

ANALISIS PENGARUH HARMONISA PADA TRANSFORMATOR DISTRIBUSI DI HARI KERJA DAN HARI LIBUR PADA GEDUNG PERKANTORAN

Muhammad Sultan Reza¹, Chairul Huda^{1,2*}

¹Departemen Teknik Elektro, Fakultas Teknik Universitas Indonesia Kampus Baru UI Depok 16424 Indonesia

²Program Studi Magister Manajemen Inovasi, Sekolah Pascasarjana Universitas Teknologi Sumbawa Jl. Olat Maras Raya, Batu Alang, Moyo Hulu, Sumbawa, NTB, Indonesia

*Corresponding Author email: c.hudaya@uts.ac.id

Abstrak

Diterima:

Bulan Januari
2021

Diterbitkan:

Bulan Februari
2021

Keyword :

Beban non linier,
Harmonisa,
Transformator
Distribusi

Harmonisa merupakan salah satu fenomena penyimpangan bentuk gelombang tegangan dan arus yang ditransmisikan dan didistribusikan dari sumber ke beban yang berupa gelombang sinusoidal murni. Penelitian ini bertujuan untuk mempelajari tentang pengaruh harmonisa pada transformator distribusi di gedung perkantoran serta membandingkan pengaruh tersebut di hari kerja dan hari libur. Dari hasil pengukuran di Sudirman Central Business District diketahui bahwa pada transformator 1 dan 3 terdapat harmonisa dengan persentase THD arus sebesar 25.27% dan 22.32% pada hari kerja. Sementara pada hari libur terdapat transformator 1 yang mempunyai persentase THD arus sebesar 17.24% yang melebihi batas IEEE 519-1992 yang diizinkan yaitu 15%. Harmonisa yang dominan yaitu harmonisa ke-3, ke-5, dan ke-7. Dengan persentase THD arus yang melebihi batas standar akan mengakibatkan penurunan kinerja dan bahkan kerusakan alat atau komponen listrik. Hasil dari studi menunjukkan bahwa pada saat beban kecil (hari libur) THD arus yang dihasilkan tidak terlalu besar dikarenakan beban non linier yang lebih sedikit digunakan daripada pada saat beban besar (hari kerja).

PENDAHULUAN

Sebagian besar peralatan listrik saat ini banyak yang terdapat komponen elektronik. Termasuk peralatan listrik yang digunakan pada gedung perkantoran, seperti air conditioner, printer, Lampu Hemat Energi (LHE) dan lain sebagainya. Peralatan-peralatan seperti ini dapat menimbulkan arus-arus dan tegangan-tegangan terdistorsi yang disebut sebagai harmonisa dimana frekuensi arus dan tegangannya berturut-turut adalah kelipatan dari arus dan tegangan yang dibangkitkan oleh sumber listrik. Distorsi harmonisa disebabkan oleh beban non linier. Harmonisa dapat menyebabkan faktor daya yang semakin buruk, menimbulkan gangguan pada sistem telekomunikasi, dan menimbulkan berbagai macam kerusakan pada peralatan listrik yang sensitif (Geduld, 2005).

Transformator yang dirancang untuk bekerja pada frekuensi ratingnya dapat berakibat timbulnya rugi dan bertambahnya temperatur yang tidak normal yang dapat mengurangi masa guna transformator akibat pembebanan nonlinier. Kandungan harmonisa yang besar menimbulkan pemanasan berlebih walaupun beban belum mencapai beban nominal. Pemanasan berlebih ini disebabkan oleh meningkatnya rugi-rugi pada transformator yaitu rugi beban, rugi I²R, rugi eddy current, serta rugi sar lainnya (stray losses).

Konsep derating atau penurunan kapasitas daya transformator dibutuhkan untuk mengurangi

pengaruh harmonisa pada transformator agar transformator mempunyai masa pakai yang panjang sehingga secara ekonomi menguntungkan dan sekaligus menjaga kehandalan sistem tenaga listrik. Standar IEEE 519-1992 berkaitan dengan konsep ini. Apabila tingkat THDi maupun THDv dibawah 5% tidak terjadi pemanasan berlebih pada transformator yang mana tidak perlu dilakukan penurunan kapasitas daya transformator. Begitupula sebaliknya apabila melebihi standar tersebut maka perlu dilakukan penurunan kapasitas transformator.

Oleh karena buruknya dampak harmonisa pada transformator, penulis memiliki tujuan untuk mengetahui seberapa besar rugi daya dan penurunan kapasitas transformator distribusi di gedung perkantoran dimana besar harmonisa diwakilkan dalam bentuk THD (%) (Total Harmonic Distortion).

LANDASAN TEORI

Pengertian Harmonisa

Pada sistem tenaga listrik dirancang agar beroperasi pada frekuensi 50 Hz atau 60 Hz. Akan tetapi dalam kenyataannya, terdapat beberapa beban yang menyebabkan munculnya arus dan tegangan yang frekuensinya merupakan kelipatan 50 atau 60 Hz. Beban tersebut dinamakan sebagai beban non linier. Sedangkan frekuensi 50 atau 60 Hz disebut sebagai frekuensi fundamental dan kelipatannya disebut harmonisa atau harmonisa. Harmonisa adalah distorsi periodik dari gelombang sinus arus,

tegangan, atau daya dengan bentuk gelombang yang frekuensinya merupakan kelipatan diluar bilangan satu terhadap frekuensi fundamental yang mana pada sistem suplai dirancang beroperasi pada 50 Hz/60 Hz (Tobing, 2008).



Gambar 2. 1 Gelombang Harmonisa

Keberadaan harmonisa ini membawa kerugian pada beberapa alat, salah satunya adalah tranformator daya. Akibat dari banyaknya persentase kandungan harmonisa akan berakibat pada semakin buruknya kualitas sumber daya listrik. Umumnya arus sistem distribusi tenaga listrik yang terdistorsi tersebut didominasi oleh arus harmonisa orde ganjil frekuensi rendah, yakni arus harmonisa orde tiga, lima, tujuh, sebelas, dan seterusnya. Harmonisa adalah gangguan yang terjadi dalam sistem distribusi tenaga listrik yang disebabkan adanya distorsi gelombang arus dan tegangan. Distorsi gelombang arus dan tegangan ini disebabkan adanya pembentukan gelombang-gelombang dengan frekuensi kelipatan bulat dari frekuensi fundamentalnya. Hal ini disebut frekuensi harmonisa yang timbul pada bentuk gelombang aslinya sedangkan bilangan bulat pengali frekuensi dasar disebut angka urutan harmonisa. Jika f adalah frekuensi fundamental dari suatu sistem, maka frekuensi orde n (1,2,3,...,n) adalah nf yaitu 50Hz, 100Hz, 150Hz dan seterusnya. Gelombang-gelombang ini kemudian menumpang pada gelombang murni / aslinya sehingga terbentuk gelombang cacat yang merupakan jumlah antara gelombang murni sesaat dengan gelombang harmonisanya. Harmonisa urutan genap biasanya memiliki rms yang lebih kecil dibandingkan harmoik urutan ganjil (J. Arnilaga, 2003).

Proses Terjadinya Harmonisa

Pada tahun 1916 fenomena harmonisa pada sistem tenaga listrik pertama kali diteliti oleh Steinmetz. Ia memberi perhatian pada harmonisa ke-3 yang muncul pada sistem tiga fasa. Kemunculan harmonisa ke-3 tersebut disebabkan oleh kejenuhan inti besi pada trafo dan mesin-mesin listrik. Sekitar tahun 1930-1940, masalah harmonisa ke-3 ini dapat teratasi dengan baik. Pada era sekarang ini penyebab munculnya harmonisa sebagian besar adalah alat-alat elektronika daya.

Rangkaian elektronika daya digunakan secara luas pada switching power supplies, UPS, komputer, printer, lampu flourescent dan peralatan-peralatan lainnya. Elektronika daya digunakan oleh banyak pihak karena efisien dan mudah dikendalikan, akan tetapi perangkat ini dapat menarik arus AC non sinusoidal dari sumber AC. Bila arus ini bereaksi dengan impedansi sitem maka akan membangkitkan tegangan dan/atau arus harmonisa. Gelombang tegangan dan/atau arus harmonisa ini bergerak seolah-olah melawan arah datangnya gelombang tegangan dan/atau arus yang berasal dari sumber. Jika gelombang harmonisa ini bergabung dengan gelombang fundamentalnya, maka gelombang fundamental tersebut akan mengalami distorsi dan mengubah bentuknya menjadi gelombang sinusoidal yang tidak sempurna atau disebut gelombang yang cacat.

Tidak seperti fenomena transien yang akan hilang dalam beberapa mikro detik atau fenomena tegangan DIP yang akan hilang dalam beberapa mili detik, harmonisa merupakan kejadian yang berlangsung secara periodik dan berbentuk *steady state*. Keberadaan harmonisa secara terus-menerus akan menyebabkan distorsi pada gelombang sinus tegangan dan/atau arus dan hal ini mempunyai beberapa pengaruh buruk terhadap sistem maupun peralatan listrik.

Harmonisa dapat mempengaruhi setiap komponen pada sistem distribusi walaupun dengan akibat yang berbeda. Namun demikian komponen tersebut akan mengalami penurunan kinerja dan bahkan akan mengalami kerusakan. Salah satu dampak yang umum dari gangguan harmonisa adalah panas lebih pada kawat netral dan transformator sebagai akibat timbulnya harmonisa ketiga yang dibangkitkan oleh peralatan listrik satu fasa (Grady, 2002).

Indeks Harmonisa

a. Root Mean Square

RMS dapat didefinisikan sebagai akar kuadrat rata-rata dari fungsi yang terdapat amplitudo dari fungsi berkalanya pada suatu periode, sehingga RMS dapat diartikan sebagai persamaan berikut:

$$X_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T x^2(t) dt} \quad (1)$$

sedangkan untuk menghitung tegangan dan arus (V_{rms} dan I_{rms}) adalah :

$$V_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T V^2(t) dt} = \sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} V_n^2} \quad (2)$$

$$I_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T I^2(t) dt} = \sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} I_n^2} \quad (3)$$

atau dapat juga didefinisikan dengan persamaan berikut:

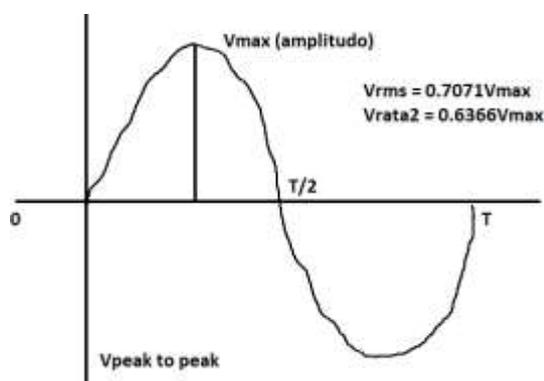
$$I_{rms} = \sqrt{I_1^2 + I_2^2 + I_3^2 + \dots + I_n^2} \quad (4)$$

$$V_{rms} = \sqrt{V_1^2 + V_2^2 + V_3^2 + \dots + V_n^2} \quad (5)$$

Nilai RMS merupakan besaran nilai yang sering dipakai dalam kehidupan sehari-hari. Hal ini berdasarkan kenyataan bahwa pada umumnya alat ukur yang digunakan dalam proses pengukuran besaran listrik biasanya menunjukkan nilai RMS seperti arus rms atau tegangan rms. Nilai RMS digunakan karena beberapa alat elektronik (seperti beberapa komponen pada alat ukur) mempunyai batas untuk menahan kalor/panas tertentu (Indra, 2010).

Di samping itu, berbeda dengan sinyal DC yang memiliki nilai aktual tetap, sinyal AC memiliki nilai aktual yang berubah-ubah secara periodik sehingga pengukuran sinyal AC dilakukan dengan mencari nilai ekuivalen DC-nya. Nilai inilah yang disebut dengan nilai RMS yang dalam terminologi elektrik, nilai RMS akan ekuivalen dengan DC heating value-nya. Dengan demikian nilai RMS arus bolak-balik dapat dikatakan sebagai besarnya nilai arus searah yang akan memberikan efek pemanasan yang sama dengan efek pemanasan yang disebabkan arus bolak-balik tersebut pada suatu tahanan yang sama.

Karena pada sistem arus bolak-balik (AC) bentuk gelombang arus maupun tegangan berupa sinusoidal, maka perhitungan RMS adalah sebagai berikut:



Gambar 2. 2 Gelombang Sinusoidal Tegangan

b. *Individual Harmonic Distortion*

Individual Harmonic Distortion (IHD) adalah perbandingan antara nilai RMS dari fundamentalnya, Misal nilai RMS dari harmonisa ketujuhnya adalah 10 A dan harmonisa kesembilannya adalah 25 A, sedangkan nilai rms dari harmonisa fundamentalnya adalah 100 A, maka

$$IHD_7 = \frac{10}{100} = 0.1\% \text{ (IHD ketujuh)}$$

$$IHD_9 = \frac{25}{100} = 0.25\% \text{ (IHD kesembilan)}$$

c. *Total Harmonic Distortion*

Total Harmonic Distortion (THD) adalah perbandingan antara nilai rms dari seluruh komponen harmonisa terhadap nilai rms dari nilai fundamentalnya biasanya dinyatakan dalam persen (%). Nilai dari THD ini digunakan untuk mengukur besarnya penyimpangan dari bentuk gelombang periodik yang mengandung harmonisa dari gelombang sinusoidal murninya (S. Key, 1996). Untuk gelombang sinusoidal sempurna nilai dari THD adalah bernilai 0 %. Untuk mencari nilai THD untuk tegangan dan arus dapat menggunakan rumus sebagai berikut :

$$I_{THD} = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}}{I_1} \tag{6}$$

$$V_{THD} = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} V_n^2}}{V_1} \tag{7}$$

Keterangan:

V_n = Nilai Tegangan Harmonisa (Volt)

V_1 = Nilai Tegangan Fundamental (Volt)

I_n = Nilai Arus Harmonisa (Ampere)

I_1 = Nilai Arus Fundamental (Ampere)

n = Orde Harmonisa

Standar Harmonisa

Standar Harmonisa adalah berdasarkan IEEE 519 – 1992. Ada dua kriteria yang digunakan untuk mengevaluasi distorsi harmonisa, yang pertama adalah batas harmonisa untuk arus (ITHD) dan yang kedua adalah batasan untuk tegangan (V THD). Presentasi (%) ITHD adalah presentase jumlah total arus yang terdistorsi oleh harmonisa terhadap frekuensi fundamentalnya. Batasan untuk harmonisa arus (ITHD) ditentukan oleh perbandingan I_{sc} / I_L . I_{sc} adalah arus hubung singkat yang ada pada PCC (Point of Common Coupling), sedangkan I_L adalah arus beban fundamental nominal. Sedangkan Presentasi (%) batas untuk harmonisa tegangan (V THD), ditentukan dari besarnya tegangan sistem yang dipakai /terpasang.

Tabel 2. 1 Limit Distorsi Arus Harmonisa

I_{sc} / I_L	HARMONIC ORDER					Total Harmonic Distortion (THD %)
	<11	11 ≤ h < 17	17 ≤ h < 23	23 ≤ h < 35	35 ≤ h	
	Individual Harmonic Distortion (IHD %)					
<20	4.0	2.0	1.5	0.6	0.3	5
20-50	7.0	3.5	2.5	1.0	0.5	8
50-100	10.0	4.5	4.0	1.5	0.7	12
100-1000	12.0	5.5	5.0	2.0	1.0	15
>1000	15.0	7.0	6.0	2.5	1.4	20

Tabel 2. 2 Limit Distorsi Tegangan Harmonisa

Distorsi Maksimal (%)	Sistem Tegangan		
	$V \leq 69$ kV	$69 < V < 138$ kV	$V > 138$ kV
Individual	3.0	1.5	1.0

Harmonisa			
Total Harmonisa	5.0	2.5	1.5

MATODE PENELITIAN

Pengambilan data yang dilakukan diambil dari gedung perkantoran yang berlokasi di Sudirman Central Business District, Jakarta Selatan. Ada 3 buah transformator distribusi yang digunakan untuk pengumpulan data serta arus dan tegangan THD (Total Harmonic Distortion) dari setiap fasa R,S, dan T. Kemudian, pada data pengukurannya diambil selama dua hari yakni, pada hari senin ketika hari kerja dan hari minggu ketika hari libur.

Peralatan pengukuran yang digunakan dalam pengambilan data ini ialah Power Analyzer bermerk Hioki dengan seri PQ3100. Alat ini mampu untuk mengukur berbagai komponen listrik seperti tegangan (V), arus (I), frekuensi (f), daya kompleks (S), daya nyata (P), daya reaktif (Q), energi, dan faktor daya (PF). Selain itu, alat ini juga mampu mengukur komponen harmonisa arus dan tegangan sampai dengan orde ke-50. Alat ini memiliki input 4 terminal tegangan (3 tegangan fasa dan 1 netral) dan 4 terminal arus sehingga alat ini mampu mengukur sistem dari 1 phase-2 wire sampai 3 phase-4 wire. Dilengkapi dengan PC card sebagai memori penyimpanan data pengukuran, sehingga alat ini mampu menyimpan data pengukuran secara otomatis. Data hasil pengukuran dapat dengan mudah ditransfer dari PC card ke komputer melalui universal card reader. Dengan bantuan program yang dimilikinya, hasil pengukuran dapat diamati dan dianalisis melalui komputer. Program yang digunakan adalah 9625 Power Measurement Support Software. Dari program ini kita bisa menyajikan data hasil pengukuran berupa ringkasan, grafik gelombang, dan spektrum untuk lebih memudahkan analisa. Kemudian, untuk mengukur suhu pada transformator digunakan termometer infrared digital, KW06-304 bermerk Krisbow yang dapat mengukur dari suhu -50°C sampai 750°C. Suhu yang diukur merupakan suhu pada saat transformator mengalami beban penuh.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Spesifikasi transformator distribusi yang digunakan pada penelitian ini adalah sebagai berikut.

Tabel 3. 1 Spesifikasi Transformator Distribusi

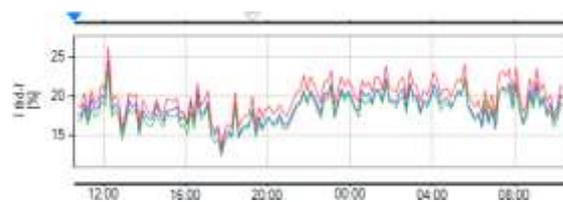
Spesifikasi	Keterangan
Merk	CENTRADO
Arus Beban Nol	1.6%
Impedansi (Z)	6%
Daya Semu (S)	1600 kVA

Tegangan Primer (VP)	20 kV
Tegangan Sekunder (VS)	400 V
Arus Primer (IP)	46 A
Arus Sekunder (IS)	2300 A
Fasa	3
Frekuensi	50 Hz
Berat	3800 Kg
Volume Oil	920 Liter
Sistem Pendingin	ONAN
Tipe	Indoor/Outdoor
Tingkat Suara Bising	65 DB
Highest HV LV	20/0.4 KV

Pengukuran di Hari Kerja

Tabel 3. 2 Data Pengukuran THD Arus di Hari Kerja

Orde	Frekuensi Harmonisa (Hz)	Transformator 1		Transformator 2		Transformator 3	
		I _{THD}	ARUS	I _{THD}	ARUS	I _{THD}	ARUS
1	50	241.59A	100.00%	246.32A	100.00%	237.94A	100.00%
2	100	1.92A	3.88%	1.21A	3.20%	1.19A	3.17%
3	150	2.11A	6.20%	1.22A	6.43%	1.82A	8.11%
4	200	1.77A	1.84%	0.92A	1.57%	0.93A	1.85%
5	250	1.77A	7.92%	1.14A	11.10%	1.68A	9.66%
6	300	1.05A	1.89%	0.95A	1.80%	0.91A	1.96%
7	350	1.50A	11.47%	0.52A	11.49%	1.39A	11.77%
8	400	0.76A	2.41%	0.38A	2.35%	0.75A	2.60%
9	450	1.20A	3.19%	0.52A	3.01%	0.98A	3.68%
10	500	0.17A	3.29%	0.32A	3.14%	0.79A	3.48%
11	550	0.64A	5.67%	0.44A	5.45%	0.95A	6.11%
12	600	0.57A	4.31%	0.32A	4.24%	0.10A	4.67%
13	650	0.53A	7.71%	0.41A	7.41%	0.64A	8.39%
14	700	0.94A	5.28%	0.46A	5.16%	0.14A	5.88%
15	750	0.41A	5.51%	0.48A	5.45%	0.54A	6.15%
16	800	0.53A	4.97%	0.40A	5.00%	0.66A	5.64%
17	850	0.36A	6.59%	0.47A	6.50%	0.66A	7.00%
18	900	0.46A	3.59%	0.30A	3.66%	0.47A	3.95%
19	950	0.78A	4.51%	0.33A	4.51%	0.44A	4.81%
20	1000	0.46A	2.75%	0.34A	2.74%	0.44A	3.00%
21	1050	0.79A	2.54%	0.34A	2.58%	0.47A	2.78%
22	1100	0.44A	2.38%	0.26A	2.34%	0.39A	2.60%
23	1150	0.98A	4.35%	0.36A	4.22%	0.35A	4.74%
24	1200	0.21A	2.20%	0.21A	2.17%	0.33A	2.42%
25	1250	0.89A	4.02%	0.38A	4.00%	0.33A	3.98%
26	1300	0.11A	2.21%	0.22A	2.12%	0.25A	2.37%
27	1350	0.24A	2.23%	0.32A	2.17%	0.28A	2.45%
28	1400	0.06A	2.20%	0.26A	2.15%	0.27A	2.35%
29	1450	0.35A	3.53%	0.28A	3.59%	0.25A	3.85%
30	1500	0.28A	2.12%	0.24A	2.10%	0.25A	2.33%



Gambar 3. 1 Grafik Tren THD-F Arus Tiap Orde di HarKerja

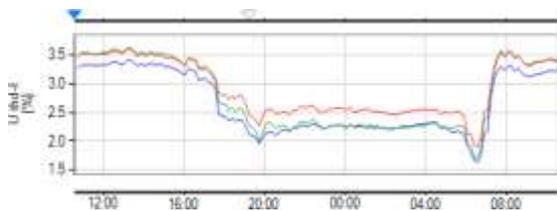
Pada grafik THD-F arus di hari kerja terlihat bahwa grafik sangat fluktuatif terhadap waktu. Hal ini disebabkan karena beban non linier yang digunakan pada hari kerja sangatlah banyak. Sehingga, THD-F yang dihasilkan pada transformasi distribusi juga berbanding lurus dengan beban non linier yang aktif pada saat itu.

Tabel 3. 3 Data Pengukuran THD Tegangan di Hari Kerja

Orde	Frekuensi Harmonisa (Hz)	Transformator 1		Transformator 2		Transformator 3	
		V _{THD}	Volt	V _{THD}	Volt	V _{THD}	Volt
1	50	100.0	1552.2	100.0	1553.5	100.0	1552.3
2	100	0%	1V	0%	3V	0%	9V
		0.10%	0.24V	0.13%	0.31V	0.12%	0.28V

3	150	1.46%	1.09V	1.53%	0.95V	1.41%	1.02V
4	200	0.08%	0.19V	0.09%	0.21V	0.07%	0.15V
5	250	1.79%	0.85V	1.76%	0.62V	1.75%	0.79V
6	300	0.12%	0.27V	0.12%	0.27V	0.10%	0.23V
7	350	1.29%	0.54V	0.99%	0.44V	1.28%	0.45V
8	400	0.18%	0.41V	0.18%	0.42V	0.16%	0.36V
9	450	0.96%	0.51V	1.02%	0.45V	0.79%	0.48V
10	500	0.27%	0.60V	0.27%	0.62V	0.22%	0.50V
11	550	0.87%	0.50V	0.87%	0.40V	0.81%	0.47V
12	600	0.36%	0.52V	0.37%	0.33V	0.29%	0.47V
13	650	1.03%	0.33V	1.07%	0.32V	1.04%	0.33V
14	700	0.43%	0.37V	0.43%	0.38V	0.34%	0.37V
15	750	0.60%	0.36V	0.54%	0.21V	0.50%	0.24V
16	800	0.45%	0.32V	0.44%	0.24V	0.37%	0.28V
17	850	0.92%	0.29V	0.81%	0.33V	0.85%	0.22V
18	900	0.37%	0.26V	0.37%	0.33V	0.31%	0.31V
19	950	0.69%	0.26V	0.73%	0.15V	0.72%	0.12V
20	1000	0.32%	0.23V	0.31%	0.20V	0.27%	0.11V
21	1050	0.36%	0.13V	0.34%	0.19V	0.32%	0.14V
22	1100	0.30%	0.18V	0.29%	0.16V	0.25%	0.17V
23	1150	0.77%	0.15V	0.72%	0.16V	0.63%	0.23V
24	1200	0.30%	0.18V	0.29%	0.11V	0.24%	0.15V
25	1250	0.67%	0.15V	0.66%	0.11V	0.58%	0.11V
26	1300	0.29%	0.16V	0.29%	0.09V	0.23%	0.11V
27	1350	0.34%	0.17V	0.37%	0.16V	0.34%	0.19V
28	1400	0.29%	0.25V	0.29%	0.09V	0.23%	0.21V
29	1450	0.55%	0.16V	0.56%	0.11V	0.50%	0.14V
30	1500	0.28%	0.14V	0.28%	0.08V	0.22%	0.11V

10	500	0.29%	0.67A	0.29%	0.32A	0.24%	0.59A
11	550	0.83%	0.44A	0.88%	0.32A	0.76%	0.35A
12	600	0.37%	0.47A	0.38%	0.32A	0.31%	0.30A
13	650	1.05%	0.43A	1.05%	0.41A	1.06%	0.34A
14	700	0.43%	0.44A	0.43%	0.36A	0.35%	0.14A
15	750	0.60%	0.41A	0.52%	0.38A	0.51%	0.22A
16	800	0.42%	0.43A	0.43%	0.40A	0.34%	0.36A
17	850	0.90%	0.36A	0.79%	0.37A	0.85%	0.23A
18	900	0.36%	0.36A	0.36%	0.30A	0.30%	0.37A
19	950	0.68%	0.38A	0.74%	0.33A	0.71%	0.24A
20	1000	0.31%	0.46A	0.30%	0.34A	0.26%	0.25A
21	1050	0.35%	0.49A	0.32%	0.34A	0.29%	0.27A
22	1100	0.29%	0.44A	0.29%	0.26A	0.25%	0.29A
23	1150	0.74%	0.48A	0.69%	0.36A	0.64%	0.15A
24	1200	0.30%	0.21A	0.29%	0.21A	0.24%	0.13A
25	1250	0.63%	0.39A	0.65%	0.18A	0.56%	0.19A
26	1300	0.29%	0.11A	0.29%	0.22A	0.24%	0.15A
27	1350	0.33%	0.24A	0.36%	0.24A	0.32%	0.14A
28	1400	0.29%	0.26A	0.29%	0.16A	0.23%	0.13A
29	1450	0.54%	0.24A	0.55%	0.18A	0.44%	0.08A
30	1500	0.28%	0.18A	0.28%	0.12A	0.22%	0.09A



Gambar 3. 2 Grafik Tren THD Tegangan Tiap Orde di Hari Kerja

Pada grafik THD-F tegangan di hari kerja terlihat bahwa grafik dari pukul 12:00 sampai dengan 20:00 dan pukul 06:00 sampai dengan 08:00 mempunyai THD yang cukup besar. Namun, pada saat pukul 20:00 sampai dengan 06:00 grafik terlihat lebih stabil. Hal ini disebabkan karena ketika mengalami osilasi beban non linier pada gedung perkantoran banyak yang aktif sedangkan ketika tidak mengalami osilasi beban non linier kebanyakan tidak aktif.

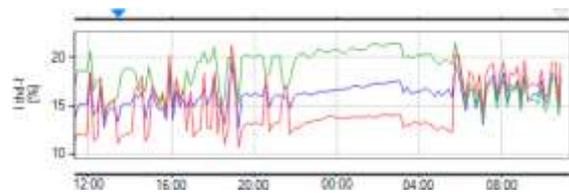
Tabel 3. 4 Data Pengukuran Transformator Pada Hari Kerja

Trafo	F (Hz)	P (KW)	Q (VAR)	S (VA)	C	ITHD	VTHD
1	50	124.24	378.5	238.68	62.8	26.29%	4.61%
2	50	82.75	178.6	126.52	43.4	14.36%	4.24%
3	50	123.87	323.89	210.12	59.3	24.42%	4.43%

Pengukuran di Hari Libur

Tabel 3. 5 Data Pengukuran THD Arus di Hari Libur

Orde	Frekuensi Harmonisa (Hz)	Transformator 1		Transformator 2		Transformator 3	
		ITHD	Arus	ITHD	Arus	ITHD	Arus
1	50	100.00%	242.55A	100.00%	242.52A	100.00%	238.1
2	100	0.12%	1.12A	0.14%	1.05A	0.13%	0.81
3	150	1.45%	1.41A	1.52%	1.22A	1.44%	1.15
4	200	0.08%	1.09A	0.09%	0.92A	0.07%	0.83
5	250	1.96%	1.27A	1.53%	1.04A	1.66%	1.08
6	300	0.12%	1.05A	0.12%	0.95A	0.10%	0.91
7	350	1.32%	1.10A	1.05%	0.52A	1.27%	0.49
8	400	0.20%	0.76A	0.20%	0.38A	0.16%	0.55
9	450	0.96%	0.92A	1.01%	0.43A	0.79%	0.38A

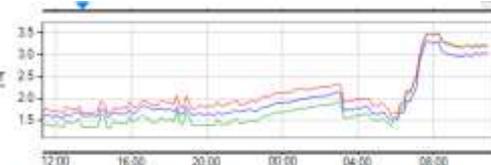


Gambar 3. 3 Grafik Tren THD Arus Tiap Orde di Hari Libur

Pada grafik THD-F arus di hari libur terlihat bahwa grafik dari pukul 12:00 sampai dengan 22:00 dan pukul 06:00 sampai dengan 10:00 cukup mengalami osilasi. Namun, pada saat pukul 22:00 sampai dengan 06:00 grafik terlihat lebih stabil. Hal ini disebabkan karena ketika mengalami osilasi beban non linier pada gedung perkantoran banyak yang aktif sedangkan ketika tidak mengalami osilasi beban non linier kebanyakan tidak aktif.

Tabel 3. 6 Data Pengukuran THD Tegangan di Hari Libur

Orde	Frekuensi Harmonisa (Hz)	Transformator 1		Transformator 2		Transformator 3	
		VTHD	Volt	VTHD	Volt	VTHD	Volt
1	50	100.00%	1442.91V	100.00%	1443.67V	100.00%	1442.75V
2	100	0.12%	0.26V	0.14%	0.28V	0.13%	0.24V
3	150	1.45%	0.55V	1.52%	0.42V	1.44%	0.39V
4	200	0.08%	0.21V	0.09%	0.15V	0.07%	0.19V
5	250	1.96%	0.52V	1.53%	0.39V	1.66%	0.35V
6	300	0.12%	0.27V	0.12%	0.23V	0.10%	0.27V
7	350	1.32%	0.39V	1.05%	0.35V	1.27%	0.24V
8	400	0.20%	0.35V	0.20%	0.36V	0.16%	0.31V
9	450	0.96%	0.35V	1.01%	0.38V	0.79%	0.21V
10	500	0.29%	0.42V	0.29%	0.37V	0.24%	0.20V
11	550	0.83%	0.45V	0.88%	0.32V	0.76%	0.20V
12	600	0.37%	0.38V	0.38%	0.27V	0.31%	0.22V
13	650	1.05%	0.37V	1.05%	0.33V	1.06%	0.23V
14	700	0.43%	0.28V	0.43%	0.37V	0.35%	0.27V
15	750	0.60%	0.24V	0.52%	0.24V	0.51%	0.26V
16	800	0.42%	0.23V	0.43%	0.28V	0.34%	0.22V
17	850	0.90%	0.25V	0.79%	0.22V	0.85%	0.29V
18	900	0.36%	0.21V	0.36%	0.31V	0.30%	0.26V
19	950	0.68%	0.15V	0.74%	0.12V	0.71%	0.26V
20	1000	0.31%	0.10V	0.30%	0.11V	0.26%	0.23V
21	1050	0.35%	0.19V	0.32%	0.14V	0.29%	0.13V
22	1100	0.29%	0.12V	0.29%	0.17V	0.25%	0.18V
23	1150	0.74%	0.12V	0.69%	0.23V	0.64%	0.15V
24	1200	0.30%	0.08V	0.29%	0.15V	0.24%	0.18V
25	1250	0.63%	0.11V	0.65%	0.11V	0.56%	0.15V
26	1300	0.29%	0.09V	0.29%	0.11V	0.24%	0.16V
27	1350	0.33%	0.16V	0.36%	0.19V	0.32%	0.17V
28	1400	0.29%	0.09V	0.29%	0.11V	0.23%	0.15V
29	1450	0.54%	0.11V	0.55%	0.14V	0.44%	0.16V
30	1500	0.28%	0.06V	0.28%	0.05V	0.22%	0.02V



Gambar 3. 4 Grafik Tren THD Tegangan Tiap Orde di Hari Kerja

Pada grafik THD-F arus di hari libur terlihat bahwa grafik cukup stabil. Namun, pada pukul 06:00 keatas THD-F arus mulai memuncak. Hal ini disebabkan karena pada pukul 06:00 kebawah beban non linier yang digunakan sedikit. Sedangkan pada pukul 06:00 keatas beban non linier mulai aktif kembali.

Tabel 3. 7 Data Pengukuran Transformator Pada Hari Libur

Trafo	F (Hz)	P (KW)	Q (VAR)	S (VA)	C	ITHD	VTHD
1	50	124.24	378.5	238.68	51.2	18.32%	3.50%
2	50	82.75	178.6	126.52	38.3	13.54%	3.49%
3	50	123.87	323.89	210.12	35.9	12.34%	3.32%

Berdasarkan data diatas diketahui bahwa nilai arus THD ganjil relatif lebih besar dibandingkan THD genap. Melalui data-data pengukuran tersebut akan dilakukan perhitungan THD arus dan tegangan pada transformator 1,2, dan 3 di hari kerja dan hari libur yang nantinya akan dibandingkan dengan nilai pengukuran. Hasil pengukuran dan perhitungan dibandingkan yang kemudian akan dievaluasi berdasarkan standar harmonisa yang telah ditetapkan pada IEEE 519-1992. Pengukuran dilakukan pada saat beban penuh agar dapat mengetahui efek harmonisa secara akurat pada transformator distribusi.

Perhitungan di Hari Kerja

a. Arus

I_{THD} pada transformator 1:

$$I_{THD} = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}}{I_1}$$

$$= \frac{\sqrt{I_3^2 + I_5^2 + I_7^2 + I_9^2 + \dots + I_{29}^2}}{I_1}$$

$$= \frac{\sqrt{1.92^2 + 1.77^2 + 1.5^2 + 1.2^2 + \dots + 0.35^2}}{241.59}$$

$$= \frac{15.43}{241.59} = 0.25271 = 25.27\%$$

I_{SC} / I_L pada Tranformator 1:

Diketahui:

$$I_L = 241.59 \text{ A}$$

$$Z = 6\%$$

$$V = 0.4 \text{ kV}$$

$$S = 1600 \text{ kVA}$$

$$I_{SC} = \frac{kVA \times 100}{\%Z \times \sqrt{3} \times kV}$$

$$I_{SC} = \frac{1600 \times 100}{6 \times \sqrt{3} \times 0.4} = \frac{160000}{4} = 40000$$

$$\frac{I_{SC}}{I_L} = \frac{40000}{241.59} = 165.56$$

Jadi, standar yang digunakan pada transformator 1 adalah THD_1 15% seperti yang ditunjukkan pada Tabel 2.2 karena hasil dari perhitungan I_{SC}/I_L berada pada range 100 – 1000. Kemudian, digunakan juga rumus yang sama pada transformator 2 dan 3 untuk mencari I_{THD} dan I_{SC} / I_L didapat Tabel sebagai berikut:

Tabel 3. 8 Analisis THD Arus di Hari Kerja

Transformator	THD Arus (%)			Evaluasi
	Pengukuran	Perhitungan	Standar	
Transformator 1	26.29	25.27	15	> Standar
Transformator 2	14.36	13.99	15	< Standar
Transformator 3	24.42	22.32	15	> Standar

Hasil perhitungan dan pengukuran ITHD pada hari kerja menunjukkan bahwa hasil yang relatif hampir sama atau perbedaannya tidak terlalu jauh. Artinya peralatan yang dipakai untuk melakukan pengukuran cukup presisi. Dari ketiga transformator untuk hasil pengukuran diperoleh ITHD berkisar antara 14.36% – 26.29% sedangkan untuk hasil ITHD perhitungan berkisar antara 13.99% - 25.27%. Dari data ini memperlihatkan bahwa transformator 1 dan 3 mempunyai harmonisa melebihi standar baik secara pengukuran maupun perhitungan. Hal ini disebabkan beban non linier yang dipergunakan lebih banyak bila dibandingkan transformator 2 seperti komputer, lampu hemat energi, printer, komponen elektronika daya atau peralatan yang mempunyai kondisi saturasi yang bekerja pada setiap siklus gelombang dari sumber tegangan. Proses kerja ini akan menghasilkan gangguan atau distorsi gelombang arus yang tidak sinusoidal. jumlah beban non linier akan menghasilkan gelombang yang kemudian menirathillean harmonisa pada gelombang arus fundamental. Distorsi harmonisa yang besar ini menyebabkan pemanasan lebih pada belitan transformator distribusi dan akan meyebabkan kenaikan tempantur. Dengan demikian untuk transformator 3 gangguan harmonisa arus berpotensi besar dari keseluruhan transformator yang diamati. Dengan demikian transformator berpotensi terjadi gangguama hamionisa apabila penggunaan beban tidak linier bertambah. Dalam melakukan perhitungan. standar yang dipakai adalah standar dari IEEE 519-1992.

b. Tegangan

V_{THD} pada Transformator 1:

$$V_{THD} = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} V_n^2}}{V_1}$$

$$\begin{aligned}
 &= \sqrt{\frac{V_3^2 + V_5^2 + V_7^2 + V_9^2 + \dots + V_{29}^2}{V_1}} \\
 &= \sqrt{\frac{1.92^2 + 0.85^2 + 0.54^2 + 0.51^2 + \dots + 0.16^2}{1552.21}} \\
 &= 0.04554 = 4.55\%
 \end{aligned}$$

Tabel 3. 9 Analisis THD Tegangan di Hari Kerja

Transformator	THD Tegangan (%)			Evaluasi
	Pengukuran	Perhitungan	Standar	
Transformator 1	4.61	4.55	5	< Standar
Transformator 2	4.24	3.79	5	< Standar
Transformator 3	4.43	4.16	5	< Standar

Dari Tabel 2.2 terlihat bahwa THD tegangan pada ketiga transformator masih dibawah standar IEEE 519-1992 sehingga hal ini menunjukkan distorsi harmonisa tidak membahayakan untuk transformator. Persentasi VTHD pada pengukuran berkisar antara 4,24 % - 4.61% dan untuk persentasi VTHD pada perhitungan berkisar antara 3.79% - 4.55%. Dari hasil persentasi dapat disimpulkan bahwa masih dibawah standar yang diijinkan yakni 5%. Dan hasilnya cukup presisi karena perbedaan antara nilai pengukuran dan perhitungan tidak begitu jauh. Oleh karena itu, spektrum distorsi harmonisa tidak menunjukkan masalah yang berarti atau berbahaya

Perhitungan di Hari Libur

a. Arus

I_{THD} pada transformator 1:

$$\begin{aligned}
 I_{THD} &= \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}}{I_1} \\
 &= \frac{\sqrt{I_3^2 + I_5^2 + I_7^2 + I_9^2 + \dots + I_{29}^2}}{I_1} \\
 &= \frac{\sqrt{1.41^2 + 1.27^2 + 1.10^2 + 0.92^2 + \dots + 0.24^2}}{242.55} \\
 &= \frac{\sqrt{7.21}}{242.55} = 0.1724 = 17.24\%
 \end{aligned}$$

I_{SC} / I_L pada Tranformator 1:

Diketahui:

$I_L = 242.55 \text{ A}$

$Z = 6\%$

$V = 0.4 \text{ kV}$

$S = 1600 \text{ kVA}$

$$I_{SC} = \frac{kVA \times 100}{\%Z \times \sqrt{3} \times kV}$$

$$\begin{aligned}
 I_{SC} &= \frac{1600 \times 100}{6 \times \sqrt{3} \times 0.4} = \frac{160000}{4} = 40000 \\
 \frac{I_{SC}}{I_L} &= \frac{40000}{242.55} = 164.91
 \end{aligned}$$

Jadi, standar yang digunakan pada transformator 1 adalah THDI 15% seperti yang ditunjukkan pada Tabel 2.2 karena hasil dari perhitungan ISC/IL berada pada range 100 – 1000. Kemudian, digunakan juga rumus yang sama pada transformator 2 dan 3 untuk mencari ITHD dan ISC / IL didapat Tabel sebagai berikut:

Tabel 3. 10 Analisis THD Arus di Hari Libur

Transformator	THD Arus (%)			Evaluasi
	Pengukuran	Perhitungan	Standar	
Transformator 1	18.32	17.24	15	> Standar
Transformator 2	13.54	12.92	15	< Standar
Transformator 3	12.34	11.98	15	< Standar

Hasil perhitungan dan pengukuran ITHD pada hari libur menunjukkan bahwa hasil yang relatif hampir sama atau perbedaannya tidak terlalu jauh. Artinya peralatan yang dipakai untuk melakukan pengukuran cukup presisi. Dari ketiga transformator untuk hasil pengukuran diperoleh ITHD berkisar antara 12.34% – 18.32% sedangkan untuk hasil ITHD perhitungan berkisar antara 11.98% - 17.24%. Dari data ini memperlihatkan bahwa hanya transformator 1 yang mempunyai harmonisa melebihi standar baik secara pengukuran maupun perhitungan. Berbeda dengan hari kerja, ITHD pada hari libur menurun cukup signifikan. Hal ini disebabkan karena beban non linier yang digunakan lebih sedikit daripada beban non linier yang digunakan pada hari kerja.

b. Tegangan

V_{THD} pada Transformator 1:

$$\begin{aligned}
 V_{THD} &= \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} V_n^2}}{V_1} \\
 &= \frac{\sqrt{V_3^2 + V_5^2 + V_7^2 + V_9^2 + \dots + V_{29}^2}}{V_1} \\
 &= \frac{\sqrt{0.55^2 + 0.52^2 + 0.39^2 + 0.35^2 + \dots + 0.11^2}}{1442.91} \\
 &= 0.03148 = 3.14\%
 \end{aligned}$$

Tabel 3. 11 Analisis THD Tegangan di Hari Libur

Transformator	THD Tegangan (%)			Evaluasi
	Pengukuran	Perhitungan	Standar	
Transformator 1	3.50	3.14	5	< Standar
Transformator 2	3.49	2.71	5	< Standar

Dari Tabel 2.2 terlihat bahwa THD tegangan pada ketiga transformator masih dibawah standar IEEE 519-1992 sehingga hal ini menunjukkan distorsi harmonisa tidak membahayakan untuk transformator. Persentasi VTHD pada pengukuran berkisar antara 3,32 % - 3.50% dan untuk persentasi VTHD pada perhitungan berkisar antara 2.36% - 3.14%. Dari hasil persentasi dapat disimpulkan bahwa masih dibawah standar yang diijinkan yakni 5%. Dan hasilnya cukup presisi karena perbedaan antara nilai pengukuran dan perhitungan tidak begitu jauh. Oleh karena itu, spektrum distorsi harmonisa tidak menunjukkan masalah yang berarti atau berbahaya.

PENUTUP

Kesimpulan

Dari uraian data dan hasil perhitungan analisis pengaruh harmonisa pada transformator distribusi, maka dapat disimpulkan:

1. Berdasarkan hasil pengukuran dan perhitungan di hari kerja, ITHD pada transformator 1 dan 3 berada diluar batas yang telah ditentukan pada IEEE 519-1992 yaitu sebesar 25.27% dan 22.32% (batas standar 15%).
2. Berdasarkan hasil pengukuran dan perhitungan di hari libur, ITHD pada transformator 1 berada diluar batas yang telah ditentukan pada IEEE 519-1992 yaitu sebesar 17.24% (batas standar 15%).
3. Berdasarkan hasil pengukuran dan perhitungan di hari kerja, VTHD pada masing-masing transformator berada dalam batas normal yaitu 4.55%, 3.79%, dan 4.16% (batas standar 5%).
4. Berdasarkan hasil pengukuran dan

perhitungan di hari kerja, VTHD pada masing-masing transformator berada dalam batas normal yaitu 3.14%, 2.71%, dan 2.36% (batas standar 5%).

5. Perbandingan antara beban harmonisa di hari kerja dan hari libur mempunyai perbedaan yang cukup signifikan. Hal ini terjadi karena beban non linier yang aktif pada hari kerja lebih banyak daripada hari libur.
6. Semakin besar arus harmonisa yang terjadi (26.29%), semakin tinggi pula suhu yang terukur (62.8°C).

REFERENSI

- Koswara, Indra Firmansyah. (2010). Analisis Pengaruh Harmonik Pada Transformator Daya di Industri Semen.
- Dugan, Roger. (2004). Electrical Power System Quality, Second Edition, McGraw-Hill
- Geduldt, Owen Christopher (2015). The Impact of Harmonic Distortion on Power Transformer Operating Near The Thermal Limit
- Tobing, Cristof N.H. (2008). Pengaruh Harmonik Pada Transformator Distribusi
- De Keulaer, Hans. (2008). Transformer derating, Leonardo Energy's Flagship Publication, Brussels, Belgium
- S. Key, Thomas. 1996. Cost and Benefit of Harmonic Current for Switch-Mode Power Supplies in Commercial Office Building, IEEE Transaction on Industries Application, Vol 32, No 5
- J. Arrilaga, Bradley D.A., Bodger P.S., (2003) *Power System Harmonics*, New York : John Wiley & Sons