

**SIMULASI RUGI-RUGI DAYA AKIBAT *TOTAL HARMONIC
DISTORTION* (THD) TERHADAP EFISIENSI TRANSFORMATOR DAYA
DI GARDU INDUK 150 KV BLORA**



**Disusun sebagai salah satu syarat menyelesaikan Program Studi Strata I
pada Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik**

Oleh:

SYAHRIAN FIRDANI

D400170110

**PROGRAM STUDI TEKNIK ELEKTRO
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS MUHAMMADIYAH SURAKARTA**

2021

HALAMAN PERSETUJUAN

**SIMULASI RUGI-RUGI DAYA AKIBAT *TOTAL HARMONIC
DISTORTION* (THD) TERHADAP EFISIENSI TRANSFORMATOR DAYA
DI GARDU INDUK 150 KV BLORA**

PUBLIKASI ILMIAH


oleh:

SYAHRIAN FIRDANI

D400170110

Telah diperiksa dan disetujui untuk diuji oleh:

Dosen Pembimbing


Agus Supardi, S.T., M.T.
NIK. 383

HALAMAN PENGESAHAN

**SIMULASI RUGI-RUGI DAYA AKIBAT *TOTAL HARMONIC DISTORTION* (THD) TERHADAP EFISIENSI TRANSFORMATOR DAYA
DI GARDU INDUK 150 KV BLORA**

OLEH
SYAHRIAN FIRDANI
D400170110

Telah dipertahankan di depan Dewan Penguji
Fakultas Teknik
Universitas Muhammadiyah Surakarta
Pada hari Sabtu, 31 Juli 2021
dan dinyatakan telah memenuhi syarat

Dewan Penguji:

1. Agus Supardi, S.T., M.T.
(Ketua Dewan Penguji)
2. Umar, S.T., M.T.
(Anggota I Dewan Penguji)
3. Aris Budiman, S.T., M.T.
(Anggota II Dewan Penguji)

(.....)
(.....)
(.....)

Dekan,



Rois Fatoni, S.T., M.Sc., Ph.D

NIK. 892

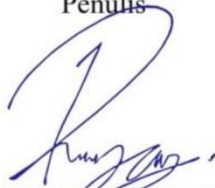
PERNYATAAN

Dengan ini saya menyatakan bahwa dalam publikasi ilmiah ini tidak terdapat karya yang pernah diajukan untuk memperoleh gelar kesarjanaan di suatu perguruan tinggi dan sepanjang pengetahuan saya juga tidak terdapat karya atau pendapat yang pernah ditulis atau diterbitkan orang lain, kecuali secara tertulis diacu dalam naskah dan disebutkan dalam daftar pustaka.

Apabila kelak terbukti ada ketidakbenaran dalam pernyataan saya di atas, maka akan saya pertanggungjawabkan sepenuhnya.

Surakarta, 31 Juli 2021

Penulis



SYAHRIAN FIRDANI

D400170110

**SIMULASI RUGI-RUGI DAYA AKIBAT *TOTAL HARMONIC DISTORTION* (THD)
TERHADAP EFISIENSI TRANSFORMATOR DAYA DI GARDU INDUK 150 KV BLORA
UNIVERSITAS MUHAMMADIYAH SURAKARTA**

Abstrak

Semakin berkembangnya teknologi yang berkembang di masyarakat, maka kebutuhan energi listrik menjadi meningkat sehingga dibutuhkan energi listrik yang optimal dan berkualitas. Energi listrik yang berkualitas salah satunya berasal dari penyaluran yang optimal, tetapi dalam penyalurannya seringkali terjadi gangguan seperti ketidakseimbangan arus yang disebabkan oleh beberapa faktor sehingga menyebabkan rugi-rugi daya. Penggunaan beban non-linier pada pelanggan merupakan salah satu penyebab munculnya rugi daya yang disebabkan oleh munculnya arus harmonisa sehingga bentuk gelombang sinusoidal yang disalurkan menjadi cacat. Rugi daya dapat mempengaruhi tingkat kualitas penyaluran dan penurunan efisiensi pada transformator daya yang ada di gardu induk 150 kV Blora. Perkembangan dunia teknologi saat ini telah menciptakan pencahayaan hemat energi seperti *Compact Fluorescent Lamp* (CFL) namun, harmonisa tegangan dan arus yang dihasilkan oleh beban tersebut dapat mengakibatkan kerugian daya yang tinggi, maka dari itu diperlukan simulasi dan analisis terhadap rugi-rugi daya yang disebabkan oleh beban non-linier seperti CFL. Simulasi rugi-rugi daya yang disebabkan oleh *Total Harmonic Distortion* (THD) terhadap efisiensi transformator daya yang ada di PT PLN (Persero) gardu induk 150 kV Blora menggunakan bantuan *software* ETAP 19.0.1. Berdasarkan data yang diperoleh kemudian disimulasikan untuk menunjukkan bentuk gelombang yang terdistorsi. Hasil dari simulasi menunjukkan bahwa nilai THDi pada gardu induk 150 kV Blora belum memenuhi SPLN D5.004-1: 2012, sedangkan rugi daya yang disebabkan oleh THD mengakibatkan penurunan efisiensi transformator daya yang ada di gardu induk 150 kV Blora hingga 2,32%.

Kata Kunci: Rugi-Rugi Daya, *Total Harmonic Distortion* (THD), Efisiensi Transformator, Beban non-linier, *Software* ETAP

Abstract

With the development of technology that develops in society, the need for electrical energy increases so that optimal and quality electrical energy is needed. One of the quality electrical energy comes from optimal distribution, but in its distribution there are often disturbances such as current imbalances caused by several factors, causing power losses. The use of non-linear loads on customers is one of the causes of power losses caused by the emergence of harmonic currents so that the sinusoidal waveform that is channeled becomes defective. Power loss can affect the level of distribution quality and decrease efficiency in power transformers in the 150 kV Blora substation. The development of today's technology world has created energy-efficient lighting such as Compact Fluorescent Lamps (CFL), however, the voltage and current harmonics generated by these loads can result in high power losses, therefore simulation and analysis of the power losses caused are required. by non-linear loads such as CFLs. Simulation of power losses caused by Total Harmonic Distortion (THD) on the efficiency of power transformers at PT PLN (Persero) 150 kV Blora substation using the ETAP 19.0.1 software. Based on the data obtained, it is then simulated to show a distorted waveform. The results of the simulation show that the THDi value at the 150 kV Blora substation does not meet SPLN D5.004-1: 2012, while the power loss caused by THD results in a decrease in the efficiency of the power transformer in the 150 kV Blora substation by up to 2,32%.

Keywords: Power Losses, Total Harmonic Distortion (THD), Transformer Efficiency, Non-linear Loads, ETAP Software

1. PENDAHULUAN

Pada zaman ini seiring dengan teknologi yang berkembang di masyarakat, maka kebutuhan energi listrik menjadi meningkat sehingga dibutuhkan ketersediaan energi listrik yang optimal dan berkualitas. Energi listrik yang berkualitas berasal dari efisiensi energi yang diproduksi sehingga dapat digunakan maksimal oleh pelanggan, apabila energi listrik yang diproduksi tidak berkualitas maka akan berpengaruh pada peralatan listrik lain seperti salah satunya pada transformator daya. Transformator daya merupakan salah satu bagian terpenting dalam sistem tenaga listrik di gardu induk dengan fungsi meneruskan penyaluran energi listrik pada pelanggan, karena pada dasarnya transformator daya harus memiliki efisiensi yang tinggi sehingga akan memberikan penyaluran energi listrik yang baik (Soh et al., 2013).

Dalam sebuah jaringan listrik terkadang juga mengalami gangguan, salah satu penyebab gangguan tersebut adalah ketidakseimbangan arus listrik yang disebabkan oleh beberapa faktor seperti ketidakseimbangan beban, penurunan tegangan, umur peralatan, kebocoran isolator, diameter penghantar, dan salah satunya adalah munculnya *Total Harmonic Distortion* (THD). Salah satu penyebab terjadinya rugi daya adalah *Total Harmonic Distortion* (THD), THD biasanya juga disebabkan oleh penggunaan beban non-linier pada sistem tenaga listrik sehingga menimbulkan distorsi pada gelombang sinus. Jika gangguan tersebut terjadi, maka pendistribusian ini akan mempengaruhi kualitas daya yang disuplai ke pelanggan. Menurut (Tomy & Menon, 2016) pada pelanggan, penurunan kualitas daya menjadi sebuah perhatian karena dapat mempengaruhi beban-beban sensitif yang terhubung ke jaringan seperti peralatan komunikasi, komputer dan peralatan sensitif lainnya.

Rugi-rugi daya akibat harmonisa yang digunakan di berbagai sektor sistem tenaga listrik disebabkan oleh sejumlah besar beban non-linier dapat diperkirakan nilainya. Selisih antara daya yang dihasilkan dengan daya yang dikonsumsi dianggap sebagai rugi daya. Namun pada umumnya kerugian daya dalam jaringan distribusi lebih diperkirakan nilainya daripada diukur secara langsung, dikarenakan alat ukur yang tidak memadai pada jaringan dan juga karena tingginya biaya pengumpulan data (Ghorbani & Mokhtari, 2015). Menurut (Soni et al., 2015) rugi-rugi pada sistem distribusi terdiri dari rugi-rugi teknis dan komersial. Kerugian teknis disebabkan oleh rugi kawat (tembaga) dan aliran daya reaktif, sedangkan kerugian komersial disebabkan oleh pencurian daya dan sistem pengukuran yang buruk.

Penambahan rugi-rugi harmonisa yang dihasilkan oleh arus yang terdistorsi dan suhu titik panas transformator dapat dihitung sesuai dengan rekomendasi standar internasional. Arus maksimum yang diizinkan transformator, faktor percepatan penuaan isolasi dan persentase susut umur mesin sesuai dengan prediksi serta dianalisis secara kritis (Cazacu et al., 2017).

1.1 Sumber Harmonisa

Sistem tenaga listrik memiliki dua jenis beban yaitu beban linier dan beban non-linier. Beban linier merupakan beban yang memiliki bentuk gelombang *output* linier, dalam hal ini bentuk gelombang arus sebanding dengan bentuk gelombang tegangan. Beban non-linier merupakan beban dengan bentuk gelombang *output* yang tidak sebanding dengan bentuk gelombang tegangan *input* sehingga bentuk gelombang *output* yang dihasilkan mengalami distorsi pada gelombang tersebut.

Beban non-linier pada umumnya merupakan peralatan elektronik yang mengandung komponen semikonduktor, seperti salah satunya CFL. Semakin berkembangnya dunia teknologi keinginan untuk meningkatkan efisiensi energi dan mengurangi beban listrik telah menghasilkan pencahayaan hemat energi seperti *Compact Fluorescent Lamp* (CFL) menggantikan lampu pijar konvensional. Harmonisa tegangan dan arus yang dihasilkan oleh beban tersebut dapat mengakibatkan kerugian yang lebih tinggi, faktor daya yang menjadi semakin buruk dan kenaikan suhu yang berlebihan pada akhirnya akan mengurangi masa pemakaian transformator (Shareghi et al., 2012).

1.2 Standar Harmonisa

Kandungan harmonisa yang terdapat pada sistem tenaga listrik dapat menimbulkan berbagai masalah pada sistem tersebut. Semakin banyak beban non-linier yang digunakan, semakin tinggi kandungan harmonisa dalam sistem, oleh karena itu terdapat batasan harmonisa yang diizinkan pada sistem tenaga listrik yaitu berdasarkan (SPLN D5.004-1, 2012).

Tabel 1. Batasan distorsi harmonisa arus pada SPLN D5.004-1: 2012

Batasan distorsi harmonisa arus						
$V_n \leq 66 \text{ kV}$						
I_{hs}/I_L	Distorsi harmonisa arus maksimum dalam persen I_L					<i>Total demand distortion</i>
	Orde harmonisa individu "h" harmonisa ganjil					
	$h < 11$	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h$	
$< 20^*$	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 - 1.000	12,0%	5,5%	5,0%	2,0%	1,0%	15,0%
> 1.000	15,0%	7,0%	6,0%	2,5%	1,4%	20,0%

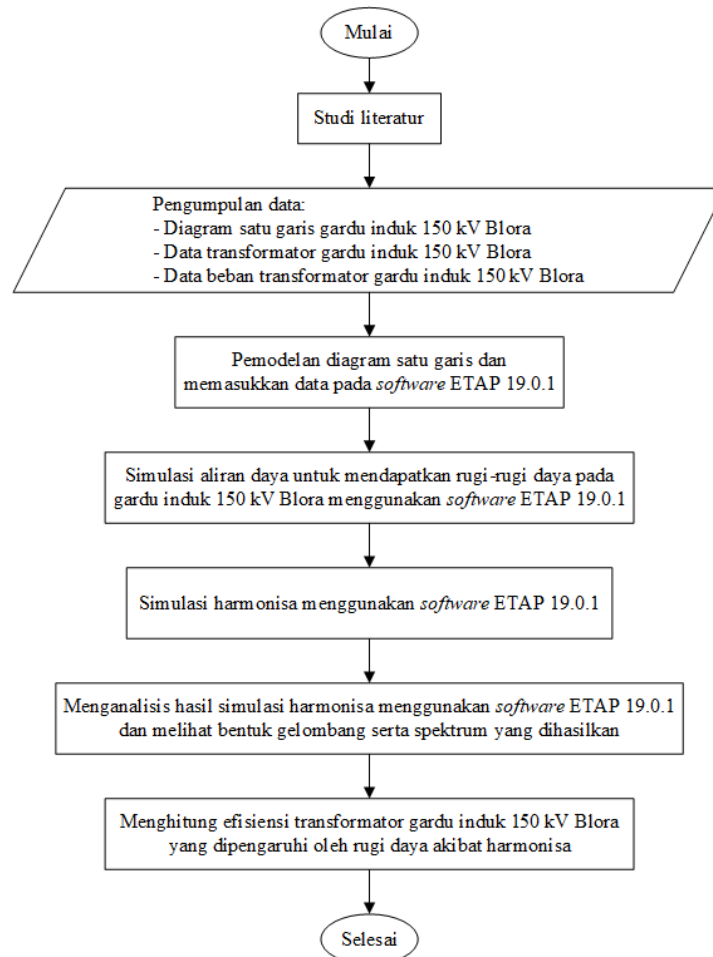
$66 \text{ kV} < V_n \leq 150 \text{ kV}$

I_{hs}/I_L	Orde harmonisa individu "h" harmonisa ganjil					<i>Total demand distortion</i>
	$h < 11$	$11 < h < 17$	$17 < h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h$	
$< 20^*$	2,0%	1,0%	0,75%	0,3%	0,15%	2,0%
20 - 50	3,5%	1,75%	1,25%	0,5%	0,25%	4,0%
50 - 100	5,0%	2,25%	2,0%	0,75%	0,35%	6,0%
100 - 1.000	6,0%	2,75%	2,5%	1,0%	0,5%	7,5%
> 1.000	7,5%	3,5%	3,0%	1,25%	0,7%	10,0%

$V_n > 150 \text{ kV}$						
I_{hs}/I_L	Orde harmonisa individu "h" harmonisa ganjil					<i>Total demand distortion</i>
	< 11	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h$	
$< 20^*$	2,0%	1,0%	0,75%	0,3%	0,15%	2,5%
20 - 50	3,5%	1,75%	1,25%	0,5%	0,25%	4,0%

2. METODE

Dalam penelitian ini peneliti menggunakan metode simulasi dalam mengolah dan menganalisis data yang diperoleh dari PT PLN (Persero) gardu induk 150 kV Blora. Peneliti melakukan studi literatur sebagai langkah awal dalam memperoleh referensi terkait penelitian ini. Pada tahap selanjutnya peneliti melakukan pengumpulan data primer dan data sekunder yang diperoleh dari gardu induk 150 kV Blora pada tanggal 25 April 2021, kemudian melakukan pengolahan data, perhitungan dan analisis rugi daya akibat distorsi harmonisa total menggunakan *software* ETAP 19.0.1. Tahap penelitian ini secara detail dapat dilihat pada gambar 1 dimana merupakan gambar dari diagram alir pelaksanaan penelitian.



Gambar 1. Diagram alir penelitian

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Dalam penelitian ini peneliti membatasi penelitiannya meliputi yang pertama melakukan simulasi aliran daya serta simulasi harmonisa menggunakan *software* ETAP 19.0.1 dilanjutkan menghitung rugi-rugi daya akibat *Total Harmonic Distortion* (THD) sehingga dapat melihat hasil efisiensi transformator I dan transformator II yang ada di gardu induk 150 kV Blora.

3.1 Data Transformator Daya di Gardu Induk 150 kV Blora

Transformator yang digunakan pada gardu induk 150 kV Blora merupakan transformator daya yang menyuplai daya ke semua beban di kabupaten Blora. Terdapat 2 buah transformator daya dengan kapasitas berbeda di gardu induk 150 kV Blora, berikut spesifikasi yang didapat dari *name plate* masing-masing transformator yang terpasang.

Tabel 2. *Name plate* transformator I GI 150 kV Blora

Merek	UNINDO
Serial number	P060LED764
Tahun	2014
Standar	IEC 60076

Kapasitas daya	60 MVA
<i>Cooling</i>	ONAN/ONAF
Frekuensi	50 Hz
Impedansi (%)	13,12
Fasa	3
Simbol koneksi	YnYn0+d
<i>High voltage</i>	150 kV
<i>Low voltage</i>	20 kV
Arus nominal	1732,1 A
Jenis minyak	IEC 296

Tabel 3. *Name plate* transformator II GI 150 kV Blora

Merek	UNINDO
<i>Serial number</i>	A.861534-01
Tahun	1987
Standar	IEC 76-1976
Kapasitas daya	30 MVA
<i>Cooling</i>	ONAN/ONAF
Frekuensi	50 Hz
Impedansi (%)	13
Fasa	3
Simbol koneksi	Ynyn0
<i>High voltage</i>	150 kV
<i>Low voltage</i>	22 kV
Arus nominal	787,3 A
Jenis minyak	IEC 296

3.2 Data Spesifikasi Beban

Dalam simulasi ini menggunakan beban jenis *static load*. Suwanda (2019) menyatakan bahwa *static load* merupakan jenis peralatan listrik yang memiliki kondisi saturasi dan biasanya dimiliki oleh komponen yang bersifat magnetik seperti mesin-mesin listrik, transformator, serta semua peralatan yang menggunakan *power supply*. Sistem aliran daya tenaga listrik pada *software* ETAP memerlukan data beban yang kemudian dimasukkan pada diagram satu garis sesuai pada tabel 4 di bawah. Beban yang dimaksud adalah penyulang yang disuplai oleh gardu induk 150 kV Blora.

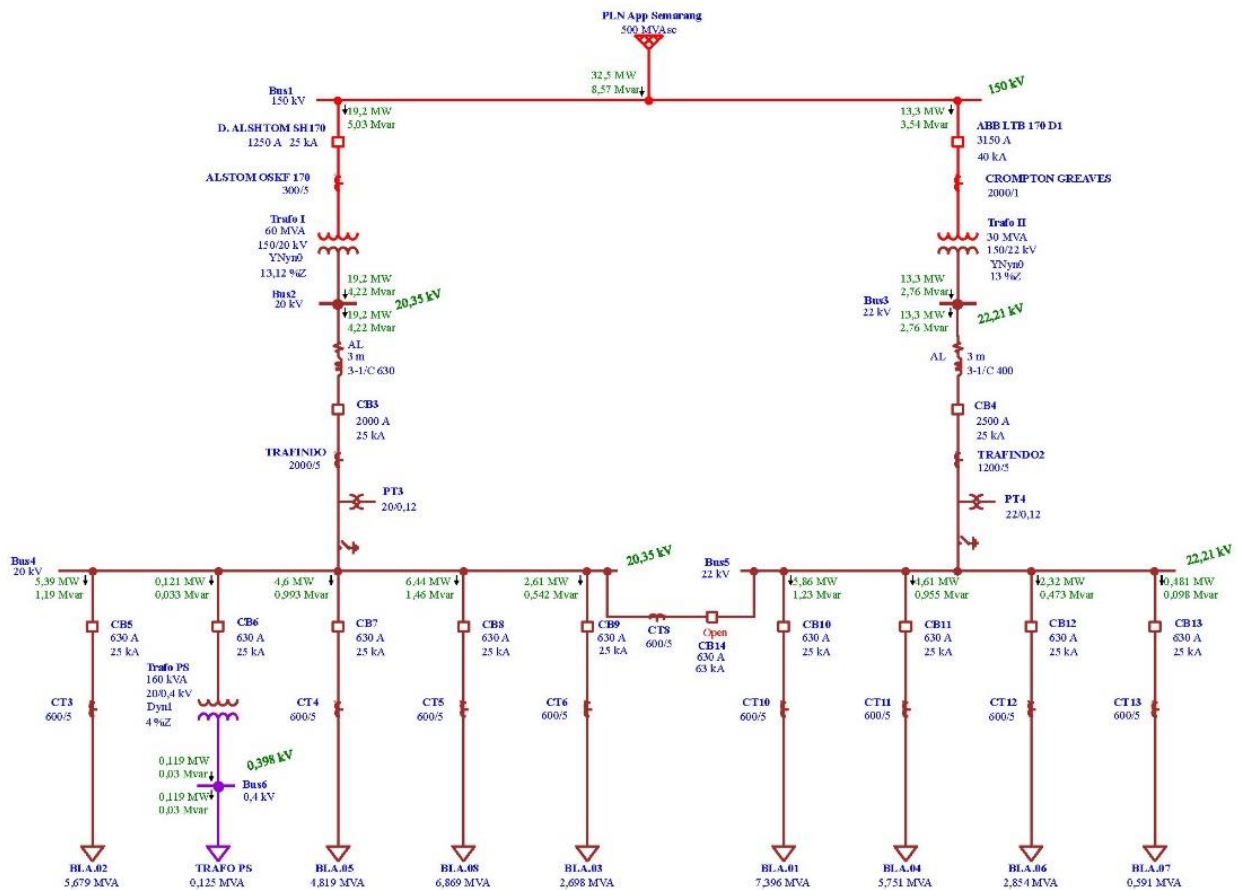
Tabel 4. Data spesifikasi beban yang terpasang pada GI 150 kV Blora

Id	Terminal Bus	Kapasitas (MVA)	Tegangan rata-rata (kV)	MW	MVar	Amp	Cos ϕ
BLA.02	Bus4	5,679	20,408	5,280	1,072	156,50	0,98

BLA.03	Bus4	2,698	20,408	2,596	0,527	75,63	0,98
BLA.05	Bus4	4,819	20,408	4,538	0,922	133,60	0,98
BLA.08	Bus4	6,869	20,408	6,266	1,272	187,50	0,98
BLA.01	Bus5	7,396	24,355	5,702	1,158	155,50	0,98
BLA.04	Bus5	5,751	24,355	4,540	0,922	122,40	0,98
BLA.06	Bus5	2,854	24,355	2,306	0,468	61,44	0,98
BLA.07	Bus5	0,591	24,355	0,481	0,098	12,77	0,98
TRAFO PS	Bus6	0,125	0,400	0,118	0,030	178,20	0,97

3.3 Simulasi Aliran Daya ETAP 19.0.1

Diagram satu garis, data transformator daya, data beban transformator daya, serta spesifikasi peralatan yang diperoleh dari PT PLN (Persero) gardu induk 150 kV Blora, kemudian dirangkai menggunakan *software* ETAP 19.0.1 (*Electrical Transient Analysis Program*) untuk menentukan rugi-rugi daya pada sistem.



Gambar 2. Diagram satu garis analisis aliran daya pada ETAP 19.0.1

Tabel 5. Hasil simulasi rugi daya pada *software* ETAP 19.0.1

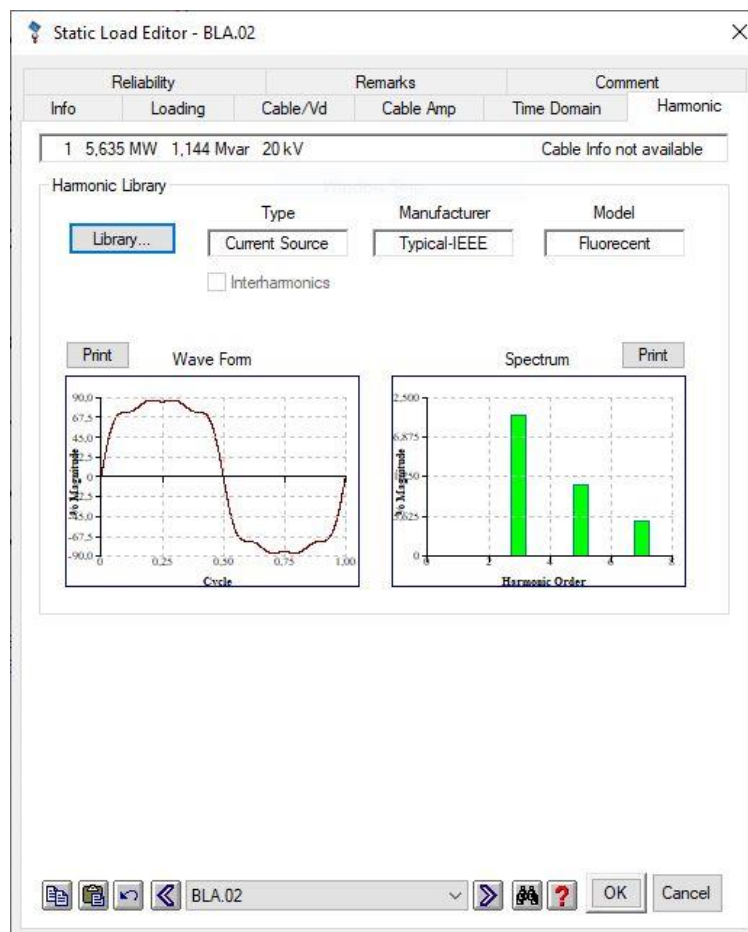
Id	From-to bus flow		To-from bus flow		Rugi daya		%Bus voltage		Vd % drop in Vmag
	MW	MVAr	MW	MVAr	kW	kVAr	From	To	
Cable1	19,168	4,221	-19,168	-4,220	0,2	0,3	101,8	101,8	0,00

<i>Cable2</i>	13,263	2,756	-13,263	-2,756	0,1	0,0	101,0	101,0	0,00
Trafo I	19,186	5,034	-19,168	-4,221	18,1	813,3	101,0	101,8	1,76
Trafo II	13,280	3,536	-13,263	-2,756	17,3	779,8	101,0	101,0	0,97
Trafo PS	0,121	0,033	-0,119	-0,030	2,1	3,2	101,8	99,5	2,31
					37,8	1.596,6			

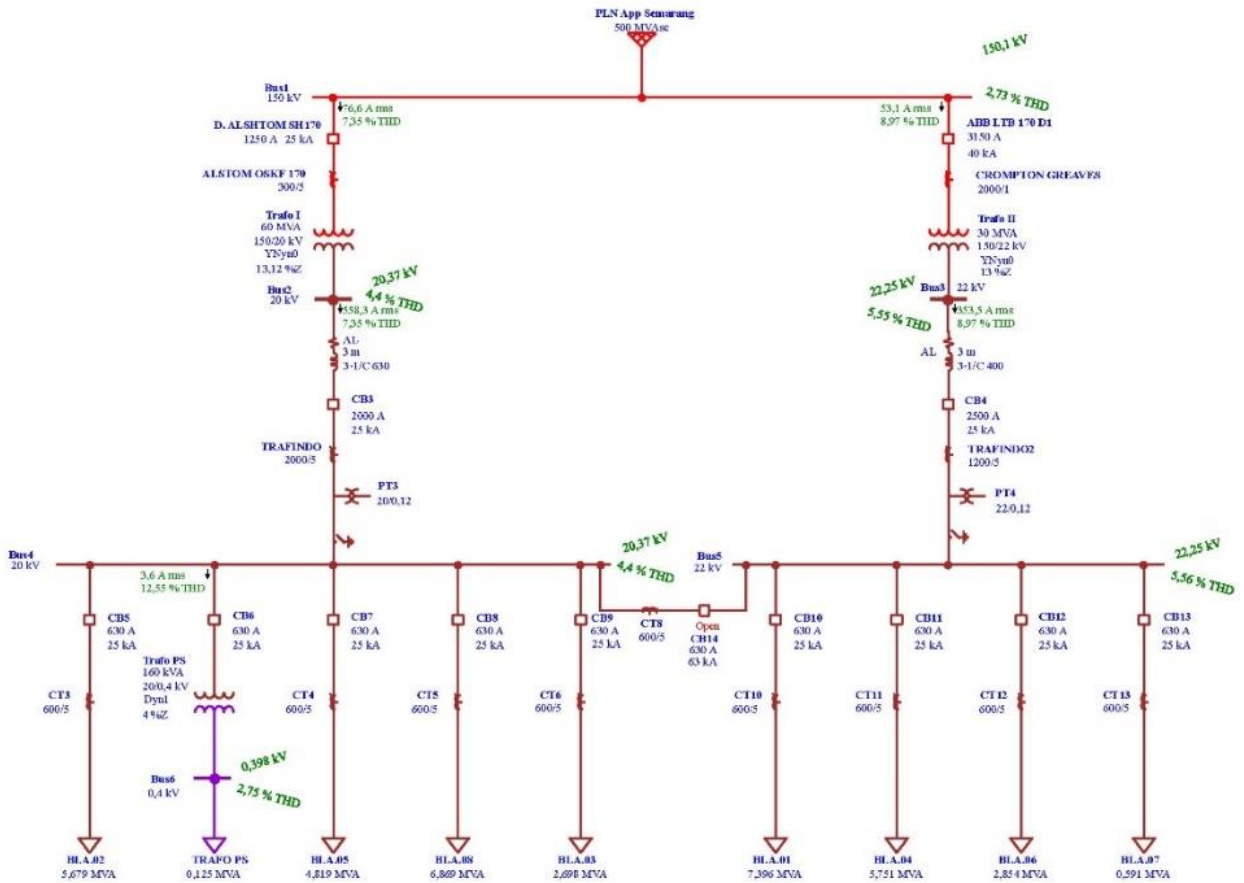
Tabel 5 merupakan hasil simulasi aliran daya, dapat dilihat bahwa total rugi daya yang ada di gardu induk 150 kV Blora adalah sebesar 37,8 kW, rugi daya terbesar terdapat pada transformator daya I, besarnya rugi daya pada transformator I ini salah satunya disebabkan oleh besarnya resistansi pada penghantar, dilihat pada *cable 1* memiliki rugi daya yang besar dibanding dengan *cable 2*.

3.4 Simulasi Harmonisa pada ETAP 19.0.1

Simulasi harmonisa pada ETAP 19.0.1 untuk mengetahui besarnya nilai THDi pada gardu induk 150 kV Blora. Beban dengan jenis *static load* yang digunakan pada diagram satu garis diberi *library* harmonisa dengan jenis *typical-IEEE* model *fluorescent*. *Library* harmonisa dengan jenis tersebut dapat diasumsikan sebagai beban rumah tangga, dimana sekitar 90% dari total beban yang ada di PLN rayon Blora adalah beban dengan jenis konsumen rumah tangga. Beban lampu dengan jenis *fluorescent* termasuk kedalam jenis beban non-linier.



Gambar 3. Tampilan kurva gelombang dan spektrum harmonisa dengan jenis beban *fluorescent*



Gambar 4. Diagram satu garis simulasi harmonisa pada ETAP 19.0.1

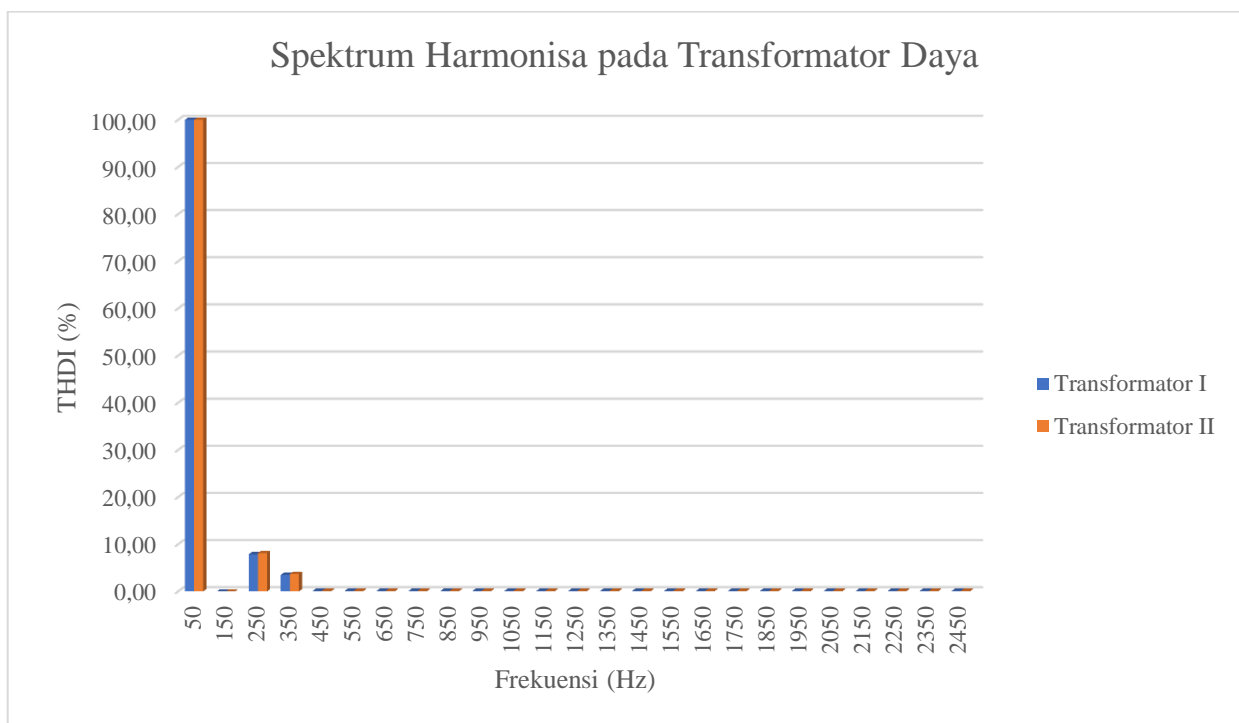
Tabel 6. Hasil simulasi harmonisa pada busbar

Id	Bus Distorsi tegangan			
	Tegangan (kV)	Tegangan fundamental (%)	Tegangan RMS (%)	THD (%)
Bus1	150,000	100,00	100,04	2,98
Bus2	20,000	101,76	101,88	4,93
Bus3	22,000	100,97	101,14	5,78
Bus4	20,000	101,76	101,88	4,93
Bus5	22,000	100,97	101,14	5,78
Bus6	0,400	99,45	99,50	3,26

Gambar 4 dan tabel 6 menampilkan hasil simulasi nilai THDv pada sisi tegangan rendah yang terbesar ada pada transformator daya II, besarnya nilai THDv dipengaruhi oleh besarnya kenaikan nilai tegangan RMS terhadap nilai tegangan *fundamental*. Nilai THDv pada sisi tegangan rendah transformator II adalah sebesar 5,78%.

Tabel 7. Hasil simulasi harmonisa pada cabang sistem

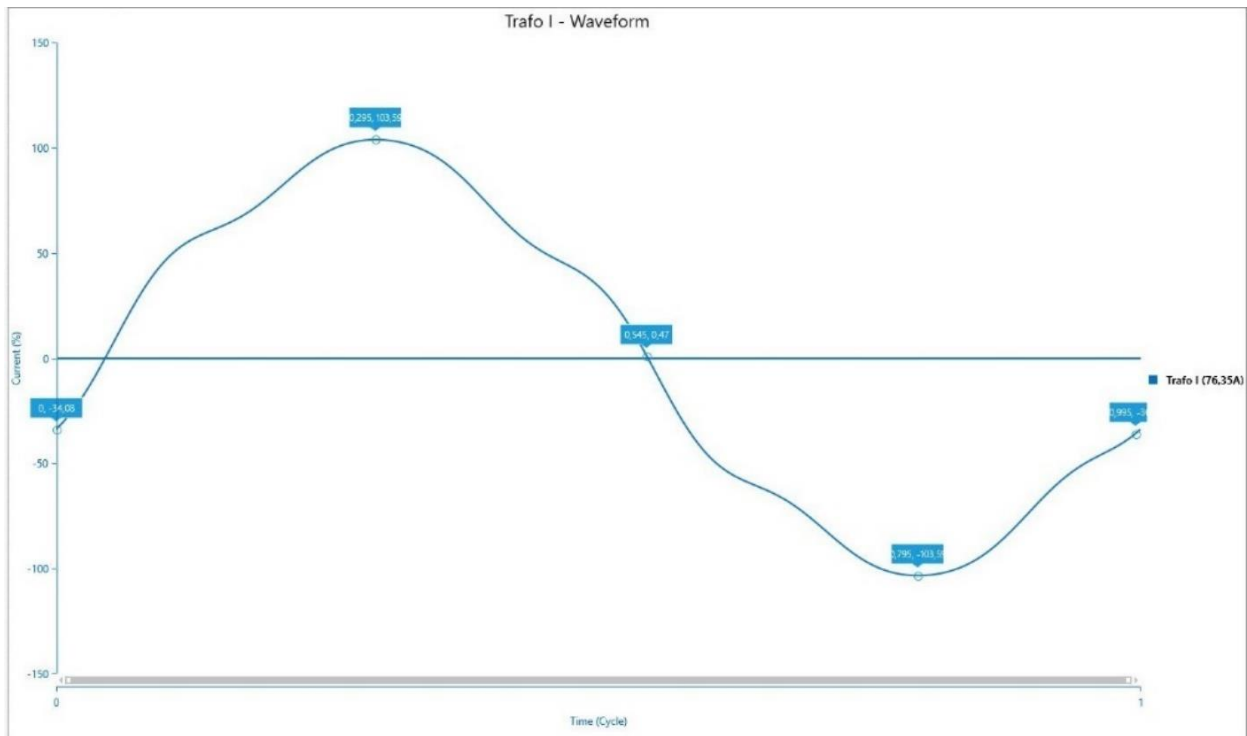
Bus		Distorsi arus		
Dari bus	Menuju bus	Arus fundamental (A)	Arus RMS (A)	THD (%)
Bus1	Bus2	76,35	76,63	8,64
	Bus3	52,90	53,11	8,91
Bus2	Bus4	556,79	558,87	8,64
	Bus1	556,79	558,87	8,64
Bus3	Bus5	352,08	353,47	8,91
	Bus1	352,08	353,47	8,91
Bus4	Bus2	556,80	558,87	8,64
	Bus6	3,56	3,59	12,79
Bus5	Bus3	352,08	353,47	8,91
Bus6	Bus4	178,15	179,60	12,79



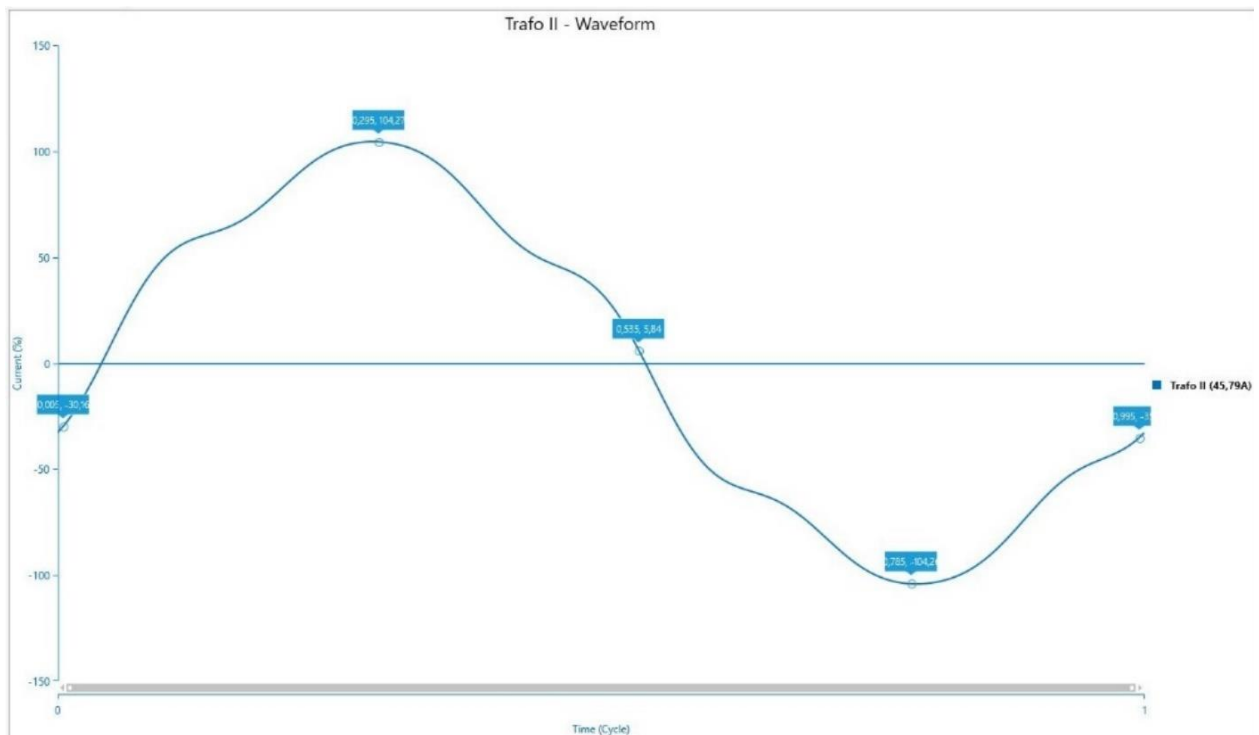
Gambar 5. Spektrum harmonisa arus pada transformator daya gardu induk 150 kV Blora

Hasil simulasi harmonisa pada tabel 7 menunjukkan bahwa harmonisa mengakibatkan kenaikan arus RMS terhadap arus *fundamental*, sehingga dapat dilihat bahwa nilai THDi pada sisi tegangan rendah dari bus 3 menuju bus 5 pada transformator II adalah nilai tertinggi dibandingkan pada transformator I. Spektrum harmonisa arus pada transformator daya dilihat pada gambar 5 menunjukkan bahwa THDi tertinggi pada saat orde harmonisa ke-5 yaitu pada frekuensi 250 Hz, sedangkan pada orde harmonisa ke-7 yaitu pada frekuensi 350 Hz mengalami

penurunan menjadi 3,5% pada transformator I sedangkan pada transformator II menjadi 3,7%. Nilai THDi pada gambar 5 ditampilkan dalam satuan persen. Transformator I dan transformator II memiliki nilai THDi yang relatif hampir sama dan tidak ada perbedaan yang terlalu jauh.



Gambar 6. Hasil gelombang yang terdistorsi harmonisa pada transformator I



Gambar 7. Hasil gelombang yang terdistorsi harmonisa pada transformator II

Gambar 6 dan gambar 7 menampilkan bentuk kurva gelombang arus sinusoidal pada transformator I dan transformator II yang terdistorsi oleh harmonisa. Gambar 6 dan gambar 7 pada hasil gelombang arus yang terdistorsi oleh harmonisa pada transformator I dan transformator II yakni pada titik puncak gelombang menunjukkan nilai THDi dalam satuan persen yaitu sebesar 104,2%. Bentuk gelombang arus yang terdistorsi oleh harmonisa pada masing-masing transformator menunjukkan gelombang sinusoidal yang terdistorsi oleh harmonisa tidak begitu cacat (Putri et al., 2020).

3.5 Analisis Simulasi Harmonisa Pada Transformator Daya

3.5.1 Perhitungan Arus Beban Penuh 3 Fasa

Perhitungan arus beban penuh 3 fasa dengan persamaan dibawah ini:

$$I_L = \frac{S}{kV \times \sqrt{3}} \quad \dots\dots(1)$$

Dengan:

I_L = Arus beban penuh (A)

S = Kapasitas transformator daya (kVA)

kV = Nominal tegangan sekunder transformator (kV)

Perhitungan arus beban penuh pada transformator daya I sesuai dengan persamaan 1 di atas, dihasilkan sebesar:

$$\begin{aligned} I_L &= \frac{60.000}{20 \times \sqrt{3}} \\ &= \frac{60.000}{34,64} \\ &= 1.732,1 \text{ A} \end{aligned}$$

Perhitungan arus beban penuh pada transformator daya II juga didapatkan melalui persamaan 1, dan didapatkan hasil arus beban penuh sebesar:

$$\begin{aligned} I_L &= \frac{30.000}{22 \times \sqrt{3}} \\ &= \frac{30.000}{38,105} \\ &= 787,3 \text{ A} \end{aligned}$$

3.5.2 Perhitungan Arus Hubung Singkat 3 Fasa

Perhitungan arus hubung singkat pada masing-masing transformator dapat dihitung melalui persamaan di bawah:

$$I_{hs} = \frac{S}{Z_{pu} \times \sqrt{3} \times kV} \quad \dots\dots(2)$$

Dengan:

I_{hs} = Arus hubung singkat

S = Kapasitas daya terpasang (kVA)

kV = Tegangan nominal sekunder transformator (kV)

Z_{pu} = Impedansi transformator pada daya terpasang (pu)

Arus hubung singkat pada transformator daya I sesuai dengan persamaan 2 di atas adalah sebesar:

$$\begin{aligned} I_{hs} &= \frac{60.000}{0,022 \times \sqrt{3} \times 20} \\ &= 79.209,641 \text{ A} \end{aligned}$$

Perhitungan arus hubung singkat pada transformator daya II juga dapat dihitung sebesar:

$$\begin{aligned} I_{hs} &= \frac{30.000}{0,043 \times \sqrt{3} \times 22} \\ &= 18.168,365 \text{ A} \end{aligned}$$

3.5.3 Perhitungan Rasio Hubung Singkat

Penentuan standar harmonisa yang akan digunakan pada SPLN D5.004-1: 2012 memerlukan perhitungan untuk menentukan rasio hubung singkat dengan persamaan di bawah ini:

$$\text{Rasio}_{hs} = \frac{I_{hs}}{I_L} \dots\dots(3)$$

Dengan:

Rasio_{hs} = Rasio hubung singkat

I_{hs} = Arus hubung singkat (A)

I_L = Arus beban penuh (A)

Perhitungan rasio hubung singkat pada transformator daya I sesuai pada persamaan 3 adalah sebesar:

$$\begin{aligned} \text{Rasio}_{hs} &= \frac{79.209,641}{1.732,1} \\ &= 45,732 \end{aligned}$$

Perhitungan rasio hubung singkat pada transformator daya II sebesar:

$$\begin{aligned} \text{Rasio}_{hs} &= \frac{18.168,365}{787,3} \\ &= 23,077 \end{aligned}$$

Hasil perhitungan rasio hubung singkat untuk masing-masing transformator sesuai pada SPLN D5.004-1: 2012 untuk nilai THDi maksimum adalah sebesar 8,0%.

3.5.4 Batas Maksimum THDi Pada Transformator Daya

Batas maksimum THDi pada sistem kelistrikan menurut SPLN D5.004-1: 2012 didapatkan dengan mengetahui rasio hubung singkat. Rasio hubung singkat dapat dihitung dan didapat dari hasil nilai rasio hubung singkat yang berbeda-beda karena beban yang dipikul masing-masing transformator juga berbeda.

Tabel 8. Perbandingan hasil simulasi THDi dengan SPLN D5.004-1: 2012

No	Transformator	Kapasitas (MVA)	THDi		Keterangan
			Hasil simulasi transformator dengan <i>software</i> ETAP 19.0.1	SPLN D5.004-1 2012	
1	Transformator I	60	8,64%	8,00%	Melebihi standar
2	Transformator II	30	8,97%	8,00%	Melebihi standar

Perbandingan hasil pengukuran THDi dengan SPLN D5.004-1: 2012 pada masing-masing transformator daya yang ada di gardu induk blora memiliki kandungan THDi yang tinggi dan melebihi SPLN D5.004-1: 2012. Kandungan THDi tertinggi terdapat pada transformator daya II yaitu sebesar 8,97 %, sedangkan pada transformator daya I hanya sedikit melebihi dari standar harmonisa yang ditentukan oleh SPLN D5.004-1: 2012. Nilai THD juga dipengaruhi oleh besarnya arus beban yang mengalir pada sisi tegangan rendah transformator. Untuk nilai arus beban yang lebih besar, jumlah distorsi tegangan pada ujung konsumen juga ikut besar, termasuk pada panjang penyulang yang pendek.

3.6 Perhitungan Daya Aktif yang Terpasang pada Transformator Daya

Perhitungan nilai daya aktif yang terpasang pada masing-masing transformator daya yang ada di gardu induk 150 kV Blora dihitung berdasarkan persamaan di bawah ini:

$$P_{\text{trafo 3 fasa}} = S \times \text{Cos } \varphi \quad \dots(4)$$

Dengan:

$P_{\text{trafo 3 fasa}}$: Daya aktif transformator (kW)

S : Daya semu transformator (kVA)

$\text{Cos } \varphi$: Faktor daya

Perhitungan daya aktif yang terpasang pada transformator daya I sesuai dengan persamaan 4 di atas maka dihasilkan:

$$\begin{aligned} P_{\text{trafo tiga fasa}} &= 60.000 \text{ kVA} \times 0,9673 \\ &= 58.038 \text{ kW} \end{aligned}$$

Daya aktif yang terpasang pada transformator daya II dihitung dengan hasil sebesar:

$$\begin{aligned} P_{\text{trafo tiga fasa}} &= 30.000 \text{ kVA} \times 0,9663 \\ &= 28.989 \text{ kW} \end{aligned}$$

3.7 Perhitungan Rugi Daya Setelah Terpengaruh Harmonisa

Rugi daya setelah terpengaruh harmonisa dapat dicari dengan cara sebagai berikut:

3.7.1 Perhitungan rugi daya setelah terpengaruh harmonisa pada transformator daya 1

Arus harmonisa dalam satuan per-unit (pu) dapat dihitung menggunakan persamaan:

$$I_h(\text{pu}) = \frac{I_{hn}}{I_1} \dots\dots(5)$$

Dengan:

I_h (pu) : Arus harmonisa dalam satuan per-unit (pu)

I_{hn} : Arus harmonisa pada orde ke-n (A)

I_1 : Arus harmonisa pada orde ke-1 (A)

Perhitungan rugi-rugi pada transformator daya I sesuai dengan persamaan 5 di atas maka diperoleh seperti pada tabel 9 dan tabel 10 untuk masing-masing transformator daya.

Tabel 9. Perhitungan rugi-rugi beban dalam satuan per-unit pada transformator I

Orde	Frekuensi (Hz)	I_h (%)	I_h (A)	I_h (pu)	I_h^2 (pu)	$I_h^2 \times h^2$ (pu)
1	50	100,0	538,80	1,000	1,000000	1,0000
3	150	0,0	0,00	0,000	0,000000	0,0000
5	250	8,2	44,10	0,082	0,006699	0,1675
7	350	3,6	19,60	0,036	0,001323	0,0648
9	450	0,1	0,60	0,001	0,000001	0,0001
11	550	0,1	0,60	0,001	0,000001	0,0002
13	650	0,1	0,60	0,001	0,000001	0,0002
15	750	0,1	0,60	0,001	0,000001	0,0002
17	850	0,1	0,60	0,001	0,000001	0,0003
19	950	0,1	0,60	0,001	0,000001	0,0004
21	1.050	0,1	0,60	0,001	0,000001	0,0004
23	1.150	0,1	0,60	0,001	0,000001	0,0005
25	1.250	0,1	0,60	0,001	0,000001	0,0007
27	1.350	0,1	0,60	0,001	0,000001	0,0008
29	1.450	0,1	0,60	0,001	0,000001	0,0009
31	1.550	0,1	0,60	0,001	0,000001	0,0010
33	1.650	0,1	0,60	0,001	0,000001	0,0012
35	1.750	0,1	0,60	0,001	0,000001	0,0014
37	1.850	0,1	0,60	0,001	0,000001	0,0015
39	1.950	0,1	0,60	0,001	0,000001	0,0017
41	2.050	0,1	0,60	0,001	0,000001	0,0019
43	2.150	0,1	0,60	0,001	0,000001	0,0021
45	2.250	0,1	0,60	0,001	0,000001	0,0023
47	2.350	0,1	0,60	0,001	0,000001	0,0025
49	2.450	0,1	0,60	0,001	0,000001	0,0030
Jumlah					1,008049	1,2580

Hasil dari perhitungan pada tabel 9 di atas maka diperoleh perhitungan rugi-rugi beban (P_{LL}) dalam satuan per-unit pada fasa dapat ditentukan dengan persamaan:

$$P_{LL} = \sum I_h^2 + (\sum I_h^2 \times h^2) P_{EC-R} \quad \dots\dots(6)$$

Dengan:

- P_{LL} = Rugi-rugi berbeban (pu)
- P_{EC-R} = Faktor eddy *current losses*
- h = Angka harmonisa
- I_h = Arus harmonisa (pu)

Perhitungan rugi-rugi berbeban pada transformator I sesuai dengan persamaan 6 di atas menunjukkan besarnya rugi-rugi berbeban (P_{LL}) dalam satuan per-unit sebesar:

$$\begin{aligned} P_{LL} &= 1,008049 + (1,2580 \times 0,01) \\ &= 1,020629 \text{ pu} \end{aligned}$$

Perhitungan rugi I^2R atau rugi tembaga maka didapatkan dengan persamaan:

$$P_{cu-R} \text{ (pu)} = \sum I_h^2 \quad \dots\dots(7)$$

Dengan:

- $P_{cu-R} \text{ (pu)}$: Rugi tembaga dalam satuan per-unit (pu)
- $\sum I_h^2$: Total rugi tembaga dalam satuan per unit hingga orde ke-n (pu)

Rugi tembaga yang diakibatkan harmonisa dalam satuan kW dapat dihitung menggunakan persamaan:

$$\begin{aligned} P_{cu} \text{ (pu)} &= \sum I_h^2 - 1 \\ \text{Rugi Tembaga (} P_{cu} \text{)} &= P_{cu} \text{ (pu)} \times P_{\text{transformator}} \quad \dots\dots(8) \end{aligned}$$

Dengan:

- Rugi Tembaga (P_{cu}) : Rugi tembaga (kW)
- $P_{cu-R} \text{ (pu)}$: Rugi tembaga (pu)
- $P_{\text{transformator}}$: Daya aktif 3 fasa yang terpasang pada transformator (kW)

Perhitungan rugi tembaga dalam satuan kW pada transformator I sesuai dengan persamaan 8 di atas dapat dihitung sebesar:

$$\begin{aligned} P_{CU} &= 0,020629 \text{ pu} \times 58.038 \text{ kW} \\ &= 1.197,266 \text{ kW} \end{aligned}$$

Rugi eddy *current* dalam satuan per-unit meningkat sebesar:

$$\begin{aligned} P_{EC} \text{ (pu)} &= 1,2580 - 1 \\ &= 0,2580 \text{ pu} \end{aligned}$$

Rugi eddy *current* dalam satuan kW dapat dihitung sebesar:

$$P_{EC-R} = 0,01 \times 0,2580 \text{ pu} \times 58.038 \text{ kW}$$

$$= 149,738 \text{ kW}$$

Total rugi-rugi akibat harmonisa pada transformator daya I sebesar:

$$P_{R\text{-akibat harmonisa}} = P_{CU} + P_{EC-R}$$

$$= 1.197,266 + 149,738$$

$$= 1.347,004 \text{ kW}$$

3.7.2 Perhitungan rugi daya setelah terpengaruh harmonisa pada transformator daya II

Perhitungan arus harmonisa dalam satuan per-unit, seperti yang ditunjukkan tabel 10 diperoleh berdasarkan persamaan 5 di atas.

Tabel 10. Perhitungan rugi-rugi beban dalam satuan per unit pada transformator II

Orde	Frekuensi (Hz)	I_h (%)	I_h (A)	I_h (pu)	I_h^2 (pu)	$I_h^2 \times h^2$ (pu)
1	50	100,0	352,29	1,000	1,000000	1,0000
3	150	0,0	0,00	0,000	0,000000	0,0000
5	250	8,1	28,60	0,081	0,006591	0,1648
7	350	3,7	12,90	0,037	0,001341	0,0657
9	450	0,1	0,40	0,001	0,000001	0,0001
11	550	0,1	0,40	0,001	0,000001	0,0002
13	650	0,1	0,40	0,001	0,000001	0,0002
15	750	0,1	0,40	0,001	0,000001	0,0003
17	850	0,1	0,40	0,001	0,000001	0,0004
19	950	0,1	0,40	0,001	0,000001	0,0005
21	1.050	0,1	0,40	0,001	0,000001	0,0006
23	1.150	0,1	0,40	0,001	0,000001	0,0007
25	1.250	0,1	0,40	0,001	0,000001	0,0008
27	1.350	0,1	0,40	0,001	0,000001	0,0009
29	1.450	0,1	0,40	0,001	0,000001	0,0011
31	1.550	0,1	0,40	0,001	0,000001	0,0012
33	1.650	0,1	0,40	0,001	0,000001	0,0014
35	1.750	0,1	0,40	0,001	0,000001	0,0016
37	1.850	0,1	0,40	0,001	0,000001	0,0018
39	1.950	0,1	0,40	0,001	0,000001	0,0020
41	2.050	0,1	0,40	0,001	0,000001	0,0022
43	2.150	0,1	0,40	0,001	0,000001	0,0024
45	2.250	0,1	0,40	0,001	0,000001	0,0026
47	2.350	0,1	0,40	0,001	0,000001	0,0028
49	2.450	0,1	0,40	0,001	0,000001	0,0031
Jumlah					1,007959	1,2572

Hasil dari perhitungan pada tabel 10 di atas maka diperoleh perhitungan rugi-rugi beban (P_{LL}) dalam satuan per-unit adalah:

$$P_{LL} = 1,007959 + (1,2572 \times 0,01)$$

$$= 1,020531 \text{ pu}$$

Perhitungan rugi I^2R atau rugi tembaga pada transformator II maka didapatkan sebesar:

$$P_{CU} = 0,020531 \text{ pu} \times 28.989 \text{ kW}$$

$$= 595,173 \text{ kW}$$

Rugi eddy *current* dalam satuan per-unit meningkat sebesar:

$$P_{EC} \text{ (pu)} = 1,2572 - 1$$

$$= 0,2572 \text{ pu}$$

Rugi eddy *current* dalam satuan kW dapat dihitung sebesar:

$$P_{EC-R} = 0,01 \times 0,2572 \text{ pu} \times 28.989 \text{ kW}$$

$$= 74,560 \text{ kW}$$

Total rugi-rugi akibat harmonisa pada transformator daya II sebesar:

$$P_{R\text{-akibat harmonisa}} = P_{CU} + P_{EC-R}$$

$$= 595,173 + 74,560$$

$$= 669,733 \text{ kW}$$

3.8 Analisis Penambahan Rugi Daya Akibat Harmonisa

Perhitungan nilai rugi daya transformator sebelum dan setelah terpengaruh harmonisa diperoleh, maka total rugi daya transformator dapat ditentukan melalui persamaan sebagai berikut:

$$P_{R\text{-total}} = P_{R\text{-tanpa harmonisa}} + P_{R\text{-akibat harmonisa}} \quad \dots\dots(9)$$

Dengan:

$P_{R\text{-total}}$: Rugi daya total (kW)

$P_{R\text{-tanpa harmonisa}}$: rugi daya sebelum terkena harmonisa (kW)

$P_{R\text{-akibat harmonisa}}$: rugi daya setelah terkena harmonisa (kW)

3.8.1 Perhitungan total rugi daya pada transformator daya I sesuai dengan persamaan 9 di atas adalah sebesar:

$$P_{R\text{-total}} = 18,1 \text{ kW} + 1.347,004 \text{ kW}$$

$$= 1.365,104 \text{ kW}$$

$$\% \text{Susut transformator} = \frac{1.365,104}{58.038} \times 100\%$$

$$= 2,352\%$$

3.8.2 Perhitungan total rugi daya pada transformator daya II adalah sebesar:

$$P_{R\text{-total}} = 17,33 \text{ kW} + 669,733 \text{ kW}$$

$$= 687,063 \text{ kW}$$

$$\% \text{Susut transformator} = \frac{687,063}{28.989} \times 100\%$$

$$= 2,370\%$$

3.9 Perhitungan Efisiensi Transformator Daya

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100\%$$

$$\eta = \frac{P_{in} - P_{rugi-rugi}}{P_{in}} \times 100\%$$

$$\eta = \left[1 - \frac{P_{R-akibat\ harmonisa}}{P_{transformator}} \right] \times 100\% \quad \dots(10)$$

Dengan:

η : Hasil efisiensi transformator (%)

P_{in} : Daya masukan pada transformator (kW)

P_{out} : Daya keluaran pada transformator (kW)

Efisiensi transformator akibat terkena harmonisa sesuai dengan persamaan 10 di atas dapat dihitung pada masing-masing transformator daya:

3.9.1 Perhitungan efisiensi pada transformator daya I akibat harmonisa

$$\eta = \left[1 - \frac{1.347,004}{58.038} \right] \times 100\%$$

$$= 97,65 \%$$

3.9.2 Pehitungan efisiensi pada transformator daya II akibat harmonisa

$$\eta = \left[1 - \frac{687,063}{28.989} \right] \times 100\%$$

$$= 97,63 \%$$

Tabel 11. Perbandingan perhitungan rugi-rugi daya terhadap efisiensi transformator sebelum dan sesudah terpengaruh THDi

No	Transformator	Rugi daya tanpa THDi (kW)	Rugi daya total (kW)	Efisiensi transformator sebelum terpengaruh THDi (%)	Efisiensi transformator setelah terpengaruh THDi (%)
1	Transformator I	18,10	1.347,004	99,97%	97,65%
2	Transformator II	17,33	687,063	99,94%	97,63%

Tabel 11 menunjukkan perbandingan dari hasil perhitungan rugi-rugi daya sebelum dan sesudah terpengaruh harmonisa terhadap efisiensi dari masing-masing transformator daya gardu induk 150 kV Blora. Nilai efisiensi pada transformator I akibat harmonisa sebesar 97,65%, sedangkan penurunan nilai efisiensi pada transformator II akibat harmonisa sebesar 97,63%.

4. PENUTUP

Berdasarkan hasil penelitian simulasi rugi-rugi daya akibat *total harmonic distortion* terhadap efisiensi transformator daya di gardu induk 150 kV Blora, dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut.

Hasil simulasi pada *software* ETAP 19.0.1 menunjukkan rugi daya pada masing-masing transformator daya adalah 18,10 kW dan 17,33 kW. Hasil simulasi harmonisa pada masing-masing transformator daya menggunakan *library* tipe *fluorescent* menunjukkan bahwa nilai THDi yang diperoleh tidak memenuhi standar SPLN D5.004-1:2012. Perhitungan total rugi daya akibat harmonisa pada transformator I adalah sebesar 1.347,004 kW, sedangkan pada transformator II adalah sebesar 687,063 kW. Perbandingan nilai rugi daya pada transformator daya akibat harmonisa menunjukkan peningkatan yang cukup besar dibandingkan dengan nilai rugi daya sebelum terpengaruh harmonisa. Rugi daya akibat harmonisa menyebabkan efisiensi transformator daya I turun sebesar 97,65%, sedangkan efisiensi transformator daya II menurun sebesar 97,63%. Nilai efisiensi masing-masing transformator sebelum dan sesudah dipengaruhi harmonisa mengalami penurunan, karena nilai rugi-rugi akibat harmonisa yang dihasilkan lebih tinggi.

DAFTAR PUSTAKA

- Cazacu, E., Petrescu, L., & Ionita, V. (2017). Losses and Temperature Rise within Power Transformers Subjected to Distorted Currents. *2017 15th International Conference on Electrical Machines, Drives and Power Systems (ELMA)*, 362–365. <https://doi.org/10.1109/ELMA.2017.7955464>
- Ghorbani, M. J., & Mokhtari, H. (2015). Impact of Harmonics on Power Quality and Losses in Power Distribution Systems. *International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE)*, 5(1), 166–174. <https://doi.org/10.11591/ijece.v5i1.pp166-174>
- Putri, I. A., Sudiby, U. B., & Pamenary, P. (2020). *Analisis Pengaruh Harmonisa Terhadap Rugi-Rugi Daya pada Transformator Distribusi Studi Kasus Penyulang Senopati 2 Di Gambir Lama* [Institut Teknologi PLN]. <http://156.67.221.169/2899/>
- Shareghi, M., Phung, B. T., Naderi, M. S., Blackburn, T. R., Ambikairajah, E., & School of Electrical Engineering and Telecommunications. (2012). Effects of Current and Voltage Harmonics on Distribution Transformer Losses. *2012 IEEE International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis*, 633–636. <https://doi.org/10.1109/CMD.2012.6416225>
- Soh, T. L. G., Said, D. M., Ahmad, N., Nor, K. M., & Salim, F. (2013). Experimental Study on the Impact of Harmonics on Transformer. *2013 IEEE 7th International Power Engineering and Optimization Conference (PEOCO)*, 686–690. <https://doi.org/10.1109/PEOCO.2013.6564634>
- Soni, C. J., Gandhi, P. R., & Takalkar, S. M. (2015). Design and analysis of 11 KV Distribution System using ETAP Software. *2015 International Conference on Computation of Power, Energy, Information and Communication (ICCPEIC)*, 451–456.

<https://doi.org/10.1109/ICCPEIC.2015.7259526>

SPLN D5.004-1. (2012). Standar PT PLN (Persero). In *Power Quality (Regulasi Harmonisa, Flicker dan Ketidakseimbangan Tegangan)*. PT PLN (Persero) Jl. Trunojoyo Blok M-1/135, Kebayoran Baru Jakarta Selatan 12160.

Suwanda, I. (2019). Kajian Gangguan Harmonisa dan Simulasi Perbaikan Sistem Kelistrikan Di Gedung Rektorat Politeknik Negeri Ketapang. *Energi & Kelistrikan: Jurnal Ilmiah*, 11(2), 114–128. <https://doi.org/https://doi.org/10.33322/energi.v11i2.840>

Tomy, G., & Menon, D. (2016). Power Quality Improvement Strategy for Non-linear Load in Single Phase System. *2016 International Conference on Electrical, Electronics, and Optimization Techniques (ICEEOT)*, 3489–3492. <https://doi.org/10.1109/ICEEOT.2016.7755353>