

# Analisis Harmonisa dan Rancang Filter Single Tuned pada Transformator 1250 kVA di PT. Industri Kereta Api (Persero)

Dedy Ahmad Nur Farizi, I Gusti Ngurah Satriyadi Hernanda, dan I Made Yulistya Negara  
 Departemen Teknik Elektro, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)  
*e-mail:* didit@ee.its.ac.id

**Abstrak**—Hamonisa merupakan efek dari penggunaan beban non linier yang tidak dapat di pisahkan dalam sistem tenaga listrik. Pada dunia industri banyak variasi beban penghasil harmonisa diantaranya penggunaan motor listrik, penggunaan power supply, penggunaan peralatan litrrik yang mengandung komponen semikonduktor, dan penggunaan computer. Salah satu dampak yang yang ditimbulkan adalah bertambahnya nilai rugi-rugi pada suatu sistem kelistrikan. PT. Industri Kereta Api (Persero) merupakan asset vital nasional yang bergerak di bidang industri kereta api. Selama ini, pada PT. Industri Kereta Api (Persero). belum pernah dilakukan pengukuran maupun analisis tentang harmonisa. Setelah dilakukan pengkuran pada transformator 1250 kVA di PT. industri Kereta Api (Persero) dan dilakukan analisis data didapat nilai %THD melebihi standart harmonisa yang ada pada SPLN. 004-1:2012. Oleh karena itu, perlu dilakukan analisa lebih lanjut tentang pengaruh harmonisa terhadap rugi- rugi pada transformator dan penggunaan filter harmonisa. Hasil yang didapat dari analisis tersebut adalah nilai %THD dan nilai rugi rugi pada traformator sebelum dan setelah pemasangan filter harmoniusa.

**Kata Kunci**—Harmonisa, Beban Non linier, Rugi-rugi pada Transformator, THD, Filter Harmonisa.

## I. PENDAHULUAN

DALAM sistem tenaga terjadinya distorsi harmonisa diakibatkan oleh beban non-linier. Sumber beban non-linier adalah penggunaan motor listrik dan perlatan elektronik eperti televisi, computer, dan lain sebagainya [1]. Beban non linier adalah beban yang arusnya tidak sebanding dengan tegangan yang diberikan. Semakin banyak aplikasi beban non linier dalam sebuah sistem tenaga listrik sangat mendistorsi gelombang sinus yang mengalir melalui sistem tenaga listrik. Distorsi harmonisa ini dinyatakan dalam total harmonic distortion (THD) yang merupakan parameter untuk mewakili tingkat harmonisa. Standart SPLN. 004-1:2012. adalah rekomendasi batas yang dijalankan dalam sistem tenaga listrik untuk batas tegangan maksimum 5% dan arus maksimum 20% [2].

PT. Industri Kereta Api (Persero) merupakan badan usaha milik negara yang bergerak pada bidang industri kereta api, yang berdiri stanggal 18 januari 1981. Pada studi akhir ini dilakukan analisa harmonisa pada transformator distribusi sisi sekunder di Gedung PT. Industri Kereta Api (Persero). Hal tersebut dikarenakan, pada PT. Industri Kereta Api (Persero) banyak beban non-linier khususnya pada penggunaan mootr listrik. Beban non-linier pada gedung tersebut, akan menimbulkan harmonisa yang akan menyebabkan rugi-rugi daya sehingga menyebabkan berkurangnya kapasitas trafo. Berdasarkan fakta-fakta tersebut maka, dilakukan penelitian berupa Analisis

Tabel 1.  
 Faktor Rugi-Rugi Arus Eddy

Tipe	MVA	Tegangan	PEC-R
Dry	< 1	-	3-8
	≤ 1,5	5 kV (High Voltage)	12-20
	≤ 1,5	5 kV (Low Voltage)	9-15
Oil-filled	≤ 2,5	480 V (High Voltage)	1
	2,5 – 5	480V (Low Voltage)	1,5

Tabel 2.  
 Standar Harmonisa Tegangan Menurut SPLND5.004-1:2012

Tegangan pada Titik Sambung (V <sub>n</sub> )	Distorsi Harmonisa Tegangan Individu (%)	Total THD <sub>v</sub> (%)
V <sub>rms</sub> ≤ 69 kV	3,0	5,0
69 kV < V <sub>rms</sub> ≤ 161 kV	1,5	2,5
V <sub>rms</sub> > 161 kV	1,0	1,5

Tabel 3.  
 Standar Arus Menurut SPLN D5.004-1

I <sub>sc</sub> /I <sub>L</sub>	Periode Harmonisa					TDD
	h<11	11≤h<17	17≤h<23	23≤h<35	35≤h	
<20*	4.0%	2.0%	1.5%	0.6%	0.3%	5.0%
20-50	7.0%	3.5%	2.5%	1.0%	0.5%	8.0%
50-100	10.0%	4.5%	4.0%	1.5%	0.7%	12.0%
100-1000	12.0%	5.5%	5.0%	2.0%	1.0%	15.0%
>1000	15.0%	7.0%	6.0%	2.5%	1.4%	20.0%

harmonisa rancang filter harmonisa untuk mengurigan kandungan harmonisa.

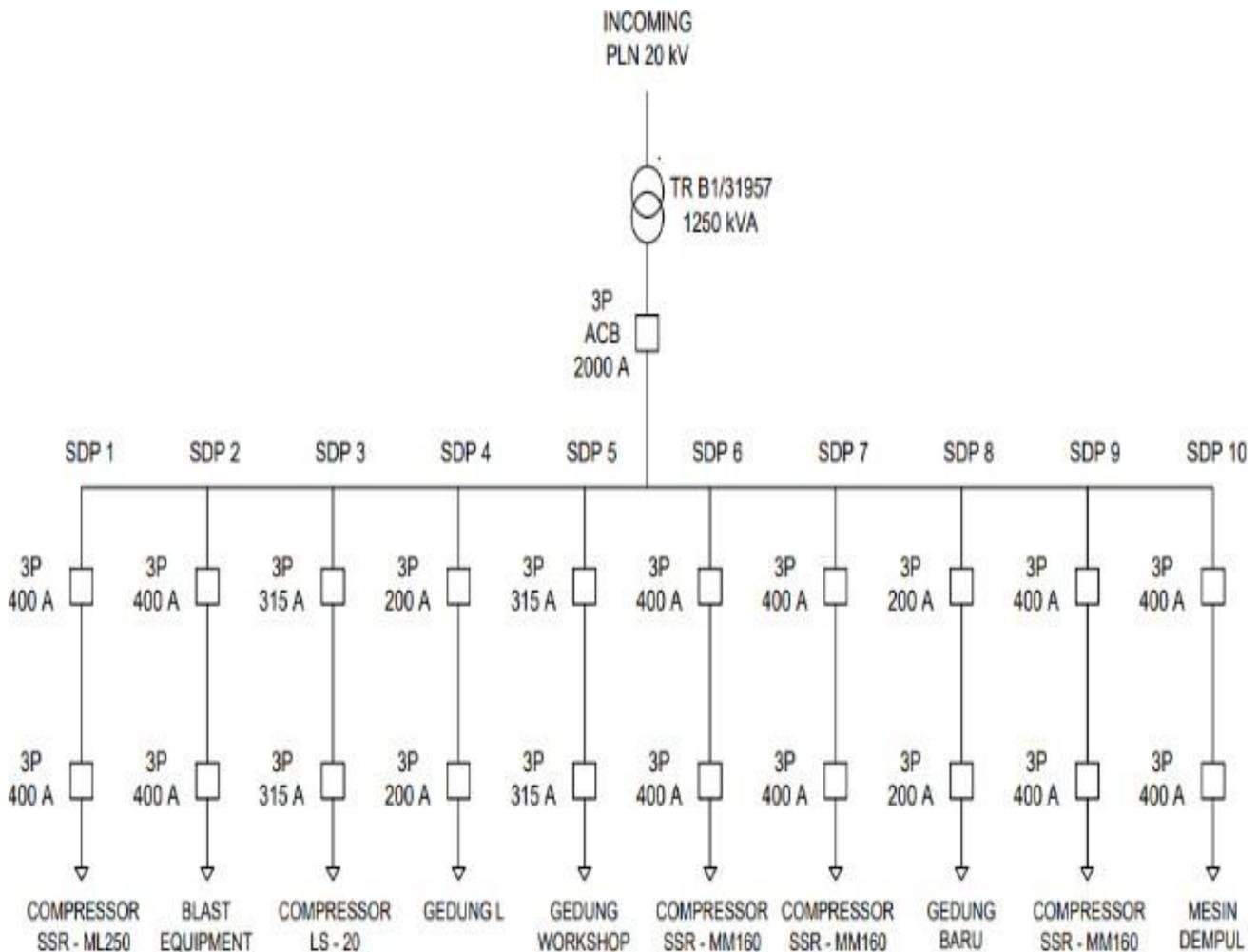
## II. TINJAUAN PUSTAKA

### A. Transformator

Transformator adalah suatu peralatan listrik yang yang berfungsi memindahkan dan mengubah energi listrik dari satu atau lebih rangkaian ke rangkaian listrik yang lain dengan nilai yang sama maupun berbeda pada freekuensi yang sama. Transformator bekerja berdasarkan prinsip elektromagnetik. Ketika kumparan primer di hubungkan dengan sumber tegangan bolak balik (AC), perubahan arus listrik pada kumparan primer akan menimbulkan medan magnet yang kemudian akan diperkuat oleh inti besi. Setelah itu, flux magnet yang yang telah diperkuat oleh inti besi akan mengalir ke kumparan sekunder sehingga akan timbul ggl induksi. Jika efisiensi sempurna maka semua daya pada lilitan primer akan dipindahkan ke lilitan sekunder [3].

### B. Pembebanan Transformator

Pada analisis harmonisa perlu diadakan perhitungan mengenai kapsitas transformator, arus short circuit, arus full load, dan presentase pembebanan. Perhitungan tersebut



Gambar 1. Diagram satu garis PT. Industri Kereta Api (Persero).

digunakan untuk mengetahui batasan-batasan nilai harmonisa. Rumus yang dapat digunakan pada perhitungan kapasitas transformator, arus short circuit, arus full load, dan presentase pembebanan adalah sebagai berikut:

$$S = \sqrt{3} \times V \times I$$

Dimana:

S = Daya Transformator (kVA)

V = Tegangan sisi primer Transformator (kV) I = Arus jala-jala (Ampere)

Untuk menghitung arus hubung singkat (source circuit) dapat digunakan persamaan berikut:

$$ISC = (S \times 100) / (\%Z \times \sqrt{3} \times kV)$$

Dimana:

%Z = Persentase Impedansi (%)

kV = Tegangan Sisi Sekunder (kV)

Sedangkan untuk menghitung arus beban penuh (full load) dapat digunakan persamaan berikut:

$$IFL = S / (\sqrt{3} \times V)$$

Dimana:

IFL = Arus Beban Penuh

V = Tegangan Sisi Sekunder Transformator (Volt)

Untuk menghitung Presentase Pembebanan dapat digunakan persamaan berikut:

$$\%beban = (I \text{ Nominal}) / IFL \times 100 \%$$

Dimana:

%beban = Persentase Pembebanan (%)

I Nominal = Arus Nominal (Ampere)

### C. Harmonisa

Harmonisa adalah gejala terdistorsinya gelombang arus atau tegangan pada suatu sistem tenaga listrik [4]. Saat terdapat kandungan harmonisa akan terbentuk gelombang baru dengan frekuensi suatu kelipatan dari frekuensi dasar 50 Hz atau 60 Hz, sehingga bentuk gelombang tegangan dan arus yang semestinya adalah sinusoidal murni akan menjadi cacat.

Persamaan untuk menghitung frekuensi harmonisa adalah sebagai berikut:

$$f(n) = f_1 \times n$$

Dimana:

f(n) = Frekuensi ke-n

f1 = Frekuensi Fundamental

n = Orde Harmonisa

Gelombang inilah yang akan menumpang pada gelombang dasar sehingga terbentuk gelombang yang tidak sinusoidal atau cacat. Gelombang cacat tersebut, merupakan hasil dari penjumlahan dari gelombang dasar sesaat dengan gelombang harmonisanya [5].

### D. Indeks Harmonisa

Index harmonic distortion (IHD) merupakan perbandingan

antara nilai rms harmonisa individual terhadap nilai harmonisa dari dasar. Persamaan untuk mencari nilai IHD

Hubungan antara IHD dan THD dapat didefinisikan dengan persamaan berikut:

Tabel 4.

Data Pengukuran Harmonisa Arus Dan Tegangan pada MDP			
Phasa	HarmonisaKe-	IHD Arus %	IHD Tegangan %
R	3	3,6	0,6
	5	11,3	2,1
	7	8,4	1,3
	9	2,2	0,4
	11	1,5	0,3
	13	0,9	0,2
	15	1,3	0,1
	17	1,1	0,1
	19	0,7	0,1
	21	0,6	0,1
	S	3	3,2
5		12,5	2,4
7		7,9	1,4
9		1,6	0,3
11		1,8	0,2
13		0,6	0,2
15		0,8	0,1
17		1,2	0,1
19		0,6	0,1
21		0,4	0,1
T		3	2,8
	5	10,3	1,9
	7	5,9	0,9
	9	1,6	0,3
	11	1,2	0,3
	13	1,2	0,3
	15	0,9	0,2
	17	0,6	0,1
	19	0,8	0,1
	21	0,6	0,1

adalah sebagai berikut:

$$IHD = \frac{\sqrt{iS_n^2}}{iS_1} \times 100\%$$

Dimana:

- IHD = Distorsi Harmonisa Individu (%)
- Isn = Arus harmonisa pas orde ke-n (Ampere)
- Is1 = Arus dasar atau fundamental (Ampere)

Total distorsi harmonisa (THD) adalah perbandingan nilai rms dari komponen harmonisa ke nilai rms dari komponen dasar.

Total distorsi harmonisa biasanya dinyatakan dalam bentuk persen (%). Persamaan untuk mencari nilai THD arus atau tegangan adalah sebagai berikut Total distorsi harmonisa untuk arus (THD<sub>i</sub>) didefinisikan dengan persamaan berikut:

$$THD = \frac{\sqrt{i_n^2}}{i_1} \times 100\%$$

Dimana:

- $i_n$  = Komponen harmonisa arus ke-n
- $i_1$  = Komponen harmonisa arus pada frekuensi dasar
- Total distorsi harmonisa untuk tegangan (THD<sub>v</sub>) didefinisikan dengan persamaan sebagai berikut :

$$THD = \frac{\sqrt{v_n^2}}{v_1} \times 100\%$$

Dimana:

- $V_n$ : komponen harmonisa tegangan ke-n
- $V_1$ : Komponen harmonisa tegangan pada frekuensi dasar

Tabel 5.

Data Hasil Pengukuran Phasa Netral pada MDP						
Phasa	Tegangan (V)	Arus (A)	Daya Aktif (kW)	Cos Phi	THD <sub>v</sub> (%)	THD <sub>i</sub> (%)
R	229	1242	219,0	0,77	2,7	14,8
S	232	1415	242,9	0,74	3,2	15,6
R	229	1162	202,2	0,76	2,5	12,3

Tabel 6.

Perbandingan Nilai Harmonisa Arus di MDP Terhadap Standar			
Phasa	I <sub>sc</sub> /I <sub>L</sub>	THD <sub>i</sub> (%)	Standar (%)
R	345,95	14,93	8
S	313,29	15,42	8
T	357,64	12,49	8

Tabel 7.

Perbandingan Nilai Harmonisa Arus di MDP Terhadap Standar		
Phasa	THDV (%)	Standar (%)
R	2,60	5
S	2,96	5
T	2,24	5

$$THD = (IHD_2^2 + IHD_3^2 + IHD_4^2 + IHD_n^2)^{1/2}$$

Dimana:

- 2, 3, 4,..., n = orde harmonisa

#### E. Sumber Harmonisa

Pada suatu sistem tenaga listrik, beban terbagi menjadi dua yaitu beban linier dan beban non linier. Beban linier adalah beban yang komponen arusnya proporsional dengan komponen tegangannya [6]. Sumber dari beban nonlinier umumnya adalah peralatan-peralatan elektronik yang didalamnya terdapat suatu komponen semi konduktor yang berfungsi sebagai suatu saklar. Saklar tersebut akan berja pada setiap siklus gelombang dari sumber tegangan [7].

#### F. Dampak Harmonisa

Harmonisa pada suatu sistem tenaga listrik sangat berpengaruh terhadap kualitas listrik baik secara langsung maupun tidak langsung. Apabila pada suatu sistem terjadi resonansi akibat harmonisa maka pada suatu sistem tersebut akan terjadi peningkatan tegangan. Hal tersebut, dapat mengakibatkan kabel dan isolator lainnya akan terkena tegangan yang berlebihan.

Tegangan berlebihan tersebut, akan akhirnya akan mengakibatkan kegagalan isolasi dan percepatan penuaan peralatan. Selain hal tersebut, harmonisa juga dapat mengakibatkan terjadinya kesalahan pembacaan alat ukur terutama meteran seperti kWh meter [8].

#### G. Dampak Harmonisa pada Transformator

Transformator adalah alat yang dibuat sebagai penyalur daya dengan rugi-rugi minimum pada frekuensi dasar. Adanya harmonisa pada arus atau tegangan di transformator dapat mengakibatkan kenaikan rugi-rugi daya [9]. Hal tersebut disebabkan karena harmonisa dapat meningkatkan suhu pada transformator.

Rugi-rugi berbeban akibat adanya harmonisa apat dinyatakan dalam rumus:

Tabel 8.  
Rugi-Rugi Berbeban Akibat Arus Harmonisa padaPhasa R

Orde Harmonisa	IHD (%)	I <sub>h</sub> (p.u)	I <sub>h</sub> <sup>2</sup> (p.u)	I <sub>h</sub> <sup>2</sup> (Pu) x h <sup>2</sup> (p.u)
1	100	1	1	1.000000
3	3.6	0.036	0.001296	0.011664
5	11.3	0.113	0.012769	0.319225
7	8.4	0.084	0.007056	0.345744
9	2.2	0.022	0.000484	0.039204
11	1.5	0.015	0.000225	0.027225
13	0.9	0.009	0.000081	0.013689
15	1.3	0.013	0.000169	0.038025
17	1.1	0.011	0.000121	0.034969
19	0.7	0.007	0.000049	0.017689
21	0.6	0.006	0.000036	0.015876
Total			1.022286	1.86331

$$PLL = \sum I_h^2 + (\sum I_h^2 \times h^2) P_{EC-R}$$

Dimana:

I<sub>h</sub><sup>2</sup> = Arus Harmonisa (A)

P<sub>EC-R</sub> = Faktor Rugi-rugi Arus Eddy

Faktor rugi-rugi arus eddy dapat dilihat pada Tabel 1. Untuk menghitung rugi histerisis (hysteresis losses), dapat dihitung dengan persamaan sebagai berikut:

$$P_h = K_h \times \sum_{h=1}^{\infty} I_h \times h$$

Dimana:

K<sub>h</sub> = Konstanta Histerisis Diketahui Sebesar 0,26

H = Orde Harmonisa

#### H. Standar Harmonisa

Standar harmonisa yang umum dipakai adalah stardar IEEE 519-2014 dan SPLN 2012, pada penelitian kali ini penulis menggunakan standar SPLN 2012 sebagai acuan. Batas tegangan arus ditentukan dari perbandingan antara arus hubung singkat pada PCC (point of Common Coupling) dengan I<sub>L</sub> (arus beban fundamental) [10]. Batasan harmonisa tegangan ditentukan oleh nilai tegangan sistem yang dipakai atau terpasang.

Standar untuk Batasan harmonisa tegangan dan arus menurut standar SPLN D5.004-1:2012 berturut-turut dapat dilihat pada Tabel 2 dan Tabel 3.

#### I. Filter Harmonisa

Untuk menghitung nilai komonen-komponen dari filter single tuned diperlukan terlebih dahulu megetahui nilai dari KVar. Untuk menentukan nilai Kvar dapat digunakan rumus berikut:

$$Q_c = P (\tan (\text{arc cos } \theta_1) - \tan (\text{arc cos } \theta_2))$$

Dimana:

Q<sub>c</sub> = Daya reaktif yang dibutuhkan (kVAR)

P = Daya Aktif (kW)

Setelah nilai KVar diketahui maka dapat menentukan nilai dari kapasitor sebagai berikut:

$$X_c = \frac{KV^2}{MVA_r}$$

Dimana:

X<sub>c</sub> = Reaktansi Kapasitif (Ohm)

C = kapasitor (Farad)

Tabel 9.  
Komponen Filter Harmonisa

Phasa	Kapasitor(F)	Induktor(mH)	Resistor Ω
R	0,0109	0,046	0,000238
S	0,0133	0,038	0,000198
T	0,0106	0,047	0,000237

Tabel 10.  
Nilai THD Setelah Pemasangan Filter Harmonisa

Phasa	Nilai THD Sebelum Pemasangan (%)	Nilai THD Setelah Pemasangan (%)
R	2,60	1,31
S	2,94	1,27
T	2,24	1,32

$$C = \frac{1}{2 \pi f X_c}$$

Dimana:

X<sub>c</sub> = Reaktansi Kapasitif (Ohm)

C = kapasitor (Farad)

Perhitungan induktor berdasarkan orde penyetelann. demi faktor keamanan filter maka frekuensi penyetelan dipilih 10% dibawah orde aslinya. untuk menentukan nilai induktor dapat menggunakan rumus sebagai berikut:

$$X_L = \frac{X_c}{h^2}$$

$$L = \frac{X_L}{2 \pi f}$$

Dimana:

X<sub>L</sub> = Reaktansi induktif (Ohm)

H = orde setelah penyetelan

Untuk menentukan nilai resistor, nilai Q yang digunakan adalah 60. Nilai ini dipilih karena filter yang digunakan adalah filter single tuned yang mempunyai nilai Q sebesar 30 sampai 60 (Gambar 1). Perhitungan nilai resistor dapat menggunakan rumus sebagai berikut:.

$$R = \frac{X_L}{Q}$$

### III. METODOLOGI

#### A. Daftar Spesifikasi Transformator

Adapun spesifikasi Tranformator yang digunakan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

Buatan pabrik	: PT. UNINDO
Tipe	: Indoor/outdoor
Daya	: 1250 kVA
Tegangan Kerja	: 400 V / 20 kV
Hubungan	: Dyn5
Impedansi	: 6%
Trafo	: 1 x 3 phasa

#### B. Data Hasil Pengukuran

Tabel 4 dan Tabel 5 merupakan data pengukuran harmonisa arus dan tegangan serta data hasil pengukuran phasa netral pada MDP.

#### IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

##### A. Analisis Perhitungan Arus Hubung Singkat dan Beban Penuh

Pada analisis harmonisa nilai arus hubung singkat dan arus beban penuh sangat penting. Arus hubung singkat dan arus beban penuh digunakan dalam menentukan range atau batasan dari standar harmonisa. Nilai arus beban penuh dan arus hubung singkat dapat dihitung menggunakan persamaan berikut:

$$Z = 6\%$$

$$S = 1250 \text{ kVA}$$

$$V = 400 \text{ V} = 0,4 \text{ kV Phasa - Phasa}$$

$$I_{FL} = \frac{S}{\sqrt{3} \times V} = 1.804,22 \text{ Ampere}$$

$$I_{SC} = \frac{kVA \times 100}{\%Z \times \sqrt{3} \times kV} = 30.070,33 \text{ Ampere}$$

##### B. Perhitungan THD Arus dan Tegangan

Pada penelitian ini, untuk mendapatkan hasil yang teruji kebenarannya, dilakukan analisa antara nilai total harmonic distortion yang diperoleh dari perhitungan dengan pengukuran. Perhitungan nilai total distortion dapat diperoleh menggunakan persamaan berikut:

THD Arus MDP:

$$\text{Phasa R} = \sqrt{(3,62 + 11,32 + 8,42 + 2,22 + 1,52 + 0,92 + 1,32 + 1,12 + 0,72 + 0,62)} = 14,93\%$$

$$\text{Phasa S} = \sqrt{(3,22 + 12,52 + 7,92 + 1,62 + 1,82 + 0,62 + 0,82 + 1,22 + 0,62 + 0,42)} = 15,42\%$$

$$\text{Phasa T} = \sqrt{(2,82 + 10,32 + 5,92 + 1,62 + 1,22 + 1,22 + 0,92 + 0,62 + 0,82 + 0,62)} = 12,49\%$$

THD Tegangan MDP:

$$\text{Phasa R} = \sqrt{(0,62 + 2,12 + 1,32 + 0,42 + 0,32 + 0,22 + 0,12 + 0,12 + 0,12 + 0,12)} = 2,60\%$$

$$\text{Phasa S} = \sqrt{(0,92 + 2,42 + 1,42 + 0,32 + 0,22 + 0,22 + 0,12 + 0,12 + 0,12 + 0,12)} = 2,96\%$$

$$\text{Phasa T} = \sqrt{(0,52 + 1,92 + 0,92 + 0,32 + 0,32 + 0,32 + 0,22 + 0,12 + 0,12 + 0,12)} = 2,24\%$$

##### C. Analisis Harmonisa Terhadap Standar

Analisa harmonisa terhadap standar ditunjukkan pada Tabel 6 dan Tabel 7.

##### D. Analisis Rugi-rugi

Analisis rugi-rugi berbeban akibat arus harmonisa pada phasa R sampai orde ke-21, sehingga diperoleh hasil pada Tabel 8. Tabel 8 menunjukkan bahwa rugi tembaga ( $I^2R$ ) mengalami peningkatan sebesar 0,022286 p.u atau dalam satuan kW dapat dihitung sebagai berikut:

$$P_{base 1\phi} = 219,0 \text{ kW}$$

$$P_{cu} (kW) = P_{cu} (p.u) \times P_{base 1\phi}$$

$$P_{cu}(kW) = 0,022286 \times 219,0$$

$$kW P_{cu} (kW) = 4,88063 \text{ kW}$$

Sedangkan rugi arus eddy (eddy-current losses) mengalami peningkatan sebesar 0,0086331 yang dapat dihitung menggunakan rumus sebagai berikut:

$$P_{base 1\phi} = 219,0 \text{ kW}$$

$$P_e (kW) = P_{cu} (p.u) \times P_{base 1\phi}$$

$$P_e (kW) = 0,0086331 \times 219,0$$

$$kW P_e (kW) = 1,89064 \text{ kW}$$

##### E. Desain Filter Harmonisa

Desain filter harmonisa meliputi di bawah ini:

###### 1) Perhitungan Nilai kVAr Phasa R

Untuk menentukan nilai Kvar dapat menggunakan rumus sebagai berikut:

$$Q_c = P (\tan (\text{arc cos } \theta_1) - \tan (\text{arc cos } \theta_2))$$

$$Q_c = 242,9 (\tan (\text{arc cos } 0,74) - \tan (\text{arc cos } 1))$$

$$Q_c = 242,9 (\tan (42,27) - \tan (0))$$

$$Q_c = 220,8 \text{ kVAR}$$

###### 2) Perhitungan Kapasitor, Induktor, dan Resistor Phasa R

Setelah nilai KVar diketahui maka dapat menentukan nilai dari kapasitor, induktor, dan resistor Phasa R. Dengan metode yang sama di dapat komponen harmonisa phasa R, S, dan T berturut-turut ditunjukkan pada Tabel 9.

##### F. Simulasi Filter Harmonisa

Simulasi filter harmonisa dilakukan menggunakan software ETAP 12.6.0. Hasil yang diapat pada simulasi filter harmonisa terlihat pada Tabel 10.

#### V. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil pengukuran dan analisis data maka dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut: (1) Nilai dari total harmonic distortion arus (THDi) di main distribution panel (MDP) pada transformator 1250 kVA di PT. Industri Kereta Api (persero) dikategorikan tidak baik karena melebihi standar. (2) Nilai dari total harmonic distortion Tegangan (THDv) di main distribution panel (MDP) pada transformator 1250 kVA di PT. Industri Kereta dikategorikan baik karena tidak melebihi standar. (3) Nilai dari total penambahan penambahan rugi-rugi daya akibat harmonisa pada transformator 1250 kVA di PT. Industri Kereta Api (Persero) adalah phasa R 7,86339 Kw, phasa S 9,01509 kW dan phasa T 5,40852 kW. (4) Dengan simulasi menggunakan software ETAP 12.6.0 didapatkan nilai Total Harmonic Distortion (THDi) pada phasa R, S, dan T setelah pemasangan filter single tuned berturut turut adalah 9,52%, 8,48 %, dan 8,26 %.

#### DAFTAR PUSTAKA

- [1] M. Hanif, "Analisa Pengaruh Beban Tidak Seimbang Terhadap Performa Transformator 3 Phasa Feedback 61-103 Pada Berbagai Hubungan Belitan Skala Laboratorium Listrik Kapal dan Otomasi," Departemen Teknik Sistem Perkapalan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, 2017.
- [2] H. D. Saputro, "Analisis Harmonisa Arus dan Tegangan Listrik di Gedung BPTIK UNNES dan E11 Teknik Elektro," Departemen Teknik Elektro, Universitas Negeri Semarang, 2019.

- [3] B. Badaruddin and F. A. Firdianto, "Analisa minyak transformator pada transformator tiga fasa di PT X," *J. Teknol. Elektro*, vol. 7, no. 2, p. 141465, 2016, doi: 10.22441/jte.v7i2.828.
- [4] R. Qurotaayun, "Pemodelan dan Analisis Transformator dengan Beban Non Linier," Departemen Teknik Elektro, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, 2015.
- [5] S. Hardi and Yaman, "Peredaman harmonisa dan perbaikan faktor daya aplikasi beban rumah tangga," *J. Litek*, vol. 10, no. 1, pp. 35–42, 2013.
- [6] I. P. A. Wirajaya, I. W. Rinas, and I. W. Sukerayasa, "Studi analisa pengaruh Total Harmonic Distortion (THD) terhadap rugi-rugi, efisiensi, dan kapasitas kerja transformator pada penyulang kerobokan," *J. SPEKTRUM* Vol, vol. 6, no. 2, 2019.
- [7] A. Yani, "Pengaruh harmonisa terhadap kesalahan pengukuran energi listrik pada KWH meter analog/digital," *Bul. Utama Tek.*, vol. 14, no. 2, pp. 99–105, 2019.
- [8] J. S. Setiadji, T. Machmudsyah, and Y. C. Wijaya, "Pengaruh harmonisa pada gardu trafo tiang daya 100 kVA di PLN APJ Surabaya Selatan," *J. Tek. Elektro*, vol. 7, no. 1, pp. 13–17, 2007, doi: 10.9744/jte.7.1.13-17.
- [9] S. Vlahinic, D. Brnobic, and N. Stojkovic, "Indices for harmonic distortion monitoring of power distribution systems," *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 58, no. 5, pp. 1771–1777, 2009, doi: 10.1109/TIM.2008.2009132.
- [10] J. Sinaga, R. M. Siburian, and J. Sirait, "Analisa pengaruh harmonisa pada pengoperasian beban listrik," *J. Teknol. Energi Uda J. Tek. Elektro*, vol. 9, no. 2, pp. 88–97, 2021.