



ANALISIS KUALITAS DAYA LISTRIK AKIBAT DAMPAK BEBAN NONLINEAR

Omsar Rudyanto Nadeak^{a*}, Rismen Sinambela^a, Martua Manik^b

^aProgram Studi Magister Teknik Elektro, Program Pascasarjana, Universitas Kristen Indonesia, Jl. Mayor Jendral Sutoyo No.2, Cawang, Jakarta Timur 13630 Indonesia

^bProgram Studi Teknik Industri, Fakultas Teknik Industri, Universitas Indraprasta PGRI, Jl. TB Simatupang No.58, Jagakarsa, Jakarta Selatan 12530 Indonesia

*Corresponding authors at: E-mail nadeakhasian@gmail.com Tel.: +6218-1316-703274

INFO ARTIKEL

Riwayat artikel:

Diajukan pada 03 Juli 2024

Direvisi pada 08 Agustus 2024

Disetujui pada 27 Agustus 2024

Tersedia daring pada 06 September 2024

Kata kunci:

Beban nonlinear, harmonik, kapasitor bank

Keywords:

Nonlinear loads, harmonics, capacitor banks

ABSTRAK

Gedung Komplek Badan Pendidikan Kristen PENABUR Harapan Indah merupakan pusat data dan informasi penting sekolah, dimana tingginya penggunaan perangkat elektronik sebagai beban nonlinier menjadi penyebab utama timbulnya harmonik yang dapat mengganggu sistem distribusi kelistrikan baik kerugian secara teknis maupun finansial. Oleh karena itu, investigasi pengaruh beban nonlinier terhadap tegangan, frekuensi, faktor daya, dan THD menjadi penting untuk dilakukan pengukuran. Metode penelitian dilakukan secara eksperimen dengan menggunakan alat ukur *Power Quality Analyzer Fluke 43B* pada titik beban panel listrik yang telah terpasang trafo 1100 kVA, kapasitor bank 525 V 50 Hz dengan *turned reactor* sebagai filter harmonik pasif. Data hasil pengukuran diambil satu kali pada setiap waktu pengukuran. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kondisi gedung mengalami ketidakseimbangan antara jumlah beban yang menyebabkan gelombang arus tidak sinusoidal dan bernilai positif akibat beban nonlinear. Namun, penggunaan trafo, kapasitor bank, dan *turned reactor* sebagai filter harmonik pasif memberikan dampak yang signifikan pada hasil pengukuran yaitu: nilai tegangan memenuhi standar SPLN-1-1995 tertinggi sebesar 227,1 V pada fasa T dengan batas izin antara 198-231 V; nilai rata-rata frekuensi memenuhi standar IEC sebesar < 50 Hz; nilai THD_V memenuhi standar IEEE 519-1992 sebesar 3,41% dengan batas izin < 5%, dan nilai THD_I memenuhi standar sebesar 7,13% dibawah batas izin < 15%; nilai faktor daya memenuhi standar SPLN 70-1 sebesar 0,98 mendekati angka 1 (satu) dan bernilai positif.

ABSTRACT

The building known as the Badan Pendidikan Kristen PENABUR Harapan Indah is a crucial hub for data and information within the school. The primary source of harmonics that can cause disruptions to the electrical distribution system, both financially and technically, is the extensive use of electronic devices as nonlinear loads. Consequently, it is critical to look into how nonlinear loads affect THD, voltage, frequency, and power factor. A Fluke 43B Power Quality Analyser measurement device was used in the study method's experimental setup at the load point of an electrical panel equipped with a 1100 kVA transformer, a bank of 525 V 50 Hz capacitors, and a turned reactor serving as a passive harmonic filter. Every measurement time, a single measurement is made. The findings demonstrated that nonlinear loads in the building circumstances led to an imbalance in the number of loads, which resulted in a non-sinusoidal and positive current wave. Nonetheless, there is a noticeable influence when using transformers, capacitor banks, and switched reactors as passive harmonic filters; measurement outcomes include: The average frequency value complies with IEC standard < 50 Hz; the voltage value meets the highest SPLN-1-1995 standard of 227.1 V in phase T with a permit limit between 198-231 V; the THDV value complies with IEEE 519-1992 standard of 3.41 % with a permit limit of < 5 %; the THDI value complies with standard of 7.13 % under the permit limit of < 15 %; the power factor value complies with SPLN 70-1 standard of 0.98 close to the number 1 (one) and is positive.

1. PENGANTAR

Sistem jaringan kelistrikan suatu gedung telah mengalami kemajuan teknologi yang signifikan, salah satunya Gedung Komplek Badan Pendidikan Kristen PENABUR (BPK PENABUR) Harapan Indah di Jl. Boulevar Bekasi. Hal ini dilakukan untuk menjaga kualitas daya listrik agar dapat memberikan sifat penghematan energi listrik dan menjaga kesehatan pada perangkat elektronik, Dimana sarana dan

prasarananya didukung oleh penggunaan perangkat berbasis elektronik seperti internet, lampu hemat energi, TV, komputer, printer, kulkas, pendingin ruangan (AC), motor pompa dan peralatan listrik lainnya (Wardhany dkk., 2022). Perangkat elektronik tersebut merupakan beban nonlinier yang menjadi penyebab timbulnya harmonik yang dapat mengganggu sistem distribusi tenaga listrik dan menurunkan kualitas daya listrik (Sinaga dkk., 2020). Harmonik terjadi ketika beban linier didalam sistem jaringan listrik mengubah gelombang arus dan tegangan menghasilkan gelombang dengan frekuensi kelipatan bulat dari frekuensi fundamentalnya, sehingga bentuk gelombang tidak sinusoidal murni (IEEE, 2009).

Beban nonlinier mengubah sifat sinusoidal arus daya dan menurunkan tegangan, akibatnya pada sistem kelistrikan terjadi aliran arus harmonik yang dapat menyebabkan gangguan pada jaringan distribusi listrik dan peralatan lainnya. Kegagalan isolasi dapat menyebabkan kerusakan atau penurunan umur peralatan, karena faktor daya sistem menjadi lebih rendah, bentuk gelombang tegangan sistem terdistorsi (Wardhany dkk., 2022), rugi-rugi daya sistem meningkat, pemanasan yang lebih tinggi, dan penggunaan energi listrik menjadi tidak efisien (Ramli dkk., 2021) (Al-Sharif dkk., 2022). Tingginya harmonik pada jaringan kelistrikan jika dibiarkan dapat menimbulkan masalah teknis dan finansial (Sinambela, 2023). Oleh karena itu, untuk memenuhi kebutuhan tenaga listrik, diperlukan penyediaan tenaga listrik yang baik dan stabil.

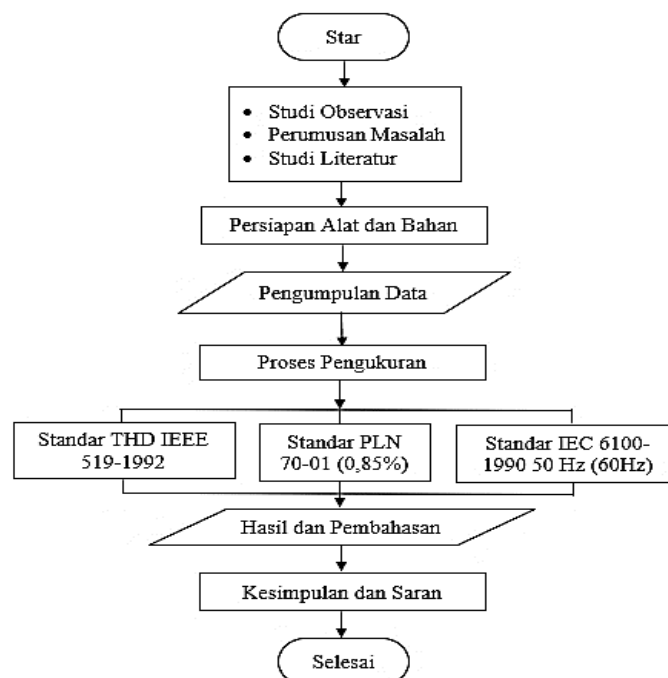
Penelitian terhadap pengaruh kapasitor bank dan *detuned reactor* menunjukkan bahwa *detuned reactor* lebih baik dari kapasitor bank dalam mengkompensasi daya reaktif dan faktor daya (Septya Mahendra dkk., 2023). Berdasarkan hasil analisis penelitian lain di Hotel Melia Bali dengan pemasangan kapasitor bank dapat meningkatkan faktor daya sebesar 11% dari 0,84 menjadi 0,95 (Putra dkk., 2020). Penelitian dengan memasang kapasitor bank sebesar 387,75 μF di Rumah Sakit Umum Daerah (RSUD) Manokwari dapat menurunkan daya reaktif dan daya semu menjadi 17,86 kVAR dan 9,5 kVA, sehingga memperoleh manfaat ekonomi baik dari tagihan listrik (Pangei dkk., 2023). Penelitian menggunakan metode *Load Flow Analysis* dengan *software* ETAP pada sebuah Gedung yang menggunakan kapasitor bank memiliki hasil yang signifikan yaitu, perbaikan faktor daya yang semula 0,85 menjadi 0,99 (Ruliyanta dkk., 2022). Menurut penelitian lain menyimpulkan bahwa penggunaan kapasitor akan memberikan dampak panas yang berlebihan pada peralatan seperti transformator dan motor listrik (Yakob Liklikwatil, 2019)

Gedung Komplek Badan Pendidikan Kristen PENABUR (BPK PENABUR) Harapan Indah bertanggung jawab untuk menyediakan layanan untuk membantu kinerja organisasi. Dalam menjalankan tugasnya dibutuhkan infrastruktur yang baik dan lancar dalam memberikan pelayanan tersebut. Penggunaan internet, komputer dan peralatan lainnya, merupakan beban listrik nonlinier yang menghasilkan distorsi harmonik yang dapat mengakibatkan penurunan kualitas daya listrik. Penggunaan perangkat elektronik secara bersamaan akan menyebabkan penurunan faktor daya pada sistem jaringan listrik tersebut. Oleh karena itu, perlu dilakukan analisis tentang seberapa besar faktor daya frekuensi gelombang dan *Total Harmonic Distortion* (THD) yang terjadi. Langkah ini dilakukan untuk mengevaluasi kualitas listrik suatu gedung dan sebagai solusi menyelesaikan perbaikan sistem jaringan kelistrikan. Alat ukur *Power Quality Analyzer Fluke 43B* digunakan dengan memperhatikan data-data seperti; arus, tegangan, frekuensi, faktor daya, THD tegangan, dan THD arus.

2. METODE

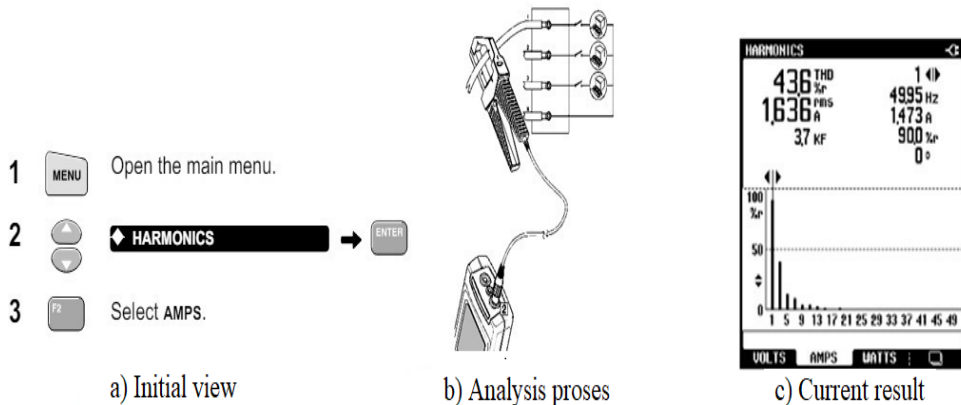
2.1. Langkah penelitian

Metode penelitian dilakukan secara eksperimental di Gedung Komplek Badan Pendidikan Kristen PENABUR (BPK PENABUR) Harapan Indah di Jl. Boulevar Bekasi pada tanggal 14 Mei 2024 dengan menggunakan alat ukur *Power Quality Analyzer Fluke 43B*. Pengukuran dipusatkan di titik beban pada panel listrik yang telah terpasang trafo dengan kapasitas sebesar 1100 kVA dan kapasitor bank sebesar 525 V 50 Hz serta *tuned reactor* sebagai filter harmonik pasif (*Passive Harmonic Filter*). Data sampel pengukuran didapatkan satu kali dari setiap data hasil waktu pengukuran. Tujuan penelitian ini adalah untuk mengidentifikasi nilai arus, tegangan, frekuensi, faktor daya listrik termasuk spektrum harmonik, THD arus dan THD tegangan. Berikut diagram alir penelitian diperlihatkan pada Gambar 1.



Gambar 1: Diagram alir penelitian

Untuk menjaga keselamatan, Alat Pelindung Diri (APD) penting digunakan selama pengukuran. Langkah dalam penggunaan alat ukur *Fluke 43B* harus tepat, yaitu; kabel hitam alat ukur terhubung ke kabel netral dan kabel merah alat ukur terhubung ke kabel fasa, tang amper disambungkan ke kabel pengukur, buka menu instrument, selanjutnya pilih harmonik dan lakukan pengukuran tegangan atau arus kemudian tekan *enter*. Hasil pengukuran akan ditampilkan pada layar alat ukur di catat dan di dokumentasikan. Tahap terakhir adalah menganalisis hasil pengukuran. Lebih jelasnya penggunaan alat ukur *Fluke 43B* diperlihatkan pada Gambar 2 (Analyzer, 2001).



Gambar 2: Prosedur langkah pengukuran harmonik arus

2.2. Parameter data penelitian

Gedung tersebut menggunakan sistem kelistrikan 3 fasa yang memiliki tiga buah konduktor atau kabel yang membawa arus listrik dengan simbol RST, dimana fasa R berwarna hitam, fasa S berwarna coklat, fasa T berwarna abu-abu dan N sebagai kawat netral berwarna hijau kuning sesuai peraturan PUIL 2011. Data penelitian diambil tiga kali pada waktu yang berbeda pada setiap fasa (RST) dalam 1 kali pengukuran. Pertama, aktivitas dimulai pada pukul 8:00 wib dan beberapa perangkat elektronik dihidupkan. Kedua, saat istirahat pada pukul 12:00 wib dan semua perangkat dalam kondisi menyala. Ketiga pukul 16:00 wib, setelah semua kegiatan selesai dan beberapa perangkat elektronik dimatikan. Langkah awal nilai tegangan dan arus diukur pada setiap fasa, selanjutnya hasil pengukuran tegangan dibandingkan dengan standar SPLN-1:1995, yang memiliki batas ± 10% (PT. PLN, 1995). Hasil pengukuran frekuensi dibandingkan dengan standar IEC 6100-2-1-1990, yang memiliki 50 Hz (60 Hz) (IEC, 1990). Untuk faktor daya, hasil dibandingkan dengan standar SPLN 70-1-1985 sebesar 85% (PT. PLN, 1985)(Wicaksono dkk., 2021). Hasil pengukuran spektrum harmonik, THD% arus, dan THD% tegangan mengacu pada standar IEEE 519-1992. Berikut standar IEEE 519-1992 tegangan yang ditunjukkan pada Tabel 1 dan standar IEEE 519-1992 arus pada Tabel 2 (IEEE, 1992).

Tabel 1: Batas Distorsi Tegangan

Bus voltage V at PCC	Individual harmonic (%)	Total harmonic distortion THD (%)
69 kV and below	3,0	5,0
69 kV < V ≤ 161 kV	1,5	2,5
161 kV and above	1,0	1,5

Tabel 2: Batas Distorsi Arus Untuk Sistem Dengan Nilai Maksimum 120 V Hingga 69 kV

Maximum harmonic current distortion in percent of IL						
Individual harmonic order (odd harmonics)						
ISC/IL	< 11	11 ≤ h < 17	17 ≤ h < 23	23 ≤ h < 35	35 ≤ h ≤ 50	TDD
< 20c	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

2.3. Teknis analisa data penelitian

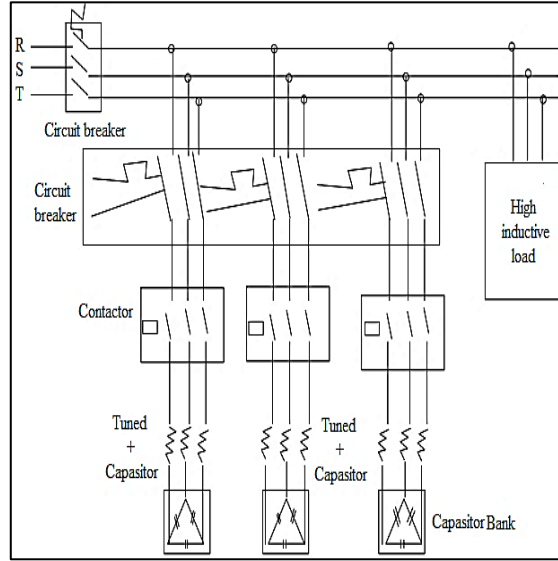
Gedung Komplek Badan Pendidikan Kristen PENABUR (BPK PENABUR) Harapan Indah membutuhkan daya listrik yang besar dalam melakukan aktifitasnya. Oleh sebab itu, trafo atau transformator digunakan untuk membantu menaikkan menurunkan level tegangan pada sistem jaringan listrik tersebut. Trafo yang digunakan dalam penelitian memiliki kapasitas sebesar 1100 KVA dengan arus primer sebesar 5,25 A. Lebih jelasnya data spesifikasi trafo yang digunakan ditunjukkan pada Tabel 3.

Tabel 3: Data Spesifikasi Transformator

Data Trafo	Nilai	Satuan
Daya, (kVA)	1100	KVA
Tegangan Primer (V HV)	11000	V
Tegangan Sekunder (V LV)	415	V
Arus Primer (I HV)	5,25	A
Arus Sekundert (ILV)	139,1	A
Impedansi (Z)	4	%

Berdasarkan data transformator yang terpasang dengan titik pengukuran, dapat diketahui nilai Iload sebesar 139,1 A dan nilai impedansi 4%, maka untuk batasan distorsi harmonik arus berdasarkan SPLN D5.004-1: 2012 adalah 15% dengan rentang nilai ISC/IL

yaitu $100 < 1000$ (PT. PLN, 2012). Hasil pengukuran dari alat ukur berupa gelombang atau spektrum, teks dan grafik yang terjadi pada setiap orde harmonik. Berikut wiring penelitian diperlihatkan pada Gambar 3.



Gambar 3: Wiring panel sistem kelistrikan

Kualitas daya listrik adalah penyimpangan yang terjadi pada tegangan, arus, dan frekuensi, sehingga menyebabkan kegagalan atau kesalahan fungsi kerja pada peralatan yang digunakan oleh konsumen (Dugan, 2004). Konsep segitiga daya dapat diterapkan untuk mengukur ketepatan daya dan faktor daya dalam sistem jaringan listrik. Segitiga daya adalah hubungan antara tiga elemen dasar yaitu; daya aktif (*power active*), daya reaktif (*reactive power*), dan daya semu (*apparent power*) yang membentuk arus bolak balik (AC) dalam sistem tiga fasa. Persamaan 1 digunakan untuk mendapatkan nilai daya semu (S), daya aktif (P) dapat menggunakan Persamaan 2, dan daya reaktif (Q) dapat menggunakan Persamaan 3 (Zhafran dkk., 2023). Jumlah daya listrik yang digunakan dan faktor daya dapat dipengaruhi oleh sifat beban sistem jaringan listrik yang terpasang secara resistif, induktif, dan kapasitif. Faktor daya atau $\cos \varphi$ memiliki nilai yang berkisar antara 0 dan 1 diwakili dalam persen, dan dapat dihitung dengan menggunakan Persamaan 4 (Nadeak dkk., 2024).

$$S = \sqrt{3} \times V \times I \quad (1)$$

$$P = \sqrt{3} \times V \times I \times \cos \varphi \quad (2)$$

$$Q = \sqrt{3} \times V \times I \times \sin \varphi \quad (3)$$

$$\cos \varphi = \frac{P}{S} \quad (4)$$

Dimana:

S = daya semu (VA)

P = daya aktif (W)

Q = daya reaktif (VAR)

$\cos \varphi$ = faktor daya (%)

Untuk mendapatkan nilai rata-rata arus dapat menggunakan Persamaan 5 (Zulkarnaini dkk., 2024).

$$IR \text{ rata-rata} = \frac{IR+IS+IT}{3} \quad (5)$$

Total Harmonic Distortion (THD) adalah nilai persentase antara perbandingan komponen harmonik total terhadap komponen fundamental. Langkah berikutnya adalah memasukkan data waktu hasil pengukuran ke dalam tabel dan menghitung nilai THD rata-rata tegangan dan arus. Nilai distorsi THD arus dapat dihitung dengan menggunakan Persamaan 6 (IEEE, 1992)(PT. PLN, 2012).

$$THD_I = \frac{\sqrt{\sum_2^h I_h^2}}{I_1} \times 100\% \quad (6)$$

Dimana:

I_h = komponen harmonik arus (A)

I_1 = komponen fundamental rms (A)

Nilai distorsi THD tegangan dapat dihitung menggunakan Persamaan 7 (IEEE, 1992)(PT. PLN, 2012).

$$THD_V = \frac{\sqrt{\sum_2^h V_h^2}}{V_1} \times 100\% \quad (7)$$

Dimana:

V_h = komponen harmonik tegangan (V)

V_1 = komponen fundamental rms (V)

Hasil pengukuran kemudian dibandingkan dengan *Standard* IEEE 519-1992, yang memiliki batas nilai THD_V 5% dan THD_I 15%. Tahap akhir menganalisis nilai rugi daya yang disebabkan oleh harmonis yang menunjukkan adanya arus netral yang sangat besar. Nilai rugi daya dihitung menggunakan Persamaan 8 (Zulkarnaini dkk., 2024).

$$P_{Netral} = I_N^2 R_N \tag{8}$$

Dimana:

P Netral = daya penghantar netral (W)

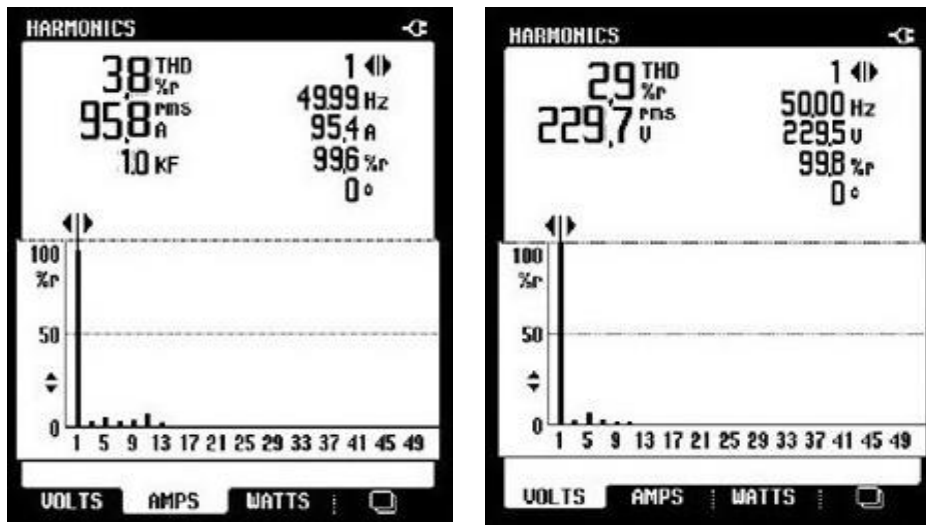
I_N = arus yang melalui penghantar netral (A)

R_N = tahanan penghantar netral (ohm)

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Hasil Analisis Pengukuran Fasa R

Hasil pengukuran pada fasa R menunjukkan bahwa harmonik arus tertinggi terjadi pada pukul 12:00 wib sebesar 95,8 A dan harmonik tegangan tertinggi terjadi pada pukul 16:00 wib sebesar 229,7 V. Hasil pengukuran pada fasa R diperlihatkan pada Gambar 4.



a. Harmonik arus tertinggi
b. Harmonik arus tertinggi
Gambar 4: Hasil pengukuran spektrum harmonik arus dan tegangan pada fasa R

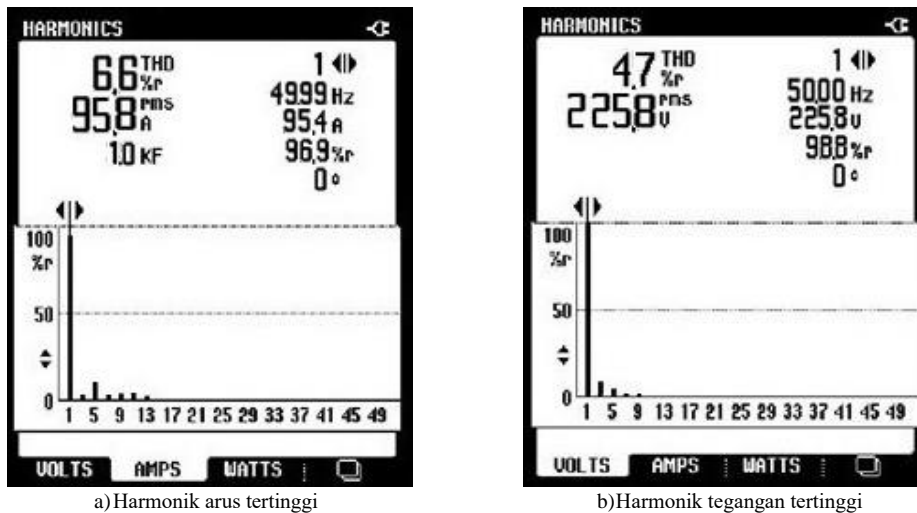
Berdasarkan hasil pengukuran pada fasa R telah mengalami fluktuasi pada setiap waktu pengukuran. Nilai tegangan tertinggi terjadi pada pukul 16:00 wib sebesar 229,7 V, namun nilai arus diposisi terendah sebesar 47,3 A. Nilai tegangan terendah pada pukul 12:00 wib sebesar 210,7 V dan nilai arus sebesar 51,7 A. Untuk nilai arus tertinggi terjadi pada pukul 08:00 wib sebesar 95,8 A. Hasil pengukuran spektrum harmonik arus (THD_I) tidak melebihi nilai batas izin standar IEEE 519-1992 yaitu $< 5\%$ dan untuk nilai spektrum harmonik tegangan (THD_V) dibawah nilai batas izin standar yaitu $< 15\%$. Hasil pengukuran frekuensi memiliki nilai rata-rata dibawah standar IEC yaitu 50 Hz, sedangkan nilai faktor daya mendekati nilai < 1 dan bernilai positif yang artinya bahwa kapasitas daya aktif selalu lebih kecil daripada kapasitas daya semu dan menunjukkan seberapa efisien penggunaan listrik (Esye dkk.,2021). Semakin mendekati angka satu artinya semakin efektif dalam hal penggunaan daya listrik (Lisiani dkk., 2020). Hal ini disebabkan perangkat elektronik tidak dipergunakan secara bersamaan. Data hasil pengukuran pada fasa R ditunjukkan pada Tabel 4.

Tabel 4: Data Hasil Pengukuran Fasa R

Parameter	Waktu (wib)		
	08:00	12:00	16:00
Tegangan rms (V)	214,6	210,7	229,7
Arus rms (A)	95,8	51,7	47,3
Arus Netral (A)	51,4	57,8	27,52
THD_V (%)	3,8	4,8	2,9
THD_I (%)	7,5	8,4	5,6
Frekuensi (HZ)	49,9	50	50
P (KW)	11,8	11,5	9,7
S (KVA)	11,9	11,8	9,8
Q (KVAR)	2,38	2,36	1,96
PF	0,99	0,97	0,99

3.2. Hasil Analisis Pengukuran Fasa S

Berdasarkan hasil pengukuran pada fasa S memiliki perbedaan signifikan, dimana nilai harmonik arus tertinggi pada pukul 12:00 wib sebesar 95,8 A dan nilai harmonik tegangan tertinggi terjadi pada pukul 16:00 wib sebesar 225,8 V. Kondisi beban tidak terdistribusi secara merata pada setiap fasa, sehingga arus antar fasa memiliki perbedaan nilai yang signifikan. Hal lainnya adalah adanya arus netral yang nilainya melebihi nilai fasa, sehingga menyebabkan rugi-rugi daya pada kawat netral. Perbedaan tersebut terlihat pada hasil pengukuran tegangan pada pukul 08:00 wib sebesar 209,8 V, kemudian mengalami peningkatan pada pukul 12:00 wib sebesar 211,8 V dan naik lagi menjadi 225,8 V pada pukul 16:00 wib, lebih jelasnya diperlihatkan pada Gambar 5.



Gambar 5. Hasil pengukuran spektrum harmonik arus dan tegangan pada fasa S

Gambar 5 menunjukkan bahwa hasil pengukuran arus tertinggi pada pukul 12:00 wib sebesar 95,8 A dan nilai terendah pada pukul 16:00 wib sebesar 35,4 A. Rata-rata beban listrik memiliki sifat tegangan, arus nonlinier, sehingga arus tidak sebanding dengan tegangan dan berfluktuasi dengan impedansi beban bolak-balik (Mohd Radzi dkk., 2020). Hasil pengukuran pada fasa S ditunjukkan pada Tabel 5.

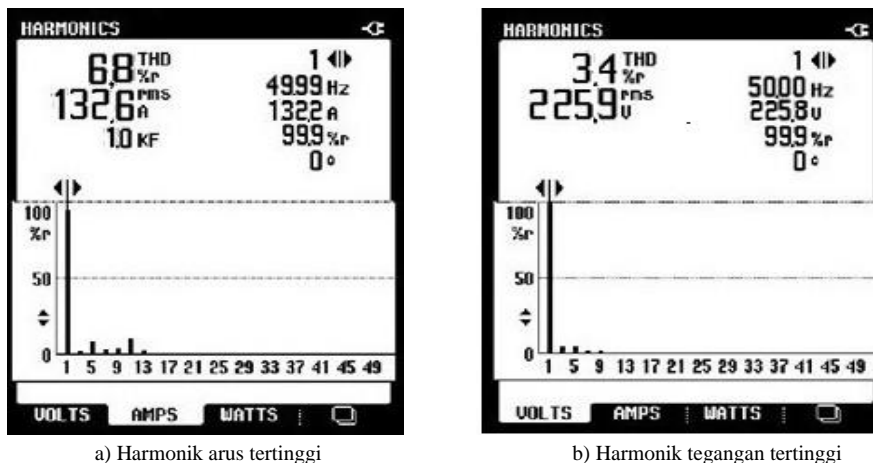
Tabel 5: Data Hasil Pengukuran Fasa S

Parameter	Waktu (wib)		
	08:00	12:00	16:00
Tegangan rms (V)	209,8	211,8	225,8
Arus rms (A)	77,6	95,8	35,4
Arus Netral (A)	51,4	57,8	27,52
THD _V (%)	2,3	3,4	4,7
THD _I (%)	5,6	6,6	11,5
Frekuensi (HZ)	49,9	49,9	50
P (KW)	12,8	16,8	9,7
S (KVA)	13,2	17,4	9,9
Q (KVAR)	2,64	3,48	1,98
PF	0,97	0,97	0,98

Tabel 5 memperlihatkan perbedaan nilai disetiap fasa juga disebabkan oleh meningkatnya penggunaan perangkat elektronik, sehingga jumlah beban mempengaruhi hasil pengukuran. Berdasarkan hasil pengukuran pada fasa S dapat disimpulkan yaitu; nilai frekuensi rata-rata masih dapat memenuhi standar IEC 6100-2-1-1990 sebesar 49,9 Hz; hasil pengukuran nilai faktor daya sesuai nilai batas izin standar SPLN-1:1995 dengan nilai mendekati < 1 dan bernilai positif; untuk nilai THD_V dibawah nilai batas izin standar IEEE 519-1992 $< 5\%$ dengan nilai rata-rata sebesar 3,6%; dan hasil pengukuran THD_I memenuhi batas izin standar IEEE 519-1992 $< 15\%$ dengan nilai rata-rata sebesar 7,9%

3.3. Hasil Analisis Pengukuran Fasa T

Hasil pengukuran pada fasa T, nilai harmonik arus tertinggi pada pukul 12:00 wib sebesar 132,4 A dan harmonik tegangan tertinggi terjadi pada pukul 16:00 wib sebesar 225,9 V, diperlihatkan pada Gambar 6.



Gambar 6: Hasil pengukuran spektrum harmonik arus dan tegangan pada fasa T

Berdasarkan hasil pengukuran pada fasa T menunjukkan bahwa nilai arus puncak terjadi pada pukul 12:00 wib sebesar 132,6 A, namun nilai tegangan mengalami penurunan paling rendah dengan nilai tegangan sebandingnya, yaitu sebesar 205,4 V. Hasil pengukuran

tegangan puncak terjadi pada pukul 15:00 wib sebesar 225,9 V dan nilai terendah terjadi pada pukul 12:00 wib sebesar 205,4 V. Hal ini terjadi akibat adanya beban nonlinear yang tidak merata disetiap fasa pada waktu pengukuran, sehingga nilai arus tidak sebanding dengan nilai tegangan. Lebih jelasnya hasil pengukuran ditunjukkan pada Tabel 6.

Tabel 6: Data Hasil Pengukuran Fasa T

Parameter	Waktu (wib)		
	08:00	12:00	16:00
Tegangan rms (V)	215,2	205,4	225,9
Arus rms (A)	109,2	132,6	78,6
Arus Netral (A)	51,4	57,8	27,52
THD _V (%)	2,6	2,8	3,4
THD _I (%)	5,4	6,8	6,8
Frekuensi (HZ)	50	49,9	50
P (KW)	21,4	18,7	20,4
S (KVA)	21,6	18,9	20,6
Q (KVAR)	4,32	3,78	4,12
PF	0,99	0,99	0,99

Tabel 6 menunjukkan bahwa hasil pengukuran pada fasa T mengalami fluktuasi pada setiap fasa arus dan tegangan, namun penggunaan kapasitor bank dengan *tuned reactor* dapat memberikan nilai yang signifikan, yaitu; hasil pengukuran nilai rata-rata frekuensi memenuhi nilai batas izin standar IEC 6100-2-1-1990 sebesar 49,97 Hz; nilai faktor daya rata-rata sesuai standar sebesar 0,99 mendekati nilai 1 dan bernilai positif; sedangkan nilai THD_I rata-rata sebesar 6,3% dibawah batas IEEE 519-1992 (<15%); dan nilai THD_V pada setiap fasa tidak melebihi nilai batas IEEE 519-1992 (5%) yaitu rata-rata sebesar 2,9%.

3.4. Hasil Analisis Arus Rata-Rata

Harmonik terjadi akibat adanya beban nonlinier, dimana arus tidak sebanding dengan tegangan, oleh karena itu perlu dilakukan pengukuran terhadap arus dan tegangan. Berikut data rekap hasil pengukuran harmonik arus ditunjukkan pada Tabel 7.

Tabel 7: Rekap Hasil Pengukuran Harmonik Arus

Waktu Pengukuran	Arus Fasa (A)			
	IR	IS	IT	IN
08.00	95,8	77,6	109,2	47,5
12.00	51,7	95,8	132,6	56,6
16.00	47,3	35,4	78,6	27,52

Untuk mengetahui nilai rata-rata arus yang terjadi disetiap fasa, dilakukan perhitungan berdasarkan hasil data diatas dengan menggunakan Persamaan 2.

$$\begin{aligned}
 IR \text{ rata - rata} &= \frac{IR+IS+IT}{3} \\
 &= \frac{95,8 + 77,6 + 109,2}{3} \\
 &= 94,20 \text{ A}
 \end{aligned}$$

Berdasarkan hasil perhitungan harmonik arus rata-rata, maka didapatkan nilai harmonik arus disetiap waktu pengukuran yang ditunjukkan pada Tabel 8.

Tabel 8: Hasil Harmonik Arus Rata-Rata

Parameter	Waktu		
	08:00	12:00	16:00
Arus rata-rata (A)	94,20	93,37	53,77

Tabel 8 menunjukkan arus rata-rata pada Gedung Komplek Badan Pendidikan Kristen PENABUR (BPK PENABUR) Harapan Indah dalam kondisi tidak seimbang. Hal ini ditandai dengan terjadinya perbedaan nilai arus pada setiap fasa. Nilai tertinggi harmonik arus rata-rata sebesar 93,63 A pada pukul 12.00 wib dan nilai terendah pada pukul 16:00 wib sebesar 53,77 A. Hal ini disebabkan adanya ketidakseimbangan jumlah beban menyebabkan terjadinya gelombang arus tidak sinusoidal dan bernilai positif (Shklyarskiy dkk., 2020). Hal ini akan menyebabkan kualitas daya listrik memburuk, jika dibiarkan akan berdampak pada kerusakan alat elektronik dan peningkatan biaya tagihan listrik PLN. Selanjutnya, perhitungan dilakukan untuk menghitung nilai harmonik tegangan rata-rata. Hasil perhitungan harmonik tegangan rata-rata ditunjukkan pada Tabel 9.

Tabel 9: Hasil Harmonik Tegangan Rata-Rata

Parameter	Waktu		
	08:00	12:00	16:00
Tegangan rata-rata (V)	213,20	209,30	227,13

Hasil pengukuran menunjukkan bahwa beban Gedung Komplek Badan Pendidikan Kristen PENABUR (BPK PENABUR) Harapan Indah memiliki perbedaan nilai tegangan disetiap fasanya. Tegangan yang diizinkan turun sebesar 10% dan naik sebesar 5% dari tegangan normal 220 V. Akibatnya, tegangan tetap berada di batas yang diizinkan antara 198 dan 231 V, dengan tegangan 213,20 V. pada fasa R, 209,30 V pada fasa S, dan 227,13 V pada fasa T. Hal ini dipengaruhi oleh penggunaan perangkat elektronik yang tidak seimbang dan

merupakan beban nonlinear pada distribusi sistem kelistrikan gedung tersebut. Beban yang tidak seimbang tersebut dapat menimbulkan rugi-rugi pada netral yang besarnya dapat dihitung menggunakan Persamaan 4.

$$P_{\text{Netral}} = I_N^2 \cdot R_N$$

$$P_{\text{Netral}} = (51,4)^2 \times 0,6842 = 1807,629 \text{ Watt} = 1,808 \text{ KW (pada pukul 08:00 wib)}$$

$$P_{\text{Netral}} = (57,8)^2 \times 0,6842 = 2285,803 \text{ Watt} = 2,286 \text{ KW (pada pukul 12:00 wib)}$$

$$P_{\text{Netral}} = (27,52)^2 \times 0,6842 = 518,179 \text{ Watt} = 0,518 \text{ KW (pada pukul 16:00 wib)}$$

Hasil perhitungan diatas menunjukkan bahwa rugi-rugi pada netral tertinggi pada fasa S sebesar 2,286 kW dan terendah pada fasa T sebesar 0,518 kW. Ketidak seimbangan beban pada setiap fasa sangat mempengaruhi kualitas daya. Ketika ada ketidakseimbangan beban, arus mengalir ke netral trafo. Arus ini menyebabkan kerugian, yang terdiri dari kerugian akibat arus netral pada penghantar netral trafo dan kerugian akibat arus netral yang mengalir ke tanah.

3.5. Hasil Analisis Total Distorsi Harmonik (THD)

Total Harmonic Distortion (THD) pengukuran distorsi harmonik yang ada dalam suatu sinyal dan didefinisikan sebagai rasio jumlah daya semua komponen harmonik terhadap daya frekuensi dasar. Memahami THD adalah salah satu cara yang paling efektif untuk menggunakan listrik yang baik dan benar. Berikut rekap data hasil pengukuran THD di gedung tersebut ditunjukkan pada Tabel 10.

Tabel 10: Hasil Analisis THD_V (%) dan THD_I (%)

Parameter	Waktu (wib)								
	08:00			12:00			16:00		
	R	S	T	R	S	T	R	S	T
THD_V (%)	3,8	4,8	2,9	2,3	3,4	4,7	2,6	2,8	3,4
THD_I (%)	7,5	8,4	5,6	5,6	6,6	11,5	5,4	6,8	6,8

Tabel diatas menunjukkan bahwa data setiap waktu pengukuran terhadap *Total Harmonic Distortion* Arus (THD_I) tidak melebihi nilai batas izin standar IEEE 519-1992 yaitu $< 15\%$ dan nilai *Total Harmonic Distortion* Tegangan (THD_V) memenuhi nilai batas izin yaitu $< 5\%$. Penggunaan kapasitor bank dengan *tuned reactor* sebagai filter harmonik pasif (*Passive Harmonic Filter*) memberikan dampak yang signifikan.

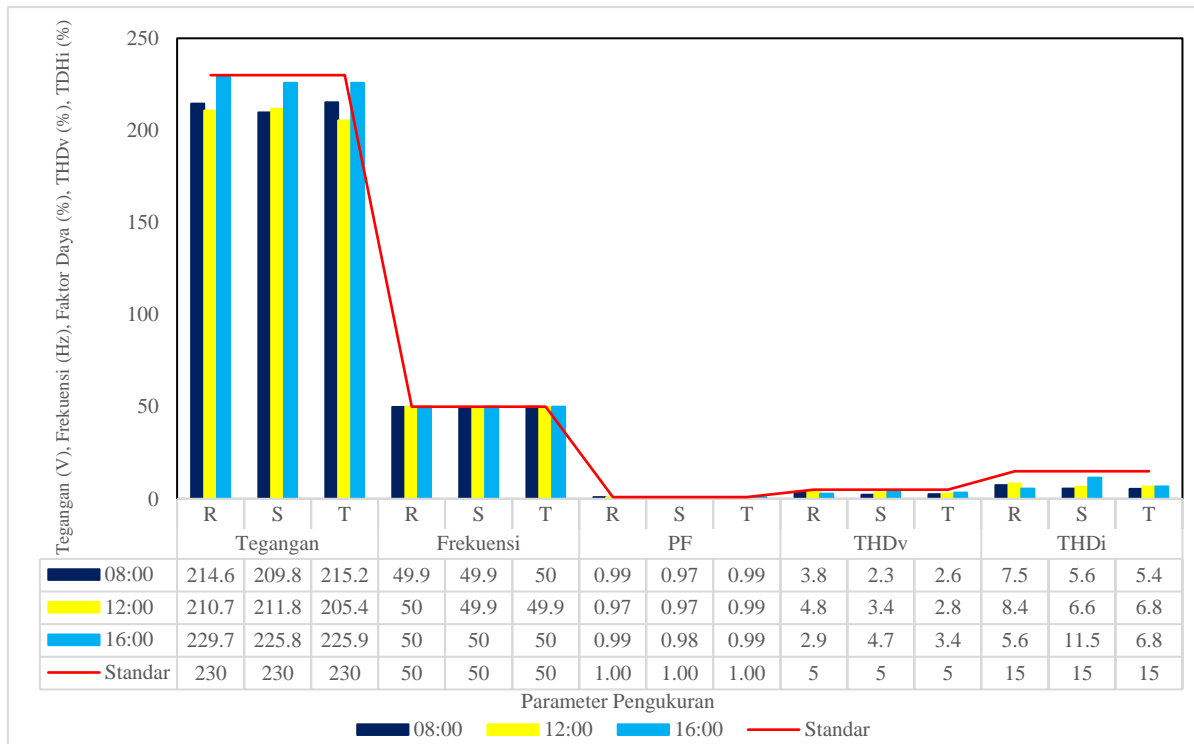
3.6. Hasil Analisis Rekapitulasi Pengukuran

Kualitas daya suatu gedung sangat penting diukur sesuai standar untuk mengetahui baik dan buruknya kualitas pasokan tenaga listrik, yang digunakan. Berikut rekap data hasil pengukuran ditunjukkan pada Tabel 11.

Tabel 11: Rekapitulasi Data Hasil Pengukuran

No	Parameter	Hasil				Standar Acuan	Lulus		Standar
		Waktu (WIB)			Rata-rata		Ya	Tidak	
		08:00	12:00	16:00					
1	Arus (A)								
	Fasa R-S-T	94,20	93,37	53,77	80,44	$\leq 139,1 \text{ A}$	√	100% of Full Load IFull Load = 139,1 A	
2	Tegangan (V)								
	Fasa R-S-T	213,2	209,3	227,1	216,54	$\pm 10\%$	√	SPLN-1:1995	
3	DAYA (W)								
	Daya Semu (kVA)	15,57	16,03	13,43	15,01	$\leq 3500 \text{ kVA}$	√		
	Daya Aktif (kW)	15,33	15,67	13,27	14,76			100% of Full Load	
	Daya Reaktif (KVAR)	3,11	3,21	2,69	3,00				
	Faktor Daya (PF, %)	0,98	0,98	0,99	0,98	$\geq 0,85$	√	85% of Apparent Power	
4	Frekuensi (Hz)								
	Frekuensi	49,93	49,93	50,00	49,96	50 Hz (60Hz)		IEC 6100-2-1-1990	
5	THD-V (%)								
	Fasa R-S-T	2,90	3,67	3,67	3,41	$\leq 5\%$	√	IEEE, 519-1992	
6	THD-I (%)								
	Fasa R-S-T	6,17	7,27	7,97	7,13	$\leq 15\%$	√	IEEE, 519-1992	

Tabel 11 menunjukkan hasil pengukuran di Gedung Komplek Badan Pendidikan Kristen PENABUR (BPK PENABUR) Harapan Indah mengalami gangguan harmonik yang ditandai bentuk gelombang arus dan tegangan tidak sinusoidal (memiliki riak). Kondisi beban tidak terdistribusi dengan baik pada setiap fasa, sehingga menimbulkan harmonik yang dapat membahayakan pada system jaringan dan menimbulkan rugi-rugi. Penggunaan kapasitor bank dengan *tuned reactor* sebagai filter harmonik pasif (*Passive Harmonic Filter*) memberikan dampak yang signifikan walaupun bentuk gelombang arus dan tegangan tidak sinusoidal. Hal ini dapat dibuktikan dari hasil pengukuran, yaitu; nilai tegangan berada di batas yang diizinkan sesuai standar SPLN-1:1995 sebesar 215,4 V; nilai faktor daya dapat memenuhi standar SPLN 70-1 sebesar 0,98 mendekati angka 1(satu) dan bernilai positif; nilai frekuensi memenuhi batas izin standar IEC sebesar 49,96 Hz; nilai THD_V memenuhi standar IEEE 519-1992 ($< 5\%$) sebesar 2,4%, nilai THD_I memenuhi standar IEEE 519-1992 ($< 15\%$) sebesar 6,13%. Lebih jelasnya rekapitulasi hasil pengukuran diperlihatkan pada Gambar 7.



Gambar 7: Grafik hasil rekapitulasi pengukuran

Gambar 7 menunjukkan grafik hasil pengukuran pada waktu pengukuran disetiap fasa. Hasil pengukuran tegangan tertinggi pada pukul 16:00 wib pada fasa R sebesar 229,7 V dan nilai terendah pada pukul 12:00 wib pada fasa T sebesar 205,4 V. Hasil pengukuran tegangan masih dibawah batas nilai standar SPLN-1:1995 yaitu 230 V. Hasil pengukuran frekuensi pada setiap fasa memiliki nilai rata-rata 49,96 Hz dan memenuhi batas izin dibawah nilai standar IEC 50 Hz. Hasil pengkuran faktor daya pada setiap waktu pengukuran dan pada setiap fasa, dapat memenuhi standar SPLN 70-1 dengan nilai rata-rata sebesar 0,98 mendekati angka 1 (satu) dan bernilai positif yang artinya kualitas daya pada gedung administrasi tersebut dalam kondisi baik. Hasil pengukuran *Total Harmonic Distortion* tegangan (THD_V) memenuhi batas izin standar IEEE 519-1992 ($< 5\%$) dengan nilai rata-rata sebesar 3,41%. Hasil pengukuran *Total Harmonic Distortion* arus (THD_I) memenuhi batas izin standar IEEE 519-1992 ($< 15\%$) dengan nilai rata-rata sebesar 7,13%.

4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil analisis di Gedung Komplek Badan Pendidikan Kristen PENABUR (BPK PENABUR) Harapan Indah dalam kondisi tidak seimbang antara jumlah beban yang menyebabkan terjadinya gelombang arus tidak sinusoidal dan bernilai positif akibat beban nonlinear. Namun, penggunaan trafo, kapasitor bank dan *turned reactor* sebagai filter harmonik pasif memberikan dampak yang signifikan dengan hasil pengukuran antara lain: nilai tegangan memenuhi standar SPLN-1-1995 tertinggi sebesar 227,1 V pada fasa T dengan batas izin antara 198-231 V, nilai rata-rata frekuensi memenuhi standar IEC sebesar < 50 Hz; nilai THD_V memenuhi standar IEEE 519-1992 sebesar 3,41% dengan batas izin $< 5\%$, dan nilai THD_I memenuhi standar sebesar 7,13% dibawah batas izin $< 15\%$. Kualitas daya sistem kelistrikan trafo dalam kondisi yang cukup baik. Namun, peningkatan rugi-rugi pada kawat netral tertinggi terjadi pada pukul 12:00 wib sebesar 2,286 kW, sehingga ketidakseimbangan beban yang cukup signifikan dimana beban fasa T hampir dua kali beban fasa R. Pengecekan sistem jaringan perlu dilakukan secara rutin agar menghindari dampak harmonik terhadap kesehatan perangkat elektronik. Solusi lainnya adalah dapat menggunakan metode lain yang lebih efektif dan efisien untuk meminimalisir pengaruh dari dampak harmonik.

UCAPAN TERIMAKASIH

Terimakasih kami ucapkan kepada Bagian Umum Managemen Gedung Kompleks Badan Pendidikan Kristen PENABUR (BPK PENABUR) Harapan Indah yang telah memberikan kesempatan dan memberikan data serta informasi terkait penelitian ini, sehingga dapat diselesaikan dengan baik. Terima kasih juga kepada dosen pembimbing dan seluruh dosen pengajar Universitas Kristen Indonesia yang telah memberikan ilmu yang bermanfaat. Terimakasih juga kepada Dosen Teknik Industri Universitas Indraprasta PGRI yang meminjamkan alat ukur *Power Quality Analyzer Fluke 43B* serta masukan dan sarannya, sehingga penelitian ini dapat diselesaikan dengan baik.

DAFTAR PUSTAKA

Ahmad Zhafran, Aripin Triyanto, Hadi Permana. 2023. "Analisa Pengaruh Nilai Kapasitor Bank Terhadap Faktor Daya Pada Gedung Treasury Tower." *Seminar Riset Mahasiswa-Computer & Electrical (SERIMA-CE 1(1))*, 281-287.

Al-Sharif, Yahya M., Gamal M. Sowilam, and Tamer A. Kawady. 2022. "Harmonic Analysis of Large Grid-Connected PV Systems in Distribution Networks: A Saudi Case Study." *International Journal of Photoenergy* 2022. 1-14.

- Analyzer, Power Quality. 2001. *Fluke 43B Power Quality Analyzer*, Netherlands, Fluke Corporation.
- Dugan, Roger C. 2004. *Electrical Power Systems*. Second Edision. America, McGraw Hill.
- Esye, Yendi, and Sigit Lesmana. 2021. “Analisa Perbaikan Faktor Daya Sistem Kelistrikan.” *Jurnal SPORTIF: Jurnal Penelitian Pembelajaran XI(1)*, 103–113.
- Hariato, Totok, Yanu Shalahuddin, and Diah Arie Widining K. 2018. “Filter Pasif Single Tuned LC Sebagai Kompensator Harmonisa Pada Beban Listrik Rumah Tangga Menggunakan Matlab Simulink.” *Setrum: Sistem Kendali-Tenaga-Elektronika-Telekomunikasi-Komputer 7(1)*, 127-135.
- IEC. 1990. *IEC 61000-2-1: Electromagnetic Compatibility (EMC) -Part 2:Environment – Section 1: Description of the Environment – Electromagnetic Environment for Low-Frequency Conducted Disturbances and Signalling in Public Power Supply Systems*. Vol. 1990. First edit. Geneva, Switzerland: International Electrotechnical Commission.
- IEEE. 1992. *IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electric Power System*. America: IEEE Power & Energy Society.
- IEEE. 2009. *IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality*. Vol. 2009. New York: IEEE Power & Energy Society.
- Lisiani, Abang Razikin, and Syaifurrahman. 2020. “Identifikasi Dan Analisis Jenis Beban Listrik Rumah Tangga Terhadap Faktor Daya (Cos Phi).” *Jurnal Untan 1(3)*, 1–9.
- Mohd Radzi, M. Z., M. M. Azizan, and B. Ismail. 2020. “Observatory Case Study on Total Harmonic Distortion in Current at Laboratory and Office Building.” *Journal of Physics: Conference Series 1432(1)*:1–10.
- Nadeak, David Ryanto M., Leonard Lisapaly, Rismen Sinambela, and Martua Manik. 2024. “Analisis Pengukuran Kapasitor Bank Dengan Tuned Reactor Pada Gedung Atria Residences Gading Serpong.” *Jurnal Ilmiah Teknik Elektro (Transmisi) 26(3)*:122–131.
- Panggei, Yahja, Yulianus Rombe Pasalli, Fourys Yudo Setiawan Paisey, and Adelhahd Rehiara. 2023. “Power Factor Correction for Energy Efficient at Public Hospital of Manokwari.” *Journal of Innovation Materials, Energy, and Sustainable Engineering 1(1)*:20–34.
- PT. PLN. 1995. *Tegangan-Tegangan Standar*. Jakarta: PT PLN (Persero).
- PT. PLN. 2012. *Power Quality (Regulasi Harmonisa, Flicker Dan Ketidakseimbangan Tegangan)* Jakarta: PT PLN (Persero).
- PT PLN. 1985. *Standar: Faktor Daya SPLN-1985*. Jakarta: PT PLN (Persero).
- Putra, I. Kadek Satrya Anggara, I. Made Suartika, and I. Wayan Rinas. 2020. “Analisa Pemasangan Kapasitor Untuk Meningkatkan Faktor Daya Pada Trafo Di Hotel Bali.” *Jurnal SPEKTRUM 7(1)*, 97–101.
- Ramli, Zoya Winona, Susatyo Handoko, and Ajub Ajulian Zahra. 2021. “Analisis Dan Perancangan Mitigasi Harmonik Tegangan Dan Arus Di Poltekkes Kemenkes Semarang.” *Transient: Jurnal Ilmiah Teknik Elektro 10(2)*, 312–318.
- Ruliyanta, Ruliyanta, R. A. Suwodjo Kusumoputro, Idris Kusuma, and Adhyarta Keraf. 2022. “Load Flow Analysis Capacitor Bank Dengan Metode Kompensasi Individual Dan Kompensasi Global.” *Jurnal Ilmiah Giga 25(1)*, 20-29.
- Septya Mahendra, Luki, Muhammad Rizani Rusli, Muhammad Nizar Habibi, and Ahmad Firyal Adila. 2023. “Analisa Pengaruh Kapasitor Bank Dan Detuned Reactor Sebagai Perbaikan Faktor Daya Listrik 3 Fasa Untuk Beban-Beban Induktif.” *Jurnal Arus Elektro Indonesia (JAEI) 09(02)*, 6–12.
- Shklyarskiy, Yaroslav, Zbigniew Hanzelka, and Aleksandr Skamyin. 2020. “Experimental Study of Harmonic Influence on Electrical Energy Metering.” *Energies 13(21)*, 1–13.
- Sinaga, Joslen, Ruth Mivera Siburian, and Jamot Sirait. 2020. “Analisa Pengaruh Harmonisa Pada Pengoperasian Beban Listrik.” *Jurnal Teknologi Energi Uda 9(2)*, 88–97.
- Sinambela, Rismen. 2023. “Maintenance Scorecard Approach And Analytical Hierarchy Process Method For Determining The Weight Of The Key Performance Indicator.” *Transient: Jurnal Ilmiah Teknik Elektro 209(4)*, 1–3.
- Wardhany, Arum Kusuma, Dezetty Monika, and Langlang Gumilar. 2022. “Penerapan IEEE 519-2014 Terhadap Identifikasi Distorsi Harmonisa Pada Transformator 3 Fasa.” *Jurnal Teknik Elektro Jurnal Teknik Elektro 12(2)*, 1–10.
- Wicaksono, Harits Akmal Adi, Susatyo Handoko, and Ajub Ajulian Zahra. 2021. “Analisis Perbaikan Faktor Daya Dan Nilai Tegangan Di Poltekkes Semarang.” *Transient: Jurnal Ilmiah Teknik Elektro 10(2)*, 327–334.
- Yakob Liklikwatil. 2019. “Analisis Pengaruh Kapasitor Bank Terhadap Motor Induksi Dan Jaringan Listrik.” *Jurnal Isu Teknologi STT Mandala 14(2)*, 46–50.
- Zulkarnaini, Andri, Rismen Sinambela, Leonard Lisapaly, and Martua Manik. 2024. “Analisis Pengukuran Harmonisa Tegangan Dan Arus Listrik Di Gedung Administrasi Universitas Jayabaya.” *Jurnal Ilmiah Teknik Elektro (Transmisi) 26(3)*, 132–139.