi

R_2 adalah nilai resistansi (3 fasa) pada sisi tegangan rendah

I_{1-R} adalah rating arus pada sisi tegangan tinggi primer

I_{2-R} adalah rating arus pada sisi tegangan rendah sekunder

Asumsi yang digunakan *IEEE Std C57.110-1998* untuk tipe transformator dengan pendingin minyak [8], untuk mendapatkan rugi arus eddy (P_{EC-R}) adalah dengan Persamaan (6).

$$P_{EC-R} = P_{TSL-R} \times 0.33 \text{ Watt} \quad (6)$$

Rugi sasaran lain (P_{OSL}) pada inti dan metal serta dinding transformator akibat terpotongnya fluks sasaran dihitung dengan Persamaan (7).

$$P_{OSL-R} = P_{TSL-R} - P_{EC-R} \text{ Watt} \quad (7)$$

Keterangan :

P_{OSL-R} adalah rugi sasaran lain sesuai ratingnya

P_{TSL-R} adalah rugi sasaran total sesuai ratingnya

P_{EC-R} adalah rugi arus eddy sesuai ratingnya

Faktor harmonisa arus eddy belitan didapatkan dengan Persamaan (8).

$$F_{HL} = \left(\sum_{n=1}^{mak} \left(\frac{I_n}{I_1} \right)^2 n^2 \right) / \left(\sum_{n=1}^{mak} \left(\frac{I_n}{I_1} \right)^2 \right)$$

Keterangan :

F_{HL} adalah faktor harmonisa untuk rugi arus eddy belitan.

n adalah harmonisa orde ke-n

I_n adalah arus dengan komponen harmonisa ke-n

I_1 adalah arus beban fundamental (Ampere)

Faktor harmonisa untuk rugi sasar lain diperoleh dengan Persamaan (9).

$$F_{HL-STR} = \left(\sum_{n=1}^{mak} \left(\frac{I_n}{I_1} \right)^2 \cdot h^{0.8} \right) / \left(\sum_{n=1}^{mak} \left(\frac{I_n}{I_1} \right)^2 \right) \quad (9)$$

Keterangan :

F_{HL-STR} adalah Faktor harmonisa untuk rugi sasar lain

n adalah Harmonisa orde ke-n

I_n adalah Arus dengan komponen harmonisa ke-n

I_1 adalah Arus beban fundamental (ampere)

Rugi transformator berbeban dengan adanya harmonisa dihitung dengan Persamaan (10).

$$P_{LL}(pu) = P_{IR-n}^2 + [(F_{HL} \times P_{EC}) + (F_{HL-STR} \times P_{OSL})] \quad (10)$$

Keterangan :

P_{LL} adalah Total Rugi Transformator Berbeban Akibat Harmonisa (Watt)

P_{IR-n}^2 adalah Rugi dc I²R harmonisa (Watt)

F_{HL} adalah faktor harmonisa untuk rugi arus eddy belitan

P_{EC} adalah rugi arus eddy belitan pada transformator berbeban (Watt)

F_{HL-STR} adalah Faktor harmonisa untuk rugi sasar lain

P_{OSL} adalah rugi sasar lain pada transformator berbeban (Watt).

3. METODE PENELITIAN

Penelitian ini dilakukan di sisi tegangan rendah dimasing-masing pelanggan pada Trafo Distribusi GR 088. Data yang digunakan dalam penelitian ini merupakan data yang diperoleh dengan pengukuran secara langsung berupa Arus (I), Tegangan (V), *Total Harmonic Distortion* arus (*THDi*), dan Cos phi yang diukur pada sumber utama (*LV Board*) dan masing-masing pelanggan (kWh Meter) yang dilayani oleh Gardu GR 088 di Penyulang Menjangan, dengan total pelanggan

(yaitu sebanyak 188. Waktu pengukuran dilakukan mulai jam 9.00 – 16.00.

Hasil data pengukuran tersebut akan dilakukan simulasi *harmonic analysis* menggunakan bantuan perangkat lunak. Hasil simulasi akan diperoleh arus fundamental dan arus r.m.s yang digunakan dalam perhitungan rugi-rugi daya sistem yang terpolusi harmonik. Juga dilakukan analisis rugi daya sisten tanpa terpolusi harmonik, sehingga bisa dilakukan perbandingan dari kedua hasil tersebut.

4. PEMBAHASAN

4.1. Gambaran Umum GR088

Gardu distribusi GR088 memiliki kapasitas sebesar 100 KVA dengan tipe konstruksi gardu 2 tiang dan memiliki 2 jurusan yang menyuplai listrik ke daerah Gilimanuk tepatnya dikawasan jalan Sumber Kelampok. Gardu distribusi GR088 menyuplai daya untuk 188 pelanggan mayoritas rumah tangga, berikut rincian pelanggan di gardu GR088 [9]:

1. Rumah tangga sebanyak 175 pelanggan.
2. Sosial (rumah ibadah, banjar, dll) sebanyak 6 pelanggan.
3. Bisnis sebanyak 4 pelanggan, dan
4. Pemerintahan sebanyak 3 pelanggan.

4.2. Data Hasil Pengukuran THD Trafo dan Pelanggan GR088

Data hasil pengukuran THD transformator GR 088 di Penyulang Menjangan dan seluruh pelanggan terpasang pada saluran di gardu GR088 dapat dilihat pada Tabel 1 dan Tabel 2.

adalah faktor susut akibat arus harmon

Tabel 1. Data Hasil Pengukuran THD Trafo GR088

Harmonisa (%)	Uraian Transformator		
	GR088 (100 kVA)		
	R	S	T
<i>THDi</i>	27,56	24,70	23,60
n=3	21,9	20,4	19,5
n=5	12,3	12,6	10,3
n=7	8,0	7,8	7,7
n=9	6,9	3,6	6,0
n=11	3,8	0,6	2,8
n=13	0,9	1,2	0,2
n=15	1	0,9	1,2
n=17	0,7	0,5	0,3
n=19	0,3	0,6	0,8

Tabel 2. Data Beban Pelanggan

No	Daya Tarif (VA)	Jumlah (Pelanggan)
1	450	56
2	900	95
3	1300	25
4	2200	10
5	3500	2
Total Jumlah Pelanggan		188

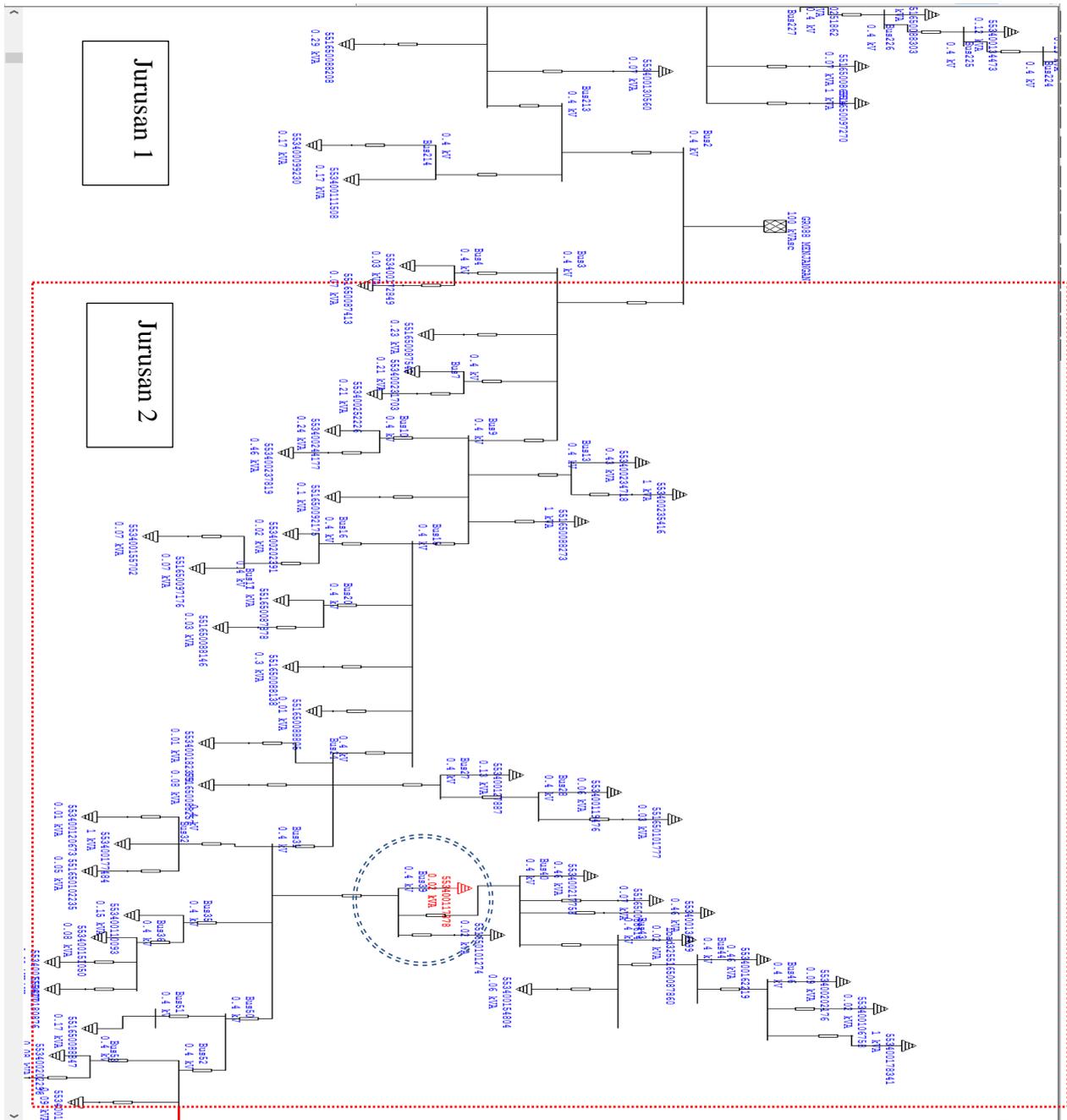
Berdasarkan Peraturan Menteri Energi Dan Sumber Daya Mineral Nomor : 04 Tahun 2009 tentang batas maksimum distorsi harmonisa arus dalam persyaratan sistem teknik distribusi pada rentang orde harmonic $h < 11$ adalah 4 % [10]. Data hasil pengukuran pada pelanggan yang dilayani oleh Gardu GR088 dapat dideskripsikan sebagai berikut:

1. Pengukuran THD_i dilakukan langsung pada 188 pelanggan yang dilayani oleh Gardu GR088

2. Berdasarkan hasil pengukuran didapatkan 135 Jumlah Pelanggan (71,8%) yang melampaui batas maksimum distorsi harmonisa arus sesuai standar Peraturan Menteri ESDM no.04 thn 2009.
3. Jumlah pelanggan yang berada dibawah batas maksimum distorsi harmonisa arus adalah 53 pelanggan (28,2%).

4.3. Analisis Arus Fundamental dan Arus rms

Langkah awal yang dilakukan adalah dengan membuat model sistem jaringan tegangan rendah dimana trafo GR088 sebagai *power grid*, selanjutnya input data – data yang diperlukan untuk *running program*. Hasil analisis adalah berupa arus fundamental yang selanjutnya digunakan dalam perhitungan rugi-rugi daya penghantar tanpa harmonisa dan arus rms yang digunakan dalam perhitungan rugi-rugi daya penghantar dengan harmonisa.



Gambar 2 :Pemodelan JTR di GR088

Setelah dilakukan running program akan menghasilkan arus fundamental dan arus rms dengan nilai arus tertinggi terdapat pada *line* di *cabl* 2 seperti pada Tabel 3.

Tabel 3. Data Hasil Simulasi THD total Pelanggan

Id Line	Arus fundamental (A)	Arus rms (A)			phasa			
		R	S	T				
1	Cable 2	45.18	45.18	45.18	45.318	45.318	45.32	3
2	Cable160	21.224			21.693			1

4.4. Perhitungan Rugi-Rugi Penghantar Kondisi Tanpa Kandungan Harmonisa

Rugi-rugi yang terjadi pada saluran/penghantar bergantung terhadap besar arus yang mengalir padanya dan besar tahanan yang dimiliki saluran tersebut, dimana pada kondisi tanpa harmonisa arus yang mengalir adalah arus *fundamental*.

Rugi – rugi daya tiga fasa pada saluran Cable-2 kondisi tanpa harmonisa dapat dihitung dengan Persamaan (1).

$$\begin{aligned} I \text{ (arus fundamental)} &= 45,181 \text{ A.} \\ L \text{ (panjang penghantar)} &= 52 \text{ m} = 0,052 \text{ km.} \\ R \text{ (Tahanan)} &= 0,5096 \Omega/\text{km.} \\ L &= 0,052 \text{ km} \rightarrow R = 0,0265 \Omega. \\ \Delta P &= 3 \times (45,181)^2 \times 0,0265 \\ &= 162,285 \text{ Watt} \end{aligned}$$

Rugi – rugi daya satu fasa pada saluran Cable-160 kondisi tanpa harmonisa juga dapat dihitung dengan Persamaan (1).

$$\begin{aligned} I \text{ (arus fundamental)} &= 21,224 \text{ A.} \\ L \text{ (panjang penghantar)} &= 14 \text{ m} = 0,014 \text{ km.} \\ R \text{ (Tahanan)} &= 3,5539 \Omega/\text{km.} \\ L &= 0,014 \text{ km} \rightarrow R = 0,0498 \Omega. \\ \Delta P &= (21,224)^2 \times 0,0498 \\ &= 22,433 \text{ Watt} \end{aligned}$$

Berdasarkan hasil perhitungan di atas diketahui rugi-rugi daya tiga fasa pada saluran Cable-2 yaitu sebesar 162,285 Watt dan rugi-rugi daya satu fasa pada saluran Cable-160 yaitu sebesar 22,433 Watt. Dengan cara perhitungan yang sama seperti di atas, dapat dianalisis untuk masing-masing saluran yang memiliki nilai arus *fundamental* yang berbeda. Dari hasil perhitungan diperoleh rugi-rugi daya pada saluran tegangan rendah pada gardu GR088 sebesar 1080,743 Watt.

4.5. Perhitungan Rugi-Rugi Transformator Kondisi Tanpa Kandungan Harmonisa

Harmonisa arus orde pertama (*fundamental*) akan digunakan dalam perhitungan rugi daya kondisi tanpa harmonisa seperti contoh sebagai berikut.

Diketahui data Transformator (GR088 100 kVA) sesuai rating adalah sebagai berikut :

$$\begin{aligned} \text{Rugi tanpa beban } (P_{NL}) &= 210 \text{ Watt} \\ \text{Rugi berbeban } (P_{LL}) &= 1420 \text{ Watt} \\ \text{Resistan sisi primer } (R_1) &= 182 \Omega \\ \text{Arus sisi primer } (I_1) &= 2.89 \text{ Amp} \\ \text{Resistan sisi primer } (R_2) &= 0.0027 \Omega \\ \text{Arus sisi primer } (I_2) &= 151.94 \text{ Amp} \end{aligned}$$

Melalui Persamaan (5),(6), dan (7), data di atas dapat dihitung total rugi sasar sesuai rating transformator sebagai berikut :

$$\begin{aligned} P_{TSL-R} &= 1420 - \{1,5 \times [(2,89)^2 \times 0,182] \\ &\quad + [(151,94)^2 \times 0,0027]\} \\ &= 1324,222534 \text{ Watt} \\ P_{EC-R} &= 1324,222534 \times 0,33 \\ &= 436,993436 \text{ Watt} \\ P_{OSL-R} &= 1324,222534 - 436,993436 \\ &= 887,2291 \text{ Watt} \\ 1420 &= P_{IR-R}^2 + 436,993436 + 887,2291 \\ P_{IR-R}^2 &= 95,777 \text{ Watt} \end{aligned}$$

Tabel 4. Perhitungan Faktor Rugi Harmonisa Trasformator Gr088 Penyulang Menjangan Dalam (Pu) Kondisi Tanpa Kandungan Harmonisa

Orde (n)	(ln/l ₁)	(ln/l ₁) ²	(n ²)	(ln/l ₁) ² × n ²	(n ^{0,8})	(ln/l ₁) ² × n ^{0,8}
1	1,000	1,000	1	1,000	1,000	1,000

Dari Tabel 4 didapatkan F_{HL} dan F_{HL-STR} sesuai Persamaan (8) dan (9) sebagai berikut :

$$F_{HL} = 1,000/1,000 = 1,000 \text{ pu}$$

$$F_{HL-STR} = 1,000/1,000 = 1,000 \text{ pu}$$

Jenis transformator yang dibahas dalam penelitian ini adalah transformator yang menggunakan minyak, beban transformator GR88 tercatat 36,67 % dari kapasitasnya sehingga persamaan yang digunakan dalam perhitungan untuk menentukan maksimum arus yang dibebankan pada transformator adalah :

$$\begin{aligned} I_{max} \text{ (pu)} &= \sqrt{\frac{P_{LL-R} \text{ (pu)}}{1 + [F_{HL} \times P_{EC-R} \text{ (pu)}] + [F_{HL-STR} \times P_{OSL-R} \text{ (pu)}]}} \\ 0,3667 &= \frac{\sqrt{P_{LL}}}{\sqrt{1,000}} \\ (0,3667)^2 \times (1,000)^2 &= P_{LL} \\ P_{LL} &= 0,134469 \text{ (pu)} \end{aligned}$$

Tabel 5. Hasil Perhitungan Rugi-Rugi Daya Transformator Gr088 Penyulang Menjangan Dalam Kondisi Tanpa Kandungan Harmonisa

Type Rugi-Rugi	Rugi sesuai Rating (Watt)	Rugi sesuai Beban Trafo (Watt)	Faktor Harmonisa (pu)	Koreksi Rugi-Rugi (Watt)
Tidak berbeban	210	210		210
Rugi Ohmik (I^2R)	95,78	12,879		12,879
Rugi arus eddy	436,99	58,762	1,000	58,762
Rugi Sasar Lain	887,23	119,305	1,000	119,305
Rugi Total				400,946

Berdasarkan hasil perhitungan pada Tabel 5 diketahui rugi-rugi daya total transformator GR088 sesuai beban transformator dalam kondisi tanpa harmonisa yaitu sebesar 400,946 Watt.

4.6. Perhitungan Rugi-Rugi Penghantar Kondisi Dengan Kandungan Harmonisa

Perhitungan rugi-rugi daya saluran dengan kandungan harmonisa, dimana I_n yang dipakai adalah arus rms hasil simulasi. Sebagai contoh perhitungan rugi – rugi daya tiga fasa pada saluran cable-2 kondisi dengan harmonisa sesuai Persamaan (1).

$$\begin{aligned}
 I_{rms} (\text{Arus harmonisa}) &= 45.318 \text{ A.} \\
 L (\text{Panjang penghantar}) &= 52 \text{ m} = 0,52 \text{ km.} \\
 R (\text{Tahanan}) &= 0.5096 \Omega/\text{km.} \\
 L = 0,52 \text{ km} &\rightarrow R = 0.026 \Omega. \\
 P_{Loss} &= 3 \times (45,318)^2 \times 0.0265 \\
 &= 163,271 \text{ Watt}
 \end{aligned}$$

Sedangkan untuk rugi – rugi daya satu fasa pada saluran Cable-160 kondisi dengan harmonisa dihitung dengan Persamaan (1):

$$\begin{aligned}
 I (\text{arus fundamental}) &= 21,693 \text{ A.} \\
 L (\text{panjang penghantar}) &= 14 \text{ m} = 0,014 \text{ km.} \\
 R (\text{Tahanan}) &= 3,5539 \Omega/\text{km.} \\
 L = 0,014 \text{ km} &\rightarrow R = 0,0498 \Omega
 \end{aligned}$$

$$\Delta P = (21,693)^2 \times 0,0498$$

$$= 23,435 \text{ Watt}$$

Berdasarkan hasil perhitungan di atas diketahui rugi-rugi daya pada saluran tiga fasa di cable-2 tegangan rendah yaitu sebesar 163,271 Watt dan saluran satu fasa di cable-160 sebesar 23,435 Watt. Dengan cara perhitungan yang sama seperti di atas, dapat dianalisis untuk masing – masing saluran yang memiliki nilai arus rms (I_{rms}) yang berbeda sehingga total rugi-rugi daya pada jaringan tegangan rendah dengan harmonisa adalah sebesar 1097,010 Watt.

4.7. Perhitungan Rugi-Rugi Transformator Dengan Harmonisa

Salah satu dampak yang umum dari pengaruh harmonisa adalah timbulnya panas yang lebih pada transformator serta terjadinya penurunan kapasitas. Frekuensi harmonisa yang lebih tinggi dari frekuensi kerjanya akan mengakibatkan penurunan efisiensi atau terjadi kerugian daya.

Sesuai dengan standar internasional (IEEE Std C57.110TM-2008) [10], dalam perhitungan pengaruh harmonisa untuk harmonisa kelipatan 3 seperti 3,6,9,12,15 dan seterusnya tidak dimasukkan dalam perhitungan, karena hanya berpengaruh pada besarnya ukuran luas penampang konduktor pada titik netral. Dalam perhitungan rugi-rugi daya pada Trafo GR088 dengan kapasitas trafo adalah 100 kVA sebagai berikut.

Tabel 6. Perhitungan Faktor Rugi Harmonisa Transformator Gr088 Penyulang Menjangan Dalam (Pu) Kondisi Dengan Kandungan Harmonisa

Orde (n)	(\ln/I_n)	(\ln/I_n) ²	(n^2)	(\ln/I_n) ² × n^2	($n^{0.8}$)	(\ln/I_n) ² × $n^{0.8}$
1	1,000	1,000000	1	1,000000	1,0000	1,000000
5	0,126	0,015876	25	0,396900	3,6239	0,057533
7	0,078	0,006084	49	0,298116	4,74328	0,028858
11	0,006	0,000036	121	0,004356	6,80948	0,000245
13	0,012	0,000144	169	0,024336	7,78314	0,001121
17	0,005	0,000025	289	0,007225	9,64626	0,000241
19	0,006	0,000036	361	0,012996	10,5439	0,000380

Total		1,022201		1,743929		1,088378
-------	--	----------	--	----------	--	----------

Dari Tabel 6 didapatkan F_{HL} dan F_{HL-STR} sesuai Persamaan (8) dan (9) sebagai berikut :

$$F_{HL} = 1,743929/1,022201 = 1,706053 \text{ pu}$$

$$F_{HL-STR} = 1,088378/1,022201 = 1,06474 \text{ pu}$$

Beban transformator GR88 tercatat 36,67 % dari kapasitasnya sehingga :

$$I_{max} (pu) = \sqrt{\frac{P_{LL-R}(pu)}{1 + [F_{HL} \times P_{EC-R}(pu)] + [F_{HL-STR} \times P_{OSL-R}(pu)]}}$$

$$0,3667 = \sqrt{P_{LL}/\sqrt{1,022201}}$$

$$P_{LL} = 0,137454 (pu)$$

Tabel 7. Hasil Perhitungan Rugi-Rugi Daya Transformator Gr088 Penyulang Menjangan Dalam Kondisi Dengan Kandungan Harmonisa

Type Rugi-Rugi	Rugi sesuai Rating (Watt)	Rugi sesuai Beban Trafo (Watt)	Faktor Harmonisa (Watt)	Koreksi Rugi-Rugi (Watt)
Tidak berbeban	210	210		210
Rugi Ohmik (I ² R)	95,777	13,165		13,165
Rugi arus eddy	436,99	60,067	1,706053	102,4768
Rugi Sasar Lain	887,2291	121,953	1,06474	129,849
Rugi Total				455,490

4.8. Perbandingan Hasil Perhitungan Rugi-Rugi Daya Total pada Sistem Tegangan Rendah dan Gardu GR088

Hasil perhitungan kedua kondisi baik tanpa harmonisa maupun dengan harmonisa diketahui total rugi-rugi daya di Tegangan Rendah dan Transformator GR088 kondisi tanpa harmonisa adalah sebesar 1481,689 Watt dan total rugi-rugi daya kondisi dengan kandungan harmonisa adalah sebesar 1552,5Watt. Selisih rugi – rugi daya adalah sebesar (rugi dengan harmonisa – rugi tanpa harmonisa) = 1552,5 – 1481,689 = 70,811 Watt.

Tabel 8. Perbandingan Rugi – Rugi Daya Di Jaringan Tegangan Rendah Dan Transformator Gr088

Kondisi	Rugi Saluran (W)	Rugi Transformator (W)	Rugi – rugi Daya Total (W)
Tanpa Harmonisa	1080,743	400,946	1481,689
Harmonisa	1097,010	455,490	1552,5

Dari hasil selisih diatas dapat dikonversikan kedalam satuan energi untuk mengetahui energi yang hilang akibat harmonisa yang timbul di gardu GR088 dan Jaringan Tegangan Rendah tersebut. Jika diasumsikan bahwa rugi-rugi daya adalah sama setiap saat maka dapat dilakukan perhitungan sebagai berikut :

$$\text{Selisih Rugi harmonisa} = 70,811 \text{ Watt} = 0,0708 \text{ KW}$$

$$1 \text{ hari} = 24 \text{ jam}$$

$$0,0708 \times 24 = 1,6992 \text{ KWH}$$

Dengan harga energy listrik saat ini adalah sebesar Rp.1467,28 maka dapat dihitung kerugian akibat harmonisa pertahun sebagai berikut :

$$\text{kerugian/tahun} = (1,6992 \times \text{Rp. } 1467,28) \times 365 = \text{Rp. } 910.018,79$$

Dengan menggunakan asumsi tersebut maka dapat dikatakan bahwa harmonisa di tegangan rendah dan Gardu GR088 ikut menyumbangkan kerugian terhadap PT PLN (Persero) sebesar 910.018,79 Rupiah per tahunnya.

5. KESIMPULAN

Hasil pengukuran yang dilakukan pada 188 pelanggan yang dilayani oleh Gardu GR088 terdapat 71,8% pelanggan yang memiliki THDi melebihi standar batas maksimum distorsi harmonisa arus sesuai standar Peraturan Menteri ESDM no.04 thn 2009. Dengan THDi tertinggi mencapai 114,4% pada orde ke-3 yang terdapat pada pelanggan dengan ID: 553400117378. Sesuai dengan gambar jaringan yang sudah ditampilkan diatas dapat dikatakan bahwa salah satu penyebab harmonisa tertinggi di ID 553400117378 adalah karena beban tersebut terdapat dipangkal jaringan dimana kabel SR yang dihubungkan ke pelanggan dihubungkan kembali ke masing-masing beban yang berada di ekor jaringan. Sehingga bisa dikatakan beban harmonisa yang timbul di

pelanggan tersebut adalah penjumlahan dari beban yang berada di ekor sampai pada beban yang diukur.

Dari analisis diperoleh pada sistem tegangan rendah dan transformator distribusi harmonik tidak berpengaruh signifikan terhadap peningkatan rugi-rugi daya. Potensi kerugian pada transformator GR88 dan sistem tegangan rendahnya akibat harmonisa yang dikonversi dalam rupiah adalah sebesar Rp.910.018,79 per tahun.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Wisnu, *Studi Analisis Pengaruh Harmonisa Terhadap Rugi-Rugi Daya Pada Penyulang Menjangkan*. Jurnal Teknologi Elektro. Vol. 16(1). Januari-April 2017.
- [2] *International Electrotechnical Commission (IEC) 6100-2-11990, Electromagnetic Compatibility*. 1990.
- [3] Dugan, Rizy. *Harmonic Considerations for Electrical Distribution Feeder*. National Technical Information Service. Report No. ORNL/Sub/81-95011/4 (Cooper Power Systems as Bulletin 87011. 2001.
- [4] Syahwil, M, Tola M, Manjang M. *Studi Dampak Harmonisa Terhadap Susut Teknis Pada Industri Semen (Kasus Industri Semen Tonasa)*. Magister Student of Hasanuddin University. 2010.
- [5] Arrillaga, J. and Watson, N. R. *Power System Harmonic Analysis. New Zealand*. University of Canterbury. 2000.
- [6] IEEE Std C57.91-1993. *Standard Test Code for Liquid-Immersed Distribution, Power, and Regulating Transformers and Guide for Short-Circuit Testing*. 1993.
- [7] IEEE Std C57.91-1995. *Loading Guide for Mineral Oil Immersed*. 1995.
- [8] IEEE Std C57.110TM-2008. *Recommended Practice for Establishing Liquid-Filled and Dry-Type Power and Distribution Transformer Capability When Supplying Nonsinusoidal Load Current*. 2008.
- [9] PT. PLN (Persero). *Executive Summary BARA 2016*. Bali. 2016.
- [10] PERMEN ESDM Nomor : 04 tahun 2009 *Aturan Distribusi Tenaga Listrik*. Jakarta. 2009.