

ANALISIS KORELASI PEMBEBANAN LAMPU HEMAT ENERGI TERHADAP DISTORSI HARMONIK

ANALYSIS OF THE CORRELATION BETWEEN THE LOAD OF ENERGY SAVING LAMP AND THE HARMONIC DISTORTION

Ahmad Rajani, Dalmasius Ganjar Subagio, Ridwan Arief Subekti,
Hendri Maja Saputra, Kusrandi

Pusat Penelitian Tenaga listrik dan Mekatronika, Lembaga Ilmu Pengetahuan Indonesia
Komplek LIPI Bandung, Jalan Cisit 21/154(d), Gedung 20, Lantai 2, Badung, Jawa Barat, Indonesia
Email : ahma065@lipi.go.id / rajani.el04@gmail.com

Diterima : 5 Juni 2017

Direvisi : 28 Juni 2017

Disetujui : 20 Juli 2017

ABSTRAK

Analisis korelasi pembebanan lampu hemat energi (LHE) terhadap distorsi harmonik yang ditimbulkan telah dilakukan. Penelitian ini dilakukan karena semakin meningkatnya penggunaan lampu hemat energi dan masih sering dijumpai kebiasaan masyarakat dalam membeli lampu hanya dengan mempertimbangkan faktor kebutuhan sesaat, ketersediaan, dan kemampuan finansial. Dalam suatu tempat tinggal, masyarakat biasanya menggunakan berbagai macam merek LHE dengan variasi daya yang berbeda-beda. Dengan kondisi yang demikian dan agar dapat mewakili kondisi riil masyarakat pada umumnya, maka dilakukan penelitian untuk mengetahui pengaruh dari penggunaan LHE dengan variasi merek dan daya terhadap distorsi harmonik yang dihasilkan. Pengujian distorsi harmonik dilakukan pada masing-masing lampu (pengujian individu) dan pengujian yang dihubungkan secara paralel dengan empat kombinasi pengukuran berdasarkan merek dan daya. Hasil yang diperoleh dari pengujian ini menunjukkan bahwa tidak ada korelasi antara daya dengan distorsi harmonik yang dihasilkan oleh LHE tersebut dan perubahan total distorsi harmonik arus (I-THD) dalam persen lampu lebih dominan disebabkan oleh merek yang berbeda.

Kata Kunci : harmonik, LHE, uji paralel.

ABSTRACT

Analysis of the correlation between the load of energy saving lamps (LHE) and the harmonic distortion has been studied. This research was conducted due to the increasing use of energy-saving lamps and habits of people in frequently buying lamps only by considering the factors of momentary needs, availability, and financial abilities. At a place of residence, the community usually use a variety of LHE brands with different power variations. With such conditions and in order to represent the real conditions of the community in general, it is necessary to conduct research to determine the effect of the use of LHE with brand variations and power on the harmonic distortion generated. Testing of the harmonic distortion was conducted on each lamp (individual testing) and that were connected in parallel with four combinations of measurements based on brand and power. The results showed that no significant correlation between power and harmonic distortion of LHE. Moreover, the LHE brand was the dominant factor influence the Total Harmonic Distortion Current (I-THD), in %.

Keywords: harmonics, LHE, power, parallel test.

PENDAHULUAN

Penggunaan lampu hemat energi (LHE) setiap tahun meningkat rata-rata 73,91% per tahun [1]. Hal ini karena konsumsi energi listrik LHE lebih rendah dibanding lampu pijar [2] dan juga memiliki umur yang lebih panjang dimana

LHE dapat digunakan selama 5.000 sampai 20.000 jam sedangkan lampu pijar hanya dapat digunakan sekitar 1.000 sampai 2.000 jam [3, 4]. Pemakaian LHE juga dapat menurunkan kerugian teknis maupun non teknis dalam sistem tenaga listrik [5].

Disamping memiliki keunggulan, LHE juga memiliki dampak negatif yaitu menimbulkan efek harmonik [6, 7]. Jenis lampu lain yang menimbulkan efek harmonik antara lain adalah lampu LED [8 - 10]. Diantara beberapa jenis lampu yang diuji, LHE merupakan lampu penghasil harmonik yang terbesar [10, 11]. Selain lampu, efek harmonik juga dapat ditimbulkan oleh peralatan sinkronisasi pada sistem pembangkit listrik tenaga matahari [12] dan juga peralatan integrasi antara pembangkit tenaga surya dan angin [13].

Efek harmonik ini memiliki dampak negatif pada sistem tenaga listrik, misalnya menyebabkan peningkatan tahanan pada penghantar/kabel akibat efek kulit dan efek kedekatan [6, 14] dan juga menurunkan kapasitas trafo distribusi [15].

Ada dua kriteria yang digunakan dalam analisis distorsi harmonik yaitu limitasi untuk distorsi arus harmonik dan limitasi untuk distorsi tegangan harmonik. Standar yang dipakai untuk limitasi tegangan harmonik adalah IEEE 519. Untuk standar harmonik arus, ditentukan oleh rasio ISC/IL (arus hubung singkat dibagi dengan arus beban) seperti yang terdapat pada Tabel 1 [16].

Tabel 1. Standar Harmonik Arus [16]

ISC/IL	Orde Harmonik					THD (%)
	< 11	11 - 16	17 - 22	23 - 24	> 35	
< 20	4	2	1,5	0,6	0,3	5
20 - 50	7	3,5	2,5	1	0,5	8
50 - 100	10	4,5	4	1,5	0,7	12
100 - 1000	12	5,5	5	2	1	15
>1000	15	7	6	2,5	1,4	20

Catatan :

ISC : arus hubung singkat pada PCC

IL : arus beban fundamental nominal

Sedangkan untuk standar harmonik tegangan ditentukan oleh tegangan sistem yang dipakai seperti yang terdapat pada Tabel 2 [16].

Tabel 2. Standar Harmonik Tegangan [16]

Sistem Tegangan	Distorsi Maksimum (%)	
	Harmonik Individu	Harmonik Total
< 69 kV	3	5
69 – 138 kV	1,5	2,5
> 138 kV	1	1,5

Beberapa penelitian telah dilakukan untuk mengetahui efek distorsi harmonik yang dihasilkan oleh LHE. Salah satu contoh penelitian tersebut adalah dengan mengukur harmonik yang ditimbulkan beberapa lampu hemat energi yang berbeda merek. Hasil penelitian tersebut menyatakan bahwa pada masing-masing LHE dengan berbagai merek memiliki harmonik tegangan sebesar 4%, dan harmonik arus mempunyai nilai diatas 70% [17]. Pengujian berdasarkan daya lampu memperlihatkan bahwa harmonik arus rata-rata (I-THD) untuk lampu dengan daya besar (160-350W) lebih kecil dari pada lampu yang dayanya kecil (23-85W) [18], dan nilai harmonik LHE tidak berubah secara linier dengan sumber tegangan yang terdistorsi [19].

Pengujian lainnya adalah dengan melakukan pengukuran distorsi harmonik lampu hemat energi beberapa lampu dengan daya yang sama dan terhubung secara paralel. Hasil pengukuran ini menyatakan bahwa rata-rata harmonik tegangan (V-THD) yang dihasilkan adalah sebesar 1,266 %, dan harmonik arus rata-rata (I-THD) adalah 72,55% [7]. Pengujian lain juga menunjukkan harmonik arus rata-rata (I-THD) yang dihasilkan lampu hemat energi dapat melebihi 100% [20].

Penelitian-penelitian yang telah dilakukan tersebut di atas masih belum mewakili kondisi riil pemakaian LHE oleh masyarakat umum di Indonesia. Dalam suatu tempat tinggal biasanya masyarakat menggunakan berbagai macam merek LHE dengan variasi daya yang berbeda-beda. Hal ini dipengaruhi oleh kebiasaan masyarakat dalam membeli lampu yang hanya mempertimbangkan faktor kebutuhan sesaat, ketersediaan, dan kemampuan finansial saja. Dengan latar belakang yang telah diuraikan sebelumnya, maka diperlukan penelitian ini untuk mewakili kondisi riil masyarakat pada umumnya guna mengetahui pengaruh pembebanan LHE dengan variasi merek dan daya terhadap besar distorsi harmonik yang dihasilkan oleh LHE tersebut.

BAHAN DAN METODE

Penelitian ini dilakukan dalam tiga tahapan metode yaitu sebagai berikut:

- a. Penentuan bahan/objek penelitian
- b. Pengujian distorsi harmonik secara individual

c. Pengujian distorsi harmonik secara paralel.

Selanjutnya metode penelitian tersebut akan dijabarkan lebih detail sebagai berikut:

Penentuan Bahan/Objek Penelitian

Bahan yang digunakan dalam pengujian ini adalah lampu hemat energi yang banyak ditemukan di pasaran. Lampu dipilih secara acak dengan mengesampingkan harga dan bentuk lampu, baik bentuk essential, *genie*, maupun tornado, namun harus memiliki Standar Nasional Indonesia (SNI) 04-6504-2001.

SNI tersebut merupakan persyaratan keselamatan lampu swa-ballast pelayanan pencahayaan umum. Hal ini disusun untuk mengantisipasi dimulainya perdagangan bebas, memajukan produktivitas dalam rangka meningkatkan daya saing, memberikan perlindungan pada konsumen, dan mewujudkan jaminan mutu [21]. Hal tersebut bertujuan agar penelitian ini dapat mendekati kondisi riil yang digunakan masyarakat pada umumnya.

Tabel 3. Bahan Pengujian LHE

No	Merek	Daya (Watt)	Jumlah
1	M	5	1
		8	1
		11	1
		14	1
		18	8
		20	1
		23	1
		24	1
2	N	18	1
3	O	18	1
		23	1
4	P	18	1
		20	1
5	Q	8	1
		18	1
6	R	18	1
		30	1
7	S	18	1
		28	1
8	T	18	1
		25	1

Tabel 3 menunjukkan lampu-lampu yang akan diuji berikut jumlah dan daya lampu tersebut. Keadaan lampu yang akan diuji telah dinyalakan selama 100 jam operasi *non-stop*, kemudian pengujian dilakukan menurut metoda SNI IEC 60969:2009, dengan kondisi sebagai berikut:

1. Pengujian dilakukan dalam ruang tanpa gerakan udara
2. Ruangan berada pada suhu $(25 \pm 1) ^\circ\text{C}$
3. Kelembaban nisbi maksimum 65%
4. Tegangan uji harus stabil pada $\pm 0,5\%$.

Pengujian Distorsi Harmonik Secara Individual

Pada tahap ini akan dilakukan pengujian terhadap masing-masing lampu hemat energi yang ada di pasaran. Beberapa peralatan yang digunakan untuk pengujian berdasarkan standar di atas adalah:

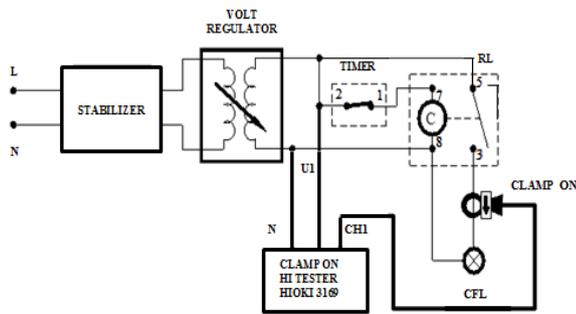
- *Digital clamp on power Hi-Tester*, Hioki 3169AC *voltage stabilizer*, VA-1500
- *AC voltage regulator*, 0 V-250 V/ 1 KVA
- Rak Uji Lampu.

Digital clamp on power Hi-Tester berfungsi untuk mengukur variabel-variabel seperti total distorsi harmonik tegangan (V-THD), dan total distorsi harmonik arus (I-THD). Rak uji lampu tersebut dilengkapi dengan suatu dudukan untuk memasang LHE yang akan diuji. Selain itu, rak uji lampu juga dilengkapi dengan *stabilizer* dan pengaturan tegangan yang berfungsi untuk menjaga kestabilan tegangan pada saat pengujian.

Untuk melakukan pengujian, maka dibuatlah rangkaian seperti pada Gambar 1. Serangkaian pengujian dilakukan terhadap LHE sebanyak 16 buah seperti pada Tabel 3, dan setiap lampu menjalani pengujian selama 30 detik. Kontrol waktu pengujian dilakukan dengan menggunakan *timer* yang ada pada rak uji lampu. Data pengujian akan ditampilkan dan direkam oleh *digital clamp on power*. Data yang dicatat berupa nilai V-THD (%) dan I-THD (%) dari masing-masing lampu.

Pengujian distorsi harmonik dilakukan dengan empat kombinasi pengukuran, yaitu:

1. Merek sama – daya sama (MS-DS)
2. Merek sama – daya berbeda (MS-DB)
3. Merek beda – daya sama (MB-DS)
4. Merek beda – daya berbeda (MB-DB).

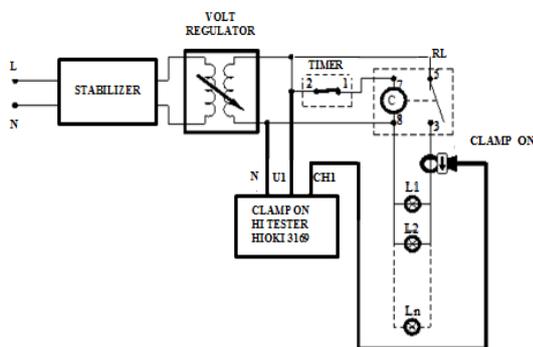


Gambar 1. Rangkaian Pengukuran Individual LHE

Pengujian Distorsi Harmonik Secara Paralel

Pengujian selanjutnya dilakukan dengan membuat rangkaian lampu yang disusun secara paralel. Kombinasi hubungan paralel dilakukan secara bertahap mulai dari dua buah LHE, kemudian ditambahkan pada setiap kali pengujian dengan menambahkan satu buah lampu hingga akhirnya tersusun delapan lampu secara paralel.

Pengukuran hubungan paralel ini juga akan dilakukan dalam empat kombinasi yang sama seperti pada saat pengujian secara individual. Untuk melakukan pengujian kombinasi paralel tersebut maka dibuat rangkaian LHE seperti yang terdapat pada Gambar 2. Peralatan yang digunakan pada tahap ini juga sama dengan saat pengukuran individual. Hasil pengukuran paralel akan dibandingkan dengan pengukuran individual dan akan dianalisa besarnya distorsi harmonik yang dihasilkan oleh LHE.



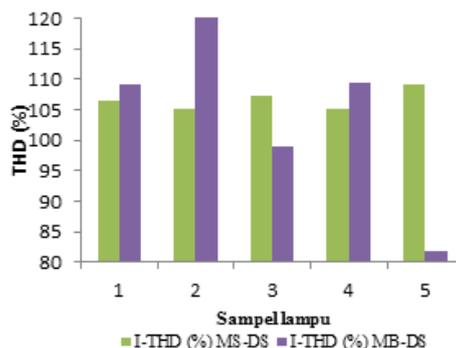
Gambar 2. Rangkaian Pengukuran Paralel LHE

HASIL DAN PEMBAHASAN

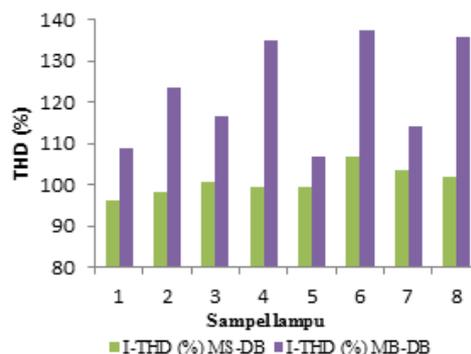
Pengujian LHE Individual

Hasil pengukuran LHE individual akan disajikan berupa gambar grafik berdasarkan daya

yang sama dan daya yang berbeda seperti yang terdapat pada Gambar 3(a) sampai 3(d) berikut:



Gambar 3(a). Nilai I-THD (%) LHE Individual Daya Sama

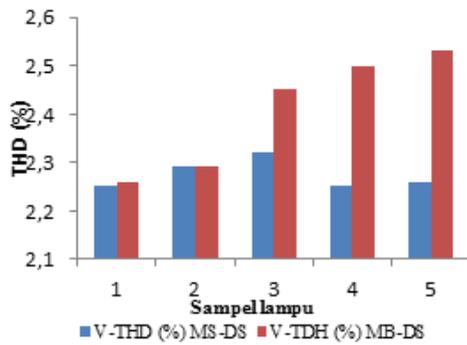


Gambar 3(b). Nilai I-THD (%) LHE Individual Daya Berbeda

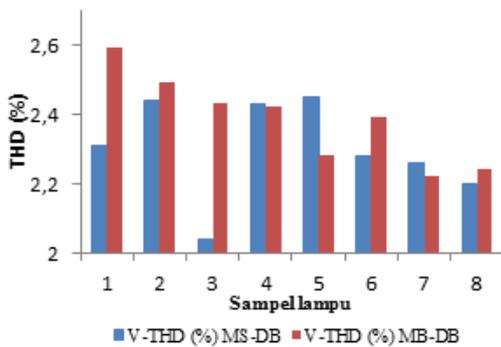
Pada Gambar 3(a) dan 3(b) ditunjukkan hasil pengukuran distorsi harmonik arus (I-THD) LHE individual. Gambar 3(a) merupakan kombinasi merek dan daya sama (MS-DS). Pada Gambar 3(a) dapat dilihat perbedaan distorsi harmonik arus yang ditimbulkan masing-masing lampu; perbedaan distorsi harmonik arus pada kombinasi merek sama daya sama (MS-DS) relatif hampir sama. Ini berbeda bila dibandingkan dengan kombinasi merek beda daya sama (MB-DS). Kombinasi MB-DS menunjukkan distorsi harmonik arus yang signifikan, yaitu antara 98-120%. Sementara pada kombinasi MS-DB seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3(b), perubahan distorsi harmonik arus tidak signifikan seperti pada pengujian kombinasi MS-DS. Distorsi harmonik arus pada kombinasi MB-DB kembali menunjukkan perubahan yang signifikan, sehingga dari kedua eksperimen tersebut perubahan distorsi harmonik arus lebih dipengaruhi oleh perbedaan merek LHE.

Satu produsen lampu cenderung menggunakan material yang seragam pada produksi LHE-nya sehingga nilai distorsi harmonik arusnya cenderung sama. Sedangkan produsen LHE lainnya bisa jadi menggunakan material yang berbeda. Perbedaan bahan baku yang digunakan oleh masing-masing produsen LHE tersebut menyebabkan distorsi harmonik arusnya cenderung berbeda apalagi dengan daya yang berbeda. Sehingga kombinasi MS-DB memberikan efek harmonik yang jauh lebih besar bila dibandingkan dengan MS-DB ataupun MB-DS.

Gambar 3(c) dan 3(d) menunjukkan terjadinya perubahan distorsi harmonik tegangan yang sangat kecil. Pada kombinasi MS-DS, MB-DS, MS-DB, dan MB-DB, pengukuran V-THD (%) adalah sekitar 2% dengan fluktuasi perubahan hanya sekitar 0,3% saja.



Gambar 3(c). Nilai V-THD (%) LHE Individual Daya Sama



Gambar 3(d). Nilai V-THD (%) LHE Individual Daya Berbeda

Untuk pengukuran individual, nilai harmonik arus yang dihasilkan lampu hemat energi paling kecil adalah 96,07%.

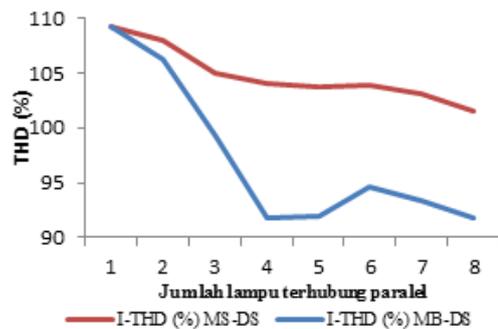
Nilai tersebut melewati batas yang telah ditentukan oleh standar IEEE 519. Berdasarkan standar IEEE 519, batas nilai I-TDH seharusnya berada pada rentang 5-20% tergantung perbandingan ISC dan IL (Tabel 1) [16].

Pada pengukuran harmonik tegangan (V-THD) lampu hemat energi individual ini, nilai V-THD yang dihasilkan adalah 2,04-2,59%. Dengan demikian untuk V-THD LHE masih masuk dalam standar yang ditetapkan IEEE 519 yaitu V-THD untuk sistem tegangan < 69 kV adalah 5% (Tabel 2) [16]. Distorsi harmonik tegangan harus berada dibawah nilai yang ditentukan pada standar IEEE 519 karena apabila melebihi dari batas yang telah ditentukan, dapat menyebabkan peningkatan tahanan pada penghantar/kabel akibat efek kulit dan efek kedekatan [6, 14] dan juga menurunkan kapasitas trafo distribusi [15]. Oleh sebab itu setiap produsen LHE harus mengacu pada standar IEEE 519 yang telah ditentukan.

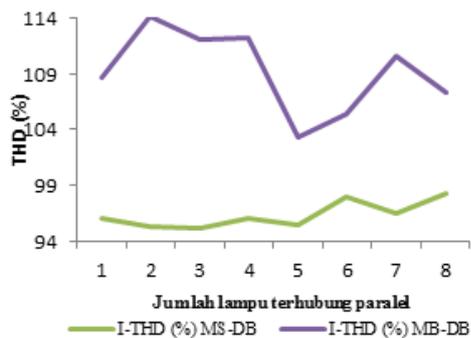
Pengukuran LHE Terhubung Paralel

Pengujian lampu hemat energi terhubung paralel dilakukan sesuai dengan skema Gambar 2. Prosedur pengujian ini dilakukan paralel mulai dari dua buah LHE sampai delapan buah yang terhubung paralel. Kombinasi pengukuran pada rangkaian ini dilakukan sama dengan pengujian sebelumnya, yaitu empat kombinasi yang terdiri dari kombinasi MS-DS, MS-DB, MB-DS, dan MB-DB.

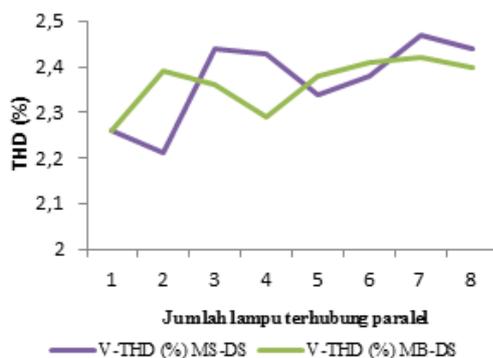
Hasil pengujian lampu hemat energi yang terhubung paralel diperlihatkan seperti yang terdapat pada Gambar 4(a) sampai 4(d). Pada Gambar 4(a) kombinasi lampu MS-DS yang terhubung paralel memperlihatkan kecenderungan yang menurun tiap penambahan jumlah lampu namun penurunan tersebut tidak cukup signifikan.



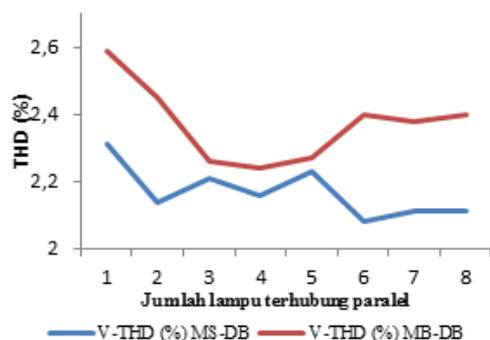
Gambar 4(a). Nilai I-THD (%) LHE Daya Sama Terhubung Paralel



Gambar 4(b). Nilai I-THD (%) LHE Daya Beda Terhubung Paralel



Gambar 4(c). Nilai V-THD (%) LHE Daya Sama Terhubung Paralel



Gambar 4(d). Nilai V-THD (%) LHE Daya Beda Terhubung Paralel

Untuk merek sama perubahan nilai V-THD tidak terlalu signifikan karena semua LHE disusun paralel dengan sumber sehingga tegangannya hampir sama dengan tegangan sumber. Begitu juga dengan material yang digunakan pada lampu tersebut, sehingga jumlah lampu sangat kecil pengaruhnya terhadap kenaikan persentase tegangan harmonik di sumber. Namun, untuk merek yang berbeda terjadi perubahan nilai yang cukup fluktuatif, kemungkinan disebabkan oleh perbedaan material yang digunakan pada pembuatan lampu

tersebut, sehingga masih perlu dilakukan penelitian lanjutan.

Pada kombinasi MB-DS terjadi penurunan I-THD (%) lebih cepat dibandingkan kombinasi MS-DS. Pada kombinasi MS-DB perubahan I-THD (%) tidak signifikan ketika jumlah lampu ditambahkan seperti ditunjukkan pada Gambar 4(b). Sedangkan pada kombinasi MB-DB, I-THD (%) berfluktuasi, menunjukkan bahwa penambahan jumlah lampu pada rangkaian paralel tidak berpengaruh secara signifikan. Pada dua parameter percobaan dapat diketahui bahwa merek beda lebih dominan dalam perubahan nilai I-THD (%) dibanding dengan lampu merek sama.

Hasil pengukuran V-THD (%) untuk lampu terhubung paralel mirip dengan hasil percobaan sebelumnya ketika LHE diukur secara individu. Nilai V-THD (%) yang dihasilkan kecil, dan terjadi fluktuasi yang sangat kecil, yaitu sekitar 0,3%.

Dari pengujian individual dan paralel dapat dilihat bahwa nilai I-THD lampu hemat energi masih melewati batas harmonik yang ditetapkan berdasarkan standar IEEE 519 [16], namun tidak demikian untuk V-THD. Mungkin hal tersebut terjadi karena dalam spesifikasi teknis suatu lampu hemat energi yang akan dipasarkan di Indonesia belum memuat nilai maksimum dari harmonik yang ditimbulkan lampu tersebut.

Karena nilai I-THD yang dihasilkan lampu hemat energi, perlu dilakukan penelitian selanjutnya untuk menekan nilai I-THD tersebut. Sistem pengurangan harmonik tersebut dapat dibuat pada rangkaian elektronik LHE atau pada sistem jaringan tenaga listrik. Penelitian mengenai pengurangan harmonik telah dilakukan, seperti dengan cara “short time current injections” pada sistem jaringan tenaga listrik [23] atau dengan cara pendekatan teori “the Norton equivalent circuits” pada sistem jaringan tenaga listrik [24].

KESIMPULAN

Pada hasil percobaan pembebanan lampu hemat energi yang diperoleh secara acak dengan proses pengujian kombinasi berdasarkan merek dan daya dapat disimpulkan bahwa:

- Perubahan I-THD (%) lampu dominan disebabkan oleh merek yang berbeda (MB).
- Tidak ada korelasi antara daya sebuah LHE dengan distorsi harmonik yang dihasilkan LHE tersebut.

- Semua LHE yang diukur individu maupun paralel dengan berbagai kombinasi merek dan daya, nilai V-THD (%) yang dihasilkan kecil sekitar 2%.
- Dari pengujian individual dan paralel dapat dilihat bahwa nilai I-THD lampu hemat energi masih melewati batas harmonik yang ditetapkan berdasarkan standar IEEE, namun tidak demikian untuk V-THD.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] B. E. Silaban, M. dan Warisman, S.Ii, "Analisis Strategi Saluran Distribusi Produk Lampu 'OE' di Jabodetabek", *ESENSI*, vol. 8, no. 1, 2005.
- [2] J. Trifunovic, J. Mikulovic, Z. Djurisc, M. Djuric, and M. Kostic, "Reductions in Electricity Consumption and Power Demand in Case of the Mass Use of Compact Fluorescent Lamps", *Energy*, vol. 34, no. 9, pp. 1355–1363, 2009.
- [3] D. Singh, C. Basu, M. Meinhardt-wollweber, and B. Roth, "LEDs for Energy Efficient Greenhouse Lighting", vol. 49, pp. 139–147, 2015.
- [4] C. K. K. Sekyere, F. K. Forson, and F. O. Akuffo, "Technical and Economic Studies on Lighting Systems: A Case for LED Lanterns and CFLs in Rural Ghana", *Renew. Energy*, vol. 46, no. 2, pp. 282–288, 2012.
- [5] J. Trifunovic, J. Mikulovic, Z. Djurisc, and M. Kostic, "Reductions in Electricity Losses in the Distribution Power System in Case of the Mass Use of Compact Fluorescent Lamps", *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 81, no. 2, pp. 465–477, 2011.
- [6] I. Wayan Sudiarta, I. Nyoman Sugiarta dan IBK Sugirianta, K. Kunci, D. Harmonisa, and L. Hemat Energi, "Analisis Pengaruh Harmonisa Terhadap Rugi-Rugi Daya Pada Penghantar", vol. 13, no. 3, 2013.
- [7] A. Azim and A. Rahardjo, "Analisis Harmonik Pada Lampu Hemat Energi", Universitas Indonesia, 2008.
- [8] S. Uddin, H. Shareef, and A. Mohamed, "Power Quality Performance of Energy-Efficient Low-Wattage LED Lamps", *Measurement*, vol. 46, no. 10, pp. 3783–3795, 2013.
- [9] A. Gil-de-castro, S. K. Rönnberg, and M. H. J. Bollen, "Light Intensity Variation (Flicker) and Harmonic Emission Related to LED Lamps", *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 146, pp. 107–114, 2017.
- [10] M. Gray and W. G. Morsi, "New Power Quantities Definition for Low and High Order Harmonic Distortion", *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 119, pp. 11–18, 2015.
- [11] M. M. Aman, G. B. Jasmon, H. Mokhlis, and A. H. A. Bakar, "Analysis of the Performance of Domestic Lighting Lamps", *Energy Policy*, vol. 52, pp. 482–500, 2013.
- [12] A. Fodor, A. Magyar, K. M. Hangos, and G. Peter, "Experimental Study of the Nonlinear Distortion Caused by Domestic Power Plants", pp. 1–6, 2014.
- [13] A. Kalair, N. Abas, A. R. Kalair, Z. Saleem, and N. Khan, "Review of Harmonic Analysis, Modeling and Mitigation Techniques", *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 78, no. April, pp. 1152–1187, 2017.
- [14] B. Sudiarto, "Analisa Pengaruh Harmonik Lampu Hemat Energi Terhadap Rugi-Rugi pada Jaringan Tegangan Rendah", Universitas Indonesia, 2004.
- [15] A. Jamaah, "Pengaruh Distorsi Harmonik Terhadap Penurunan Kapasitas Daya Trafo Distribusi 3 Fasa 400 kVA di Politeknik Negeri Semarang".
- [16] A. N. S. (ANSI), "IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems". (ANSI), American National Standard, 1993.
- [17] L. Assaffat, "Tingkat Distorsi Harmonisa pada Lampu Essensial yang Berbeda Merek", *Media Elektr.*, vol. 3, no. 1, p. 11, 2010.
- [18] C. Uyaisom, "Effect of Jumbo Compact Fluorescent Lamp on the Electrical Energy Saving and Harmonics Noise", vol. 8, pp. 149–153, 2011.
- [19] F. V Topalis, I. F. Gonos, and G. A. Vokas, "Arbitrary Waveform Generator for Harmonic Distortion Tests on Compact Fluorescent Lamps", vol. 30, pp. 257–267, 2001.
- [20] Z. Radakovic, F. V Topalis, and M. Kostic, "The Voltage Distortion in Low-Voltage Networks Caused by Compact Fluorescent Lamps with Electronic Gear",

- vol. 73, pp. 129–136, 2005.
- [21] S. N. Indonesia, “Lampu Swa-Balast untuk Pelayanan Pencahayaan”, 2001.
- [22] S. N. Indonesia, “Lampu Swa-Balast untuk Pelayanan Pencahayaan Umum – Persyaratan Unjuk Kerja”, SNI IEC 60969: 2008.
- [23] H. L. M. Monteiro, C. A. Duque, L. R. M. Silva, J. Meyer, R. Stiegler, A. Testa, and P. F. Ribeiro, “Harmonic Impedance Measurement Based on Short Time Current Injections”, *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 148, pp. 108–116, 2017.
- [24] I. Paptic, “Managing the Responsibility for Harmonic Distortion in Power Networks”, vol. 49, pp. 2538–2545, 2008.