

Volume 06 No 01, Tahun 2021: Hal. 54-62.

Copyright © 2016 Jurnal Fokus Elektroda Jurnal Fokus Elektroda: Energi Listrik,

Telekomunikasi, Komputer, Elektronika dan Kendali)

Teknik Elektro Universitas Halu Oleo Kendari Sulawesi Tenggara,

e-ISSN: 2502-5562. Open Access at: http://ojs.uho.ac.id/index.php/jfe/

Analisis *Total Harmonic Distortion* (THD) dan Arus Harmonik Akibat Penggunaan Lampu Hemat Energi (LHE) dan *Light-Emitting Diode* (LED) secara Kolektif Pada Jaringan Tegangan Rendah

Eva Magdalena Silalahi¹, Bambang Widodo², Robinson Purba³

¹ Dosen Program Studi Teknik Elektro, FT UKI Jakarta, ² Dosen Program Studi Teknik Elektro, FT UKI Jakarta, ³ Dosen Program Studi Teknik Elektro, FT UKI Jakarta

eva.silalahi@uki.ac.id

Correspondent Author: Eva Magdalena Silalahi

Abstract — Currently, people are increasingly using energy saving lamp (LHE) and LED because of their energy saving and low power consumption. But the use of LHE and LED in large quantities can reduce the quality of electric power. This is because LHE and LED are classified as non-linear loads which are a source of harmonic distortion for low-voltage power lines. Harmonic distortion occurs due to non-linear load currents that experience distortion or defects. Based on this, this study aims to investigate the effect of the collective use of LHE and LEDs on the quality of electrical power, such as: harmonic levels, power factor, and the resulting harmonic current and voltage waveforms. The results of this study indicate that the simultaneous use of LHE and LED with a total of 60 pieces causes distortion of the current waveform with THDi of 63.97% exceeding the standard value of IEEE Std 519-2014, with dominant harmonic currents in the 3rd order with a THDi of 74% and order 5 with a THDi of 37.6% and a THDv value of 2.44%, still below the 5.0% standard of IEEE Std 519-2014. This high THDi value has a negative impact on the low PF value of 0.722, which does not meet the power factor requirements of ≥ 0.85 according to PLN standards. And if the true power factor (TPF) value is calculated, the TPF value is 0.608 which is lower than the PF value of 0.722. The results obtained from the Matlab simulation show conformity to the results obtained from experimental measurements in the laboratory, namely: the simulated harmonic approximates the measured harmonic waveform.

Keyword — harmonic current, waveform, power factor, IEEE Std 519-2014, THD.

Abstrak — Saat ini masyarakat semakin banyak menggunakan LHE dan LED karena hemat energi dan konsumsi daya yang rendah. Tetapi penggunaan LHE dan LED dalam jumlah yang besar dapat menurunkan kualitas daya listrik. Hal ini dikarenakan LHE dan LED tergolong beban non-linier yang merupakan sumber distorsi harmonik bagi jaringan listrik tegangan rendah. Distorsi harmonik muncul akibat arus beban non-linier yang mengalami distorsi atau cacat. Berdasarkan hal tersebut, maka penelitian ini bertujuan untuk menyelidiki pengaruh dampak penggunaan secara kolektif LHE dan LED terhadap kualitas daya listrik, seperti: tingkat harmonisa, faktor daya, serta bentuk gelombang arus dan tegangan harmonik yang dihasilkan. Hasil penelitian ini memperlihatkan bahwa penggunaan secara bersamaan LHE dan LED dengan jumlah 60 buah menimbulkan distorsi bentuk gelombang arus dengan THDi sebesar 63,97% melebihi nilai standar IEEE Std 519-2014, dengan arus harmonik dominan pada orde ke-3 dengan THDi 74% dan orde ke-5 dengan THDi 37,6% dan nilai THDv 2,44%, masih dibawah standar 5,0% dari IEEE Std 519-2014. Tingginya nilai THDi ini berdampak buruk pada

rendahnya nilai PF 0,722, yang tidak memenuhi syarat faktor daya ≥ 0,85 menurut standar PLN. Dan bila dihitung nilai faktor daya sebenarnya, TPF diperoleh nilai TPF 0,608 lebih rendah dari nilai PF 0,722. Hasil yang diperoleh dari simulasi Matlab menunjukan kesesuaian dengan hasil yang diperoleh dari pengukuran secara eksperimental di laboratorium, yaitu: bentuk gelombang harmonik hasil simulasi mendekati bentuk gelombang harmonik hasil pengukuran.

Kata kunci — arus harmonik, bentuk gelombang, faktor daya, IEEE Std 519-2014, THD.

I. PENDAHULUAN

Saat ini masyarakat semakin banyak menggunakan LHE dan LED karena hemat energi dan konsumsi daya yang rendah. Tetapi penggunaan LHE dan LED dalam jumlah yang besar dapat menurunkan kualitas daya listrik. Hal ini karena LHE dan LED tergolong beban non-linier yang merupakan sumber distorsi harmonik bagi jaringan listrik tegangan rendah. Distorsi harmonik timbul akibat arus beban non-linier tidak proporsional terhadap tegangan input, dimana gelombang tegangan input berbentuk sinusoidal sempurna, sedangkan bentuk gelombang arus yang dihasilkan mengalami distorsi atau cacat. Dengan menaikkan nilai tegangan beberapa persen, maka nilai arus akan naik dua kalinya dan akibatnya gelombang arus mengalami distorsi non-sinusoidal [1].

Masalah kualitas daya listrik akibat penggunaan LHE dan LED secara bersamaan dievaluasi dengan mengukur faktor daya (power factor, PF) yang didefinisikan sebagai perbandingan daya aktif (dalam watt) terhadap daya nyata (dalam VA) dan THD, istilah yang digunakan untuk mengukur sifat non-sinusoidal dari bentuk gelombang. THD adalah perbandingan dari nilai efektif (root mean square, rms) dari semua frekuensi non-fundamental terhadap nilai efektif pada frekuensi dasar [2].

Berdasarkan hasil penelitian yang berjudul "Compact Fluorescence Lamp Based on Power Electronics Technology: Its Advantages and Disadvantages" (2019), yang dilakukan oleh Nana Heryana, Handoko Rusiana Iskandar, Bambang Widodo, dan Robinson Purba dari Magister Teknik Elektro, Universitas Kristen Indonesia,

yang melakukan pengukuran pada beban lampu *CFL* berbeda jenis, dengan kesimpulan bahwa THD yang dihasilkan oleh beban lampu tersebut sekitar 63,8%-72.0%. Hasil ini tidak memenuhi standar batas harmonik IEEE Std. 519-1992 dengan batas maksimum harmonisa arus sebesar 5% [3].

Mengacu pada hasil penelitian tersebut, maka penelitian ini dilakukan berdasarkan pada serangkaian pengukuran untuk mengukur dampak LHE dan LED pada kualitas daya listrik, terutama pada distorsi bentuk gelombang arus dan tegangan. Data penting tentang bentuk gelombang arus harmonik dan tegangan harmonik termasuk nilai distorsi harmonik dari setiap orde ganjil harmonik, serta nilai efektif arus dan tegangan harmonik, dan sudut fasa untuk setiap orde ganjil harmonik, diperoleh dalam penelitian ini.

Tujuan penelitian ini untuk menyelidiki pengaruh dampak kolektif dari penggunaan LHE dan LED terhadap kualitas daya listrik, seperti: faktor daya, tingkat harmonisa yang dihasilkan, serta bentuk gelombang arus harmonik dan tegangan harmonik yang dihasilkan oleh penggunaan LHE dan LED dalam kondisi nyala bersamaan pada sistem instalasi listrik tegangan rendah 220 volt satu fasa.

Selanjutnya, berdasarkan data hasil pengujian laboratorium tersebut, dilakukan simulasi Matlab terhadap bentuk gelombang arus harmonik dan tegangan harmonik dan hasilnya dianalisis lebih lanjut.

II. TEORI DASAR

2.1. Masalah Kualitas Daya Listrik [4]

listrik Kualitas daya merupakan upaya mempertahankan bentuk gelombang sinusoidal tegangan dan arus sesuai dengan besarnya pada frekuensi dasar pada sistem distribusi daya listrik. Setiap masalah kualitas daya listrik seperti: distorsi tegangan, arus, atau frekuensi dapat menimbulkan kerusakan atau kesalahan pengoperasian peralatan listrik. Selain itu, kualitas daya listrik dipengaruhi oleh jenis beban yang digunakan oleh konsumen misalnya penggunaan LED dan LHE, televisi elektronik dan sebagainya. Beban yang digunakan oleh konsumen tersebut termasuk jenis beban non-linier yang menarik arus jala-jala dengan mengubah bentuk gelombang arus sinusoidal menjadi bentuk gelombang arus non-sinusoidal atau bentuk gelombang yang mengalami distorsi.

a. Beban linier

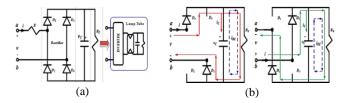
Beban linier merupakan beban yang menarik arus yang sebanding terhadap tegangan yang diberikan dengan impedansi yang konstan sepanjang periode bolak-balik. Beban linier dapat diklasifikasikan sebagai berikut:

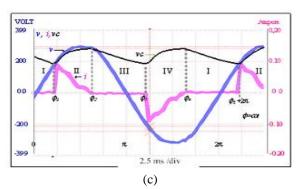
- 1. beban yang bersifat resistif (lampu pijar, pemanas elektrik),
- 2. beban bersifat kapasitif (beban yang memakai kapasitor pada peralatan listrik),

 beban bersifat induktif (transformator, motor-motor listrik tanpa pengaturan elektronik) dan juga kombinasi beban tersebut.

b. Beban non-linier

Sedangkan beban non-linier akan menarik arus beban yang tidak sebanding terhadap tegangan yang diberikan dengan impedansi yang berubah sepanjang periode bolakbalik. Dengan kata lain, beban ini memiliki bentuk gelombang arus yang tidak sinusoidal sepanjang periode bolak-balik. Pada Gambar 1(a) merupakan contoh rangkaian pada beban non linier dari lampu compact fluorescent lamp (CFL atau LHE), Gambar 1(b) merupakan siklus arus bolak balik yang mengalir pada rangkaian dan Gambar 1(c) menunjukkan bentuk gelombang yang dihasilkan tidak sinusoidal atau terdistorsi.





Gambar 1. Dua contoh beban non-linier [3].

2.2. Analisis Harmonik Menggunakan Deret Fourier [5]

Analisis harmonik merupakan proses untuk menentukan besaran, orde dan fasa dari beberapa harmonisa yang muncul dalam gelombang periodik kompleks.

Untuk melakukan analisis harmonik, dapat menggunakan metode analitikal dan grafis berdasarkan analisis deret Fourier.

Fungsi f(t) dapat menyatakan bentuk gelombang tegangan atau arus. Menurut teorema Fourier, fungsi f(t) ini dapat dinyatakan dalam bentuk persamaan trigonometri deret takberhingga pada persamaan (1).

$$f(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos n\omega_0 t + b_n \sin n\omega_0 t)$$
 (1)

Dengan mensubstitusikan $\omega_0 t = \theta$ ke dalam persamaan (1), sehingga diperoleh persamaan (2) berikut ini:

$$f(\theta) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos n\theta + b_n \sin n\theta)$$
 (2)

Karena $\omega_0 = 2\pi/T$, maka persamaan (1) diatas dapat dituliskan sebagai persamaan (3) berikut ini:

$$f(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} \left(a_n \cos \frac{2\pi n}{T} t + b_n \sin \frac{2\pi n}{T} t \right)$$
 (3)

dimana ω_0 adalah frekuensi sudut fundamental, T adalah periode dan a_0 , a_n dan b_n adalah konstanta yang nilainya bergantung pada n dan f(t). Selanjutnya, proses untuk menentukan nilai konstanta a_0 , a_n dan b_n disebut Analisis Fourier.

Terlihat dari deret Fourier di atas, bahwa fungsi periodik terdiri dari komponen sinusoidal frekuensi 0, ω_0 , $2\omega_0$ $n\omega_0$. Hal ini merepresentasikan fungsi f(t) dalam domain frekuensi. Komponen pertama a_0 dengan frekuensi nol disebut komponen dc. Suku sinus dan kosinus dalam fungsi f(t) mewakili harmonisa. Angka n melambangkan urutan orde harmonik.

Bila n = 1, maka komponen $(a_1 \cos \omega_0 t + b_1 \sin \omega_0 t)$ disebut harmonik ke-1 atau komponen frekuensi dasar dari bentuk gelombang.

Bila n = 2, maka komponen $(a_2 \cos 2\omega_0 t + b_2 \sin 2\omega_0 t)$ disebut harmonik ke-2 dari bentuk gelombang.

Harmonik ke-n dari bentuk gelombang dinyatakan dengan $(a_n \cos n\omega_0 t + b_n \sin n\omega_0 t)$. Harmonik ke-n ini memiliki frekuensi $n\omega_0$ yaitu n kali frekuensi dari komponen harmonik ke-1 atau frekuensi dasar.

2.3. Total Harmonic Distortion (THD)

Dalam penelitian ini, digunakan *Total Harmonic Distortion* (THD) yaitu perbandingan antara nilai *root mean square* (*rms*) atau nilai efektif dari orde arus atau tegangan harmonik terhadap nilai efektif (*rms*) dari arus atau tegangan pada frekuensi dasar, yang dinyatakan dalam persentase sesuai persamaan (4):

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{h=\infty} M_h^2}}{M_1} \tag{4}$$

dimana.

M_h adalah nilai efektif (*rms*) dari orde harmonik ke-h dari besaran M (besaran M seperti arus dan tegangan).

 M_1 adalah nilai efektif dari besaran M pada frekuensi dasar seperti arus dan tegangan. Nilai efektif (rms) sendiri dapat diperoleh jika diketahui nilai efektif besaran M orde harmonik pertama dan nilai THD orde pertama sesuai persamaan (5):

nilai
$$rms = \sqrt{\sum_{h=1}^{h=\infty} M_h^2} = M_1 \sqrt{1 + THD^2}$$
 (5)

Besaran THD arus harmonik dapat dihitung menggunakan persamaan (6):

$$THD_{I} = \frac{\sqrt{I_{2}^{2} + I_{5}^{2} + \dots + I_{n}^{2}}}{I_{4}} \times 100\%$$
(6)

dimana In adalah nilai efektif arus harmonik orde ke-n.

Besaran THD tegangan harmonik dapat dihitung menggunakan persamaan (7):

$$THD_V = \frac{\sqrt{V_2^2 + V_5^2 + \dots + V_n^2}}{V_4} \times 100\%$$
 (7)

dimana V_n adalah nilai efektif tegangan harmonik orde ke-n.

2.4. Faktor Daya [6]

Pada tegangan dan arus sinusoidal murni, daya rata-rata (atau daya aktif rata-rata sebenarnya), dinyatakan dalam persamaan (8).

$$P_{\text{avg}} = \frac{1}{2} V_m I_m \cos \theta \tag{8}$$

$$P_{\text{ave}} = V_{\text{rms}} I_{\text{rms}} \cos \theta \tag{9}$$

dimana:

 $\cos \theta$ adalah faktor daya (PF)

$$PF = \cos \theta = \frac{P}{S} \tag{10}$$

Demi kesederhanaan dalam notasi, persamaan (9) dapat dinyatakan dalam persamaan (11):

$$P = VI\cos\theta \tag{11}$$

Faktor daya 'mendahului' ketika arus mendahului tegangan dan 'tertinggal' ketika arus tertinggal terhadap tegangan.

Faktor daya dapat ditentukan dari persamaan (12) dan persamaan (13) disebut faktor daya sebenarnya (*true power factor*, TPF). Selain itu, TPF dapat dinyatakan sebagai persamaan (12) dan persamaan (13).

$$TPF = \frac{P}{S_{\text{mas}}} = \frac{P}{S_1} \times \frac{1}{\sqrt{1 + \text{THD}_V^2} \sqrt{1 + \text{THD}_I^2}}$$
(12)

$$TPF = PF \times DPF \tag{13}$$

$$DPF = \frac{1}{\sqrt{1 + THD_V^2} \sqrt{1 + THD_I^2}}$$
 (14)

dimana:

PF = P/S1 adalah faktor daya.

DPF adalah faktor daya distorsi (distortion power factor).

III. METODE PENELITIAN

3.1. Umum

Metodologi yang digunakan dalam penelitian ini mengenai analisa bentuk gelombang harmonisa arus dan tegangan yang dihasilkan oleh lampu hemat energi LHE dan LED yaitu metode penelitian kuantitatif dengan melakukan pengujian eksperimental pada penggunaan 60 buah LHE dan LED dalam kondisi nyala bersamaan, dengan dua merek lampu berbeda yang banyak digunakan masyarakat di Indonesia, pada tingkat daya aktif Watt dan pencahayaan tertentu di Laboratorium Teknik Elektro, Fakultas Teknik UKI, Cawang, Jakarta.

3.1.1. Standar Harmonik

Standar harmonik IEEE Std 519-2014 [7] menetapkan dua kriteria standar untuk mengevaluasi distorsi harmonik, yaitu standar untuk arus harmonik dan standar untuk tegangan harmonik. Standar arus harmonik, ditentukan oleh rasio I_{sc}/I_L . I_{sc} yang merupakan arus hubung singkat maksimum pada titik PCC (Point of Common Coupling), sedangkan I_L merupakan arus beban maksimum pada frekuensi dasar. Dan standar tegangan harmonik berdasarkan tegangan sistem yang digunakan yang mengacu pada IEEE Std 519-2014. Seperti diperlihatkan pada Tabel 1 dan Tabel 2 berikut, merupakan standar IEEE Std 519-2014 untuk arus harmonik dan tegangan harmonik.

TABEL 1 STANDAR ARUS HARMONIK UNTUK BEBAN NON-LINIER PADA TITIK *POINT OF COMMON COUPLING* (*PCC*) UNTUK TEGANGAN 120 V HINGGA 69 KV

Maximum harmonic current distortion in percent of $I_{\rm L}$ Individual harmonic order (odd harmonics) $^{{ m a. b}}$						
						$I_{\rm SC}/I_{\rm L}$
< 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

TABEL 2 STANDAR TEGANGAN HARMONIK UNTUK BEBAN NON-LINIER PADA TITIK PCC

Bus voltage V at PCC	Individual harmonic (%)	Total harmonic distortion THD (%)
V ≤ 1.0 kV	5.0	8.0
1 kV < V ≤ 69 kV	3.0	5.0
69 kV < V ≤ 161 kV	1.5	2.5
161 kV < V	1.0	1.5ª

3.1.2. Waktu dan Tempat Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan di Laboratorium Teknik Elektro, Prodi Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Kristen Indonesia. Penelitian ini dilakukan tanpa menggunakan peralatan *ac voltage stabilizer* dikarenakan sumber tegangan dari PLN dijamin bebas dari efek harmonisa. Waktu pelaksanaan penelitian ini dimulai pada bulan Januari hingga Juni 2020.

3.1.3. Alat Ukur dan Spesifikasi LHE dan LED

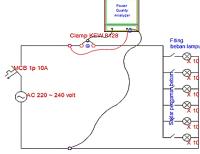
Berikut data alat ukur harmonisa dan spesifikasi LHE dan LED yang digunakan dalam penelitian ditabulasi dalam Tabel 3.

TABEL 3
ALAT UKUR DAN SPESIFIKASI LHE DAN LED YANG
DIGUNAKAN DALAM PENELITIAN

DIGUNARAN DALAWI LINELITIAN					
Nama Alat & Bahan	Merk	Spesifikasi	Jumlah (pcs)	Total Watt	
Power Quality Analyzer (PQA)	Kyoritsu	KEW 6315 ver. 1.60 Clamp KEW 8128 5000mA ~ 50A (max)	1 unit		
Lampu	Hannochs	8 W	5	40	
Hemat		18 W	5	90	
Energi		23 W	5	115	
(LHE)	Philips	8 W	5	40	
		18 W	5	90	
		23 W	5	115	
LED (Light	Hannochs	9 W	5	45	
Emitting		16 W	5	80	
Diode)		20 W	5	100	
	Philips	8 W	5	40	
		14,5 W	5	72,5	
		19 W	5	95	
	Total 60 922,5				

3.2. Metode pengambilan data

Dalam metode pengambilan data, data yang akan diambil seperti: besar arus I (A), tegangan V (volt), P (Watt), Q (VAR), S (VA), faktor daya (FD), THD arus maupun tegangan. Pengujian ini dilakukan pada gabungan 60 buah lampu LHE dan LED dengan merek yang sama daya yang berbeda beda, dimana semua lampu tersebut dinyalakan secara bersamaan. Pada kombinasi LHE-LED, pengukuran ini dilakukan untuk memperoleh besaran amplitudo dan sudut fasa masing-masing orde arus dan tegangan harmonik, dengan rangkaian pengujian dihubungkan secara paralel sesuai Gambar 2.



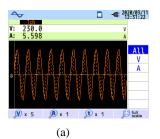
Gambar 2. Gambar rangkaian pengujian LHE dan LED [8].

Dalam penelitian ini, dilakukan pengujian pada 60 buah LHE dan LED dengan kombinasi besaran daya yang bervariasi dan dua merek lampu yang berbeda, dinyalakan secara bersamaan.

IV. ANALISIS HASIL PENELITIAN

4.1. Hasil Penelitian

Pengukuran eksperimental dilakukan dengan menggunakan PQA KEW 6315, dan alat ukur arus clamp model 8128 (5A-50A). Parameter utama yang diukur dalam pengujian ini adalah: V_{rms} (V), I_{rms} (mA), P (W), Q (VAR), S (VA), f (Hz), FD, tegangan harmonik THDv (%), arus harmonik THDi (%), serta amplitudo dan sudut fasa masingmasing arus harmonik dan tegangan harmonik dari orde 1 hingga orde 25 yang diukur.

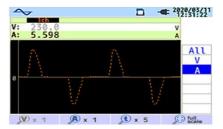




Gambar 3. (a). Bentuk gelombang arus harmonik (garis putusputus) dan tegangan harmonik (garis kontinyu) pada gabungan 60 buah LHE dan LED nyala bersamaan; (b). Diagram spektrum arus harmonik dari orde ke-1 hingga orde ke-50.

THDi pada gambar 3(b), dengan arus harmonik dominan pada orde ke-3 dan orde ke-5, selanjutnya menurun dari orde ke-7, ke-9 hingga ke-11, dengan nilai THDi sebesar 63,97%, melebihi nilai standar IEEE Std 519-2014, dimana standar THD arus untuk orde harmonisa $3 \le h < 11$ sebesar 4,0%. Berikut besaran THDi orde ke-3 hingga orde ke-11 yang diperoleh dari hasil pengukuran:

Orde	THDi (%)	I _{rms} (A)
3	74	3,103 ∠133°
5	37,6	1,566 ∠-81,6°
7	8,3	0,347 ∠38,1°
9	8,7	0,378 ∠74,9°
11	7,7	0,321 ∠-144 °



Gambar 4. Bentuk gelombang arus harmonik pada gabungan 60 buah LHE dan LED nyala bersamaan.



Gambar 5. (a). Spektrum THD tegangan pada gabungan 60 buah LHE dan LED nyala bersamaan; (b). Diagram fasor beda sudut antara tegangan dan arus.

TABEL 4 HASIL PENGUKURAN NILAI EFEKTIF DARI ARUS HARMONIK DAN TEGANGAN HARMONIK YANG DIHASILKAN OLEH 60 BUAH LHE DAN LED NYALA

	BERSAMAAN						
Orde	V _{rms} (volt)	THDv (%)	$\Phi_{v}\left(^{0}\right)$	I _{rms} (A)	THDi (%)	$\theta_{i}(^{0})$	
1	229.7	100	0	4,203	100	-15,3	
3	4	1,7	-49,1	3,103	74	133	
5	4	1,7	114,9	1,566	37,6	-81,6	
7	0,7	0,3	-139,2	0,347	8,3	38,1	
9	0,3	0,1	171,5	0,378	8,7	74,9	
11	0,7	0,3	-4,6	0,321	7,7	-144	
13	0,1	0	-154,1	0,047	1,2	0,9	
15	0	0	-60,2	0,119	2,7	-10,5	
17	0	0	-56,3	0,114	2,6	165,1	
19	0	0	-52,4	0,089	2	12,7	
21	0	0	-48,5	0,064	1,5	-157,4	
23	0	0	-44,6	0,022	0,5	139,1	
25	0	0	-40,7	0,097	2,3	-35,3	

TABEL 5 BESARAN PARAMETER UTAMA HASIL PENGUKURAN HARMONISA PADA PENGGUNAAN 60 BUAH LHE DAN LED NYALA BERSAMAAN

P	Pengukuran gabungan 60 buah LHE + LED nyala bersamaan						TI	HD
f (Hz)	P (W)	S (VA)	Q (VAR)	V _{rms} (volt)	I _{ms} (mA)	PF	THDv (%)	THDi (%)
49,95	939	1299	-898	230,1	5650	-0,722	2,44	63,97

Berdasarkan data dalam Tabel 5, maka diperoleh hasil perhitungan sebagai berikut:

$$V_{max} = 230.1 \times \sqrt{2} = 325.41 \text{ V}$$

$$I_{max} = 5.65 \times \sqrt{2} = 7.99 \text{ A}$$

$$P = 230.1 \times 5.65 \times 0.722 = 938.6 \text{ W}$$

$$S = 230.1 \times 5.65 = 1300.1 \text{ VA}$$

$$Q = 230.1 \times 5.65 \times \sin((-0.722)) = 899.5 \text{ VAR}$$

Berdasarkan persamaan (13) dan persamaan (14) dengan PF = 0,722 sesuai Tabel 5, diperoleh nilai DPF dan TPF berikut:

$$DPF = \frac{1}{\sqrt{1 + (0.0244^2)} \sqrt{1 + (0.6397^2)}} = 0.842$$

$$TPF = 0.722 \times 0.842 = 0.608$$

Nilai faktor daya sebenarnya, TPF = 0,608 lebih rendah dari nilai PF = 0,722 hasil pengukuran untuk penggunaan bersama 60 buah LHE dan LED nyala serentak dipasang secara paralel. Rendahnya nilai TPF ini sangat dipengaruhi nilai DPF dengan nilai arus harmonik THDi 63,97% yang tinggi. Berdasarkan hal ini dapat ditarik kesimpulan bahwa arus harmonik yang tinggi menurunkan nilai PF. Nilai faktor daya sebenarnya TPF 0,608 ini menunjukkan hanya sekitar 60,8% energi listrik yang diubah menjadi cahaya.

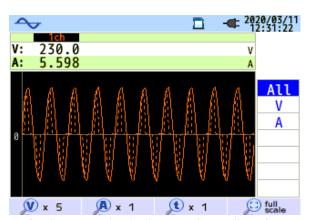
Dan nilai faktor daya hasil pengukuran, PF sebesar 0,722, tidak memenuhi syarat faktor daya \geq 0,85 menurut standar PLN [8].

Berdasarkan data Tabel 5, THD tegangan harmonik pada gabungan 60 buah LHE dan LED yang diukur menggunakan PQA adalah 2,44%, masih dibawah nilai 5,0% sesuai batas standar IEEE Std 519-2014 untuk tegangan bus $V \le 1,0$ kV.

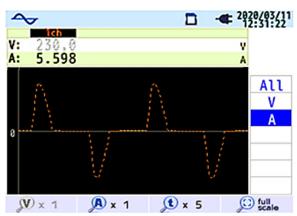
Dari Tabel 4 diatas, nilai THDv orde ke-3 sebesar 1,7% menurun hingga THDv orde ke-11 sebesar 0,3% dan orde selanjutnya bernilai nol. Hal ini juga dipengaruhi oleh sumber tegangan AC dari PLN bebas dari harmonisa.

Nilai THDi sebesar 63,97%, melebihi batas standar IEEE Std 519-2014. THD arus yang dominan sesuai Gambar 10(b) dan Tabel 4 yaitu THDi orde ke-3 sebesar 74% dan THDi orde ke-5 sebesar 37,6%, yang selanjutnya turun pada orde ke-7 menjadi 8,3%.

4.2. Analisis dan Simulasi Bentuk Gelombang Arus dan Tegangan



Gambar 6. Bentuk gelombang arus harmonik (garis putusputus) dan tegangan harmonik (garis kontinyu) hasil pengukuran menggunakan *PQA* pada gabungan 60 buah LHE dan LED nyala bersamaan.



Gambar 7. Bentuk gelombang arus hasil pengukuran pada gabungan seluruh 60 buah LHE dan LED nyala bersamaan.

Berdasarkan hasil pengukuran pada Tabel 4, maka selanjutnya ditentukan persamaan gelombang arus harmonik kelipatan ganjil dari orde ke-1 sampai orde ke-25 dan persamaan gelombang tegangan harmonik kelipatan ganjil dari orde ke-1 sampai orde ke-13 (karena mulai orde ke-15 dan seterusnya, nilai $V_{\rm rms}=0$).

TABEL 6
PERHITUNGAN KOMPONEN DERET FOURIER
BERDASARKAN ORDE ARUS HARMONIK

Orde	I _{rms} (A)	i(t) komponen harmonik
1	4,203 ∠-15,3 °	5,944 sin(ωt – 0,267)
3	3,103 ∠133°	4,388 sin(3ωt + 2,321)
5	1,566 ∠-81,6 °	2,215 sin(5ωt – 1,424)
7	0,347 ∠38,1 °	0,491 sin(7ωt + 0,665)
9	0,378 ∠74,9°	0,535 sin(9ωt + 1,307)
11	0,321 ∠-144 °	0,454 sin(11ωt – 2,513)
13	0,047 ∠0,9 °	0,066 sin(13ωt + 0,016)
15	0,119 ∠-10,5 °	0,168 sin(15ωt – 0,183)
17	0,114 ∠165,1 °	0,161 sin(17ωt + 2,882)
19	0,089 ∠12,7 °	$0,126 \sin(19\omega t + 0,222)$
21	0,064 ∠ -157,4°	0,091 sin(21ωt – 2,747)
23	0,022 ∠139,1 °	0,031 sin(23ωt + 2,428)
25	0,097 ∠-35,3 °	0,137 sin(25ωt – 0,616)

Dengan menerapkan aturan simetris gelombang, maka secara otomatis pengembangan deret Fourier pada bentuk gelombang arus harmonik memperlihatkan:

- suku *cosinus* tidak ada karena bentuk gelombangnya ganjil, f(-t) = -f(t), sehingga $a_n = 0$.
- komponen dc nol, $a_0 = 0$ dan tidak ada harmonik orde genap karena bentuk gelombangnya simetris setengah gelombang, $f(t \pm T/2) = -f(t)$.

Selanjutnya, berdasarkan Tabel 6 diatas, maka diperoleh persamaan gelombang arus harmonik untuk orde ke-1 sampai orde ke-25, yaitu:

 $i(t) = 5,944 \sin(\omega t - 0,267) + 4,388 \sin(3\omega t + 2,321) + 2,215 \sin(5\omega t - 1,424) + 0,491 \sin(7\omega t + 0,665) + 0,535 \sin(9\omega t + 1,307) + 0,454 \sin(11\omega t - 2,513) + 0,066 \sin(13\omega t + 0,016) + 0,168 \sin(15\omega t - 0,183) + 0,161 \sin(17\omega t + 2,882) + 0,126 \sin(19\omega t + 0,222) + 0,091 \sin(21\omega t - 2,747) + 0,031 \sin(23\omega t + 2,428) + 0,137 \sin(25\omega t - 0,616) (ampere)$

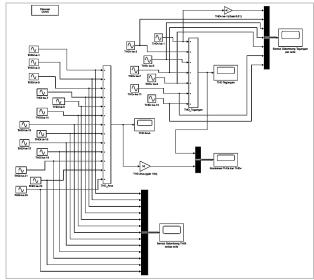
TABEL 7
PERHITUNGAN KOMPONEN DERET FOURIER
BERDASARKAN ORDE TEGANGAN HARMONIK

Orde	V _{rms} (volt)	i(t) komponen harmonik
1	229,7 ∠0°	324,845 sin ωt
3	4,0 ∠-49 ,1°	5,657 sin(3ωt – 0,857)
5	4,0 ∠114,9 °	5,657 sin(5ωt + 2,005)
7	0,7 ∠-139,2°	0,990 sin(7ωt – 2,429)
9	0,3 ∠171,5°	0,424 sin(9ωt + 2,993)
11	0,7 ∠-4,6 °	0,990 sin(11ωt – 0,080)
13	0,1 ∠-154,1 °	0,141 sin(13ωt – 2,690)

Selanjutnya, berdasarkan Tabel 7 diatas, maka diperoleh persamaan gelombang tegangan harmonik untuk orde ke-1 sampai orde ke-13, yaitu:

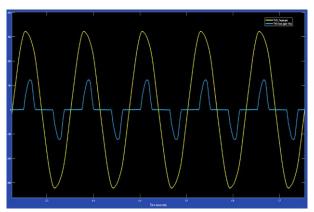
$$v(t) = 324,845 \sin \omega t + 5,657 \sin(3\omega t - 0,857) + 5,657 \sin(5\omega t + 2,005) + 0,990 \sin(7\omega t - 2,429) + 0,424 \sin(9\omega t + 2,993) + 0,990 \sin(11\omega t - 0,080) + 0,141 \sin(13\omega t - 2,690) \text{ (volt)}$$

Selanjutnya, dilakukan simulasi Matlab pada persamaan gelombang arus harmonik untuk orde ke-1 sampai orde ke-25 dan pada persamaan gelombang tegangan harmonik untuk orde ke-1 sampai orde ke-13, dengan rangkaian uji simulasinya ditunjukkan pada Gambar 8.



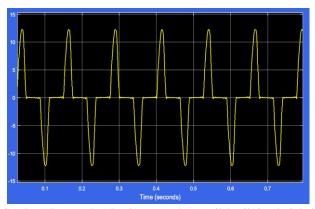
Gambar 8. Rangkaian simulasi Matlab/Simulink untuk bentuk gelombang setiap orde arus dan tegangan harmonik.

Berikut hasil simulasi Matlab menggunakan persamaan bentuk gelombang harmonisa dari arus dan tegangan yang dihasilkan dari gabungan 60 buah LHE dan LED dalam kondisi nyala bersamaan, seperti yang diperlihatkan dalam Gambar 9, Gambar 10, Gambar 11, Gambar 12 dan Gambar 13 berikut ini.



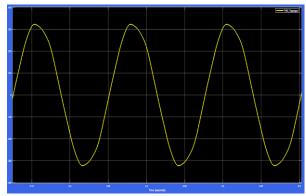
Gambar 9. Bentuk gelombang harmonik dari arus dan tegangan hasil simulasi untuk gabungan 60 buah LHE dan LED (tegangan berwarna kuning, arus berwarna biru dengan faktor *gain* 10x).

Hasil simulasi pada Gambar 9, memperlihatkan bentuk gelombang tegangan (garis putus-putus warna kuning) dan bentuk gelombang arus (garis warna biru) dimana besaran arus dikalikan faktor *gain* 10x, yang memiliki bentuk mirip dengan hasil pengukuran menggunakan alat ukur *PQA*.



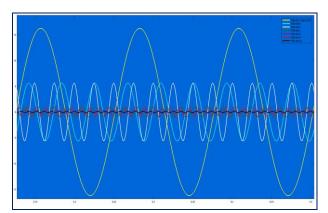
Gambar 10. Bentuk gelombang arus harmonik hasil simulasi dari gabungan enam puluh buah LHE dan LED nyala bersamaan.

Hasil simulasi pada Gambar 10, memperlihatkan bentuk gelombang arus (garis warna kuning), yang memiliki bentuk mirip dengan hasil pengukuran.



Gambar 11. Bentuk gelombang tegangan harmonik hasil simulasi untuk gabungan enam puluh buah LHE dan LED nyala bersamaan.

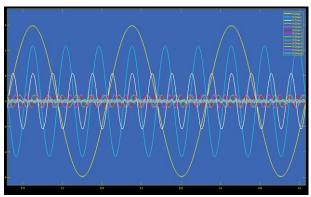
Hasil simulasi pada Gambar 11, memperlihatkan bentuk gelombang tegangan (garis warna kuning) yang dihasilkan oleh gabungan 60 buah LHE dan LED dalam kondisi nyala bersamaan, yang memiliki bentuk gelombang sinusoidal, dimana hasil pengukuran memperlihatkan THD tegangan rendah sebesar 2,44%, dibawah batas standar 5,0% dari IEEE Std 519-2014.



Gambar 12. Bentuk gelombang harmonisa tegangan hasil simulasi untuk gabungan enam puluh LHE dan LED nyala serentak, dengan gelombang tegangan frekuensi dasar berwarna kuning, dari orde ganjil ke-1 hingga orde ke-13.

Hasil simulasi pada Gambar 12, memperlihatkan hasil berikut ini:

- a. Garis warna kuning merupakan bentuk gelombang tegangan harmonik frekuensi dasar (orde ke-1) dengan besaran tegangan 229,7∠0 do volt, dimana THDv 2,44%.
- b. Garis warna biru, merupakan bentuk gelombang tegangan harmonik orde ke-3 yang dominan pertama, dengan THDi 1,7% atau 4,0∠-49,1° volt.
- c. Garis warna putih, merupakan bentuk gelombang tegangan orde harmonik ke-5 yang dominan kedua, dengan THDi 1,7% atau 4,0∠114,9° volt.



Gambar 13. Bentuk gelombang arus harmonik hasil simulasi untuk gabungan enam puluh LHE dan LED nyala serentak, dengan gelombang arus frekuensi dasar berwarna kuning, mulai dari orde 1 hingga orde 25 (harmonisa ganjil).

Hasil simulasi pada Gambar 13, memperlihatkan hasil berikut ini:

- a. Garis warna kuning merupakan bentuk gelombang arus harmonik frekuensi dasar (orde ke-1) dengan besaran arus 4,203∠-15,3° ampere, dimana THDi 63,97%.
- b. Garis warna biru, merupakan bentuk gelombang arus harmonik orde ke-3 yang dominan pertama, dengan THDi 74% atau 3,103∠133^a ampere.
- c. Garis warna putih, merupakan bentuk gelombang arus harmonik orde ke-5 yang dominan kedua, dengan THDi 37,6% atau 1,566∠-81,6° ampere.

V. KESIMPULAN

Hasil penelitian ini memperlihatkan bahwa penggunaan secara bersamaan LHE dan LED dalam jumlah yang besar yaitu 60 buah LHE dan LED akan menimbulkan distorsi bentuk gelombang arus dengan total THDi sebesar 63,97% melebihi nilai standar IEEE Std 519-2014, dengan arus harmonik dominan pada orde ke-3 dengan THDi 74% dan orde ke-5 dengan THDi 37,6% dan nilai THDv 2,44%, masih dibawah standar 5,0% dari IEEE Std 519-2014.

Tingginya nilai THDi ini berdampak buruk pada rendahnya nilai PF 0,722, yang tidak memenuhi syarat faktor daya $\geq 0,85$ menurut standar PLN. Hasil perhitungan nilai faktor daya sebenarnya, diperoleh nilai TPF 0,608 lebih rendah dari nilai PF 0,722. Rendahnya nilai TPF ini sangat dipengaruhi nilai DPF dengan nilai arus harmonik THDi yang tinggi.

Hasil yang diperoleh dari simulasi Matlab/Simulink menunjukan kesesuaian dengan hasil yang diperoleh dari pengukuran secara eksperimental di laboratorium, yaitu:

a. bentuk gelombang arus harmonik hasil simulasi mendekati bentuk gelombang arus harmonik hasil pengukuran, dengan arus harmonik dominan pada orde ke-3 dengan THDi 74% dan orde ke-5 dengan THDi 37,6%. b. bentuk gelombang tegangan harmonik hasil simulasi mendekati bentuk gelombang tegangan harmonik hasil pengukuran, dengan tegangan harmonik dominan pada orde ke-3 dengan THDv 1,7% dan orde ke-5 dengan THDv 1,7% dan total THDv 2,44%, masih dibawah standar 5,0% dari IEEE Std 519-2014.

DAFTAR ACUAN

- [1] Mochamad Ashari, Prof., Ir., M.Eng., Ph.D., IPU., *Desain Konverter Elektronika Daya*. Penerbit Informatika, Bandung, 2017.
- [2] Abdeljelil Chammam, Brahim Mrabet, "Experimental Quantification of Current Harmonics Injected by Compact Fluorescent Lamps towards the Electrical Distribution Network", IEEE, 15th International Multi-Conference on Systems, Signals & Devices (SSD), 2018.
- [3] Nana Heryana, Handoko Rusiana Iskandar, Bambang Widodo, Robinson Purba,"Compact Fluorescence Lamp Based on Power Electronics Technology: Its Advantages and Disadvantages", JTERA (Jurnal Teknologi Rekayasa), 04(01), 99-108, 2019.
- [4] Fernando Jeremia Siahaan, Eva Magdalena Silalahi, Bambang Widodo, Robinson Purba, "Pengukuran Total Harmonic Distortion (THD) Terhadap Lampu Hemat Energi (LHE) dan Light Emitting Diode (LED)", Lektrokom: Jurnal Ilmiah Program Studi Teknik Elektro Volume 3, September 2020, ISSN:2686-1534, Fakultas Teknik, UKI, Jakarta, 2020.
- [5] Theraja, B.L., Theraja, A.K. 2005. A Textbook of Electrical Technology Volume I: Basic Electrical Engineering. S. Chand. Ram Nagar, New Delhi.
- [6] Gonen, Turan. 2014. *Electric Power Distribution Engineering Third Edition*. CRC Press, Taylor & Francis Group.
- [7] IEEE Std 159[™]-2014, "Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems", *IEEE Power and Energy Society*, USA: The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., 2014.
- [8] Peraturan Menteri ESDM No.28 Tahun 2016 tentang *Tarif Tenaga Listrik yang disediakan oleh PT. PLN (Persero)*, bagian Lampiran, mengenai ketentuan faktor daya ≥ 0,85.
- [9] A. Dolara, S. Leva, *Power Quality and Harmonic Analysis of End User Devices*. Journal Energies, 5453–5466, 2012.
- [10] George J. Wakileh, *Power Systems Harmonics: Fundamental*, *Analysis and Filter Design*. Springer, Berlin, 2001.