

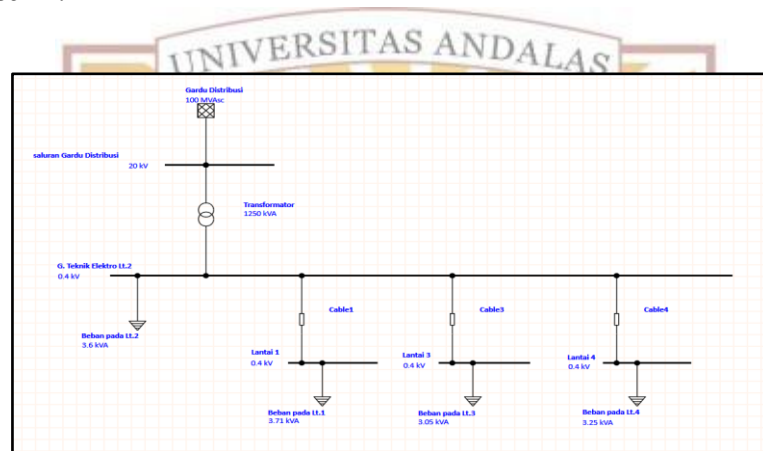
BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Hasil Simulasi Tanpa Menggunakan Filter *Single Tuned*

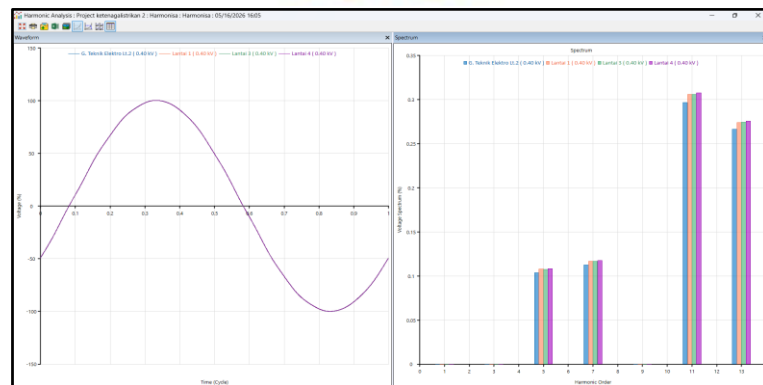
4.1.1 Simulasi Dengan Data Hasil Pengukuran

Melalui pengujian simulasi sistem pembebanan pada gedung teknik elektro dengan menggunakan data hasil pengukuran pada Tabel 3.1 sebagai data asli dalam merepresentasikan beban yang digunakan. Sehingga rangkaian SLD dapat dilihat pada Gambar 4.1



Gambar 4. 1 Single Line Diagram Pengujian Sistem Pembebanan Pada Gedung Teknik Elektro

Setelah dilakukannya uji simulasi, hasil pengujian tanpa menggunakan Filter *Single Tuned* tersebut dari gambar dibawah dimana terdapat 4 gelombang dan harmonic order yang dimana sebagai melihat data yang didapatkan dapat dilihat pada Gambar 4.2



Gambar 4. 2 Hasil Simulasi Gelombang dan Spectrum pada Orde ganjil

Analisis harmonisa pada sistem kelistrikan 4 lantai Gedung Teknik Elektro menunjukkan bahwa distorsi fisik pada gelombang utama masih sangat kecil karena rendahnya nilai komponen harmonisa. Distorsi tegangan yang terjadi didominasi oleh karakteristik beban non-linear sistem tiga fasa berupa orde-orde ganjil, khususnya orde ke-5, ke-7, ke-11, dan ke-13. Secara kuantitatif, nilai distorsi tegangan individual (*Individual Voltage Distortion*) secara konsisten meningkat dari lantai bawah ke lantai yang lebih tinggi, dengan akumulasi tertinggi di Lantai 4, diikuti berturut-turut oleh Lantai 3, Lantai 1, dan Lantai 2. Lonjakan distorsi terbesar terjadi pada orde ke-11 (0,298 % - 0,309 %) dan orde ke-13 (0,268% - 0,277 %), yang mengindikasikan adanya pengaruh kuat dari penggunaan sistem penyearah (*rectifier*) atau *converter* 12-pulsa di dalam jaringan distribusi gedung.

4.1.1.1 Analisa Simulasi Dengan Data Hasil Pengukuran Tanpa Pasif Filter

Setelah dilakukannya simulasi dan didapatkan hasil spectrum pada setiap orde dengan nilai *Total Harmonic Distortion* (THD). Dengan masing-masing lantai pada gedung teknik elektro. Maka dapat dibuat hasil simulasi yang dapat dilihat pada Tabel 4.1

Tabel 4. 1 Hasil Simulasi Tanpa Pasif Filter

Gedung Teknik Elektro	Individual Harmonic Distortion (%)							THD (%)
	1	3	5	7	9	11	13	
Lt. 1	0.00	0.00	0.10	0.11	0.00	0.30	0.27	0.441
Lt. 2	0.00	0.00	0.11	0.12	0.00	0.31	0.28	0.427
Lt. 3	0.00	0.00	0.11	0.12	0.00	0.31	0.28	0.441
Lt. 4	0.00	0.00	0.11	0.12	0.00	0.31	0.28	0.443

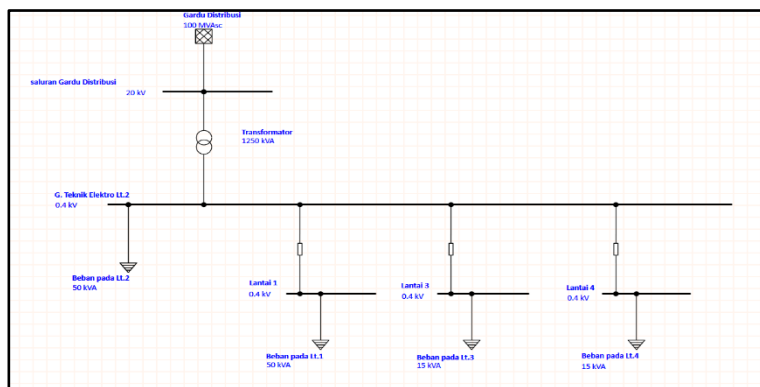
Berdasarkan pada Tabel 4.1 mengenai hasil simulasi tanpa pasif filter di Gedung Teknik Elektro, terlihat bahwa nilai *Individual Harmonic Distortion* (%) didominasi oleh munculnya orde-orde ganjil spesifik, yaitu orde ke-5, ke-7, ke-11, dan ke-13, sementara orde lainnya (1, 3, dan 9) bernilai nol. Distorsi harmonisa individual terkecil berada pada orde ke-5 dengan nilai berkisar antara 0,10 % hingga

0,11 %, diikuti oleh orde ke-7 sebesar 0,11 % hingga 0,12 %. Lonjakan nilai distorsi yang paling signifikan secara konsisten terjadi pada orde ke-11 dengan nilai mencapai 0,30 % hingga 0,31 %, serta orde ke-13 yang berada pada rentang 0,27 % hingga 0,28 % di seluruh lantai gedung.

Representasikan melalui nilai *Total Harmonic Distortion* (THD) menunjukkan tren yang relatif stabil namun memiliki variasi kecil di setiap lantai. Lantai 4 mencatatkan nilai THD tertinggi sebesar 0,443 %, disusul oleh Lantai 1 dan Lantai 3 yang memiliki nilai kembar sebesar 0,441%. Nilai THD terendah ditemukan pada Lantai 2 dengan persentase 0,427 %. Secara keseluruhan, visualisasi data ini memperkuat indikasi adanya beban non-linear tiga fasa yang khas, seperti penggunaan penyearah (*rectifier*) atau *converter* 12-pulsa, yang memicu tingginya amplitudo pada orde ke-11 dan ke-13 di sistem kelistrikan gedung tersebut. Dapat disimpulkan bahwa sistem kelistrikan di seluruh lantai Gedung Teknik Elektro memenuhi standar IEEE 519-2014 dengan sangat baik. Baik nilai distorsi individual pada orde ke-11 (0,31\%) maupun nilai THD tertinggi (0,443 %) masih berada jauh di bawah ambang batas aman yang diizinkan oleh standar, yaitu masing-masing sebesar 5,0% untuk individual dan 8,0 % untuk THD, sehingga kondisi gelombang utama sangat aman dari gangguan harmonisa.

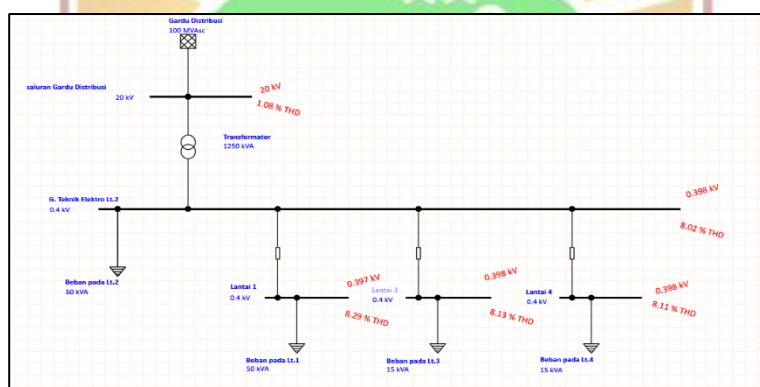
4.1.2 Simulasi Dengan Representasi Beban Penuh (*Full Load*)

Melalui pengujian simulasi sistem pembebanan pada gedung teknik elektro dengan menggunakan data hasil pengukuran pada Tabel 3.2 sebagai pembebanan penuh (*full load*) dalam merepresentasikan beban yang digunakan. Sehingga rangkaian SLD dapat dilihat pada Gambar 4.3



Gambar 4. 3 Single Line Diagram Pengujian Sistem Pembebanan Pada Gedung Teknik Elektro

Setelah dilakukannya uji simulasi, hasil pengujian tanpa menggunakan Filter *Single Tuned* tersebut dari gambar dibawah dimana menghasilkan THD hingga 8%, dimana data THD yang didapatkan dapat dilihat pada Gambar 4.4



Gambar 4. 4 Hasil Simulasi Pada Keadaan Full Load

Berdasarkan pada Gambar 4.4 yaitu *single line diagram* (SLD) sistem distribusi kelistrikan gedung tersebut, hasil simulasi menunjukkan adanya masalah distorsi harmonisa yang cukup serius pada sisi tegangan rendah 0.4 kV di seluruh lantai (Lantai 1 sampai Lantai 4). Sementara sisi primer transformator (20 kV) masih aman dengan nilai THD 1.08 %, sedangkan seluruh beban di Lantai 1 menghasilkan THD 8.29 %, Lantai 3 menghasilkan THD 8.13 %, dan Lantai 4 menghasilkan THD sebesar 8.11 %, serta ujung beban utama pada lantai 2 menghasilkan THD 8.02 %. Sehingga hal tersebut melebihi batas aman yang diizinkan oleh standar IEEE 519-2014, di mana batas maksimal THD tegangan untuk sistem di bawah 400 vadalah 8.0 %. Tingginya nilai distorsi ini dipicu oleh dominasi beban-beban non-linear di tiap lantai dengan representasi beban penuh,

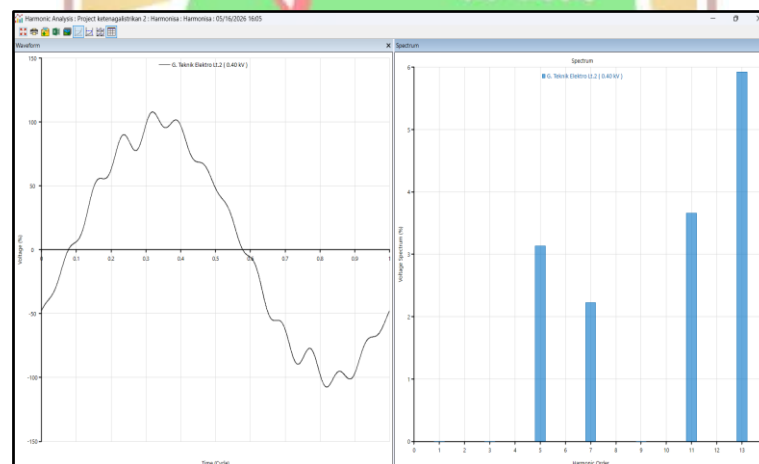
dan jika dibiarkan tanpa penanganan seperti pemasangan filter harmonisa, kondisi ini berpotensi menyebabkan panas berlebih pada transformator 1250 kVA, mempercepat kerusakan isolasi kabel, serta memicu gangguan operasional pada peralatan elektronik sensitif di dalam gedung.

4.1.2.1 Analisa Simulasi Spectrum Dengan Data *Full Load* Tanpa Pasif Filter

Berdasarkan dari hasil simulasi yang dilakukan dengan memperlihatkan masing-masing parameter nilai *total harmonic distortion* pada setiap lantai di gedung teknik elektro, maka hasil simulasi gelombang serta nilai spectrum pada setiap orde dapat ditampilkan melalui *harmonic analysis plots* yang dapat dilihat pada setiap pembahasan berikut :

A. Pembebanan pada lantai 2 (Pembebanan Utama)

Hasil output simulasi dari *harmonic analysis plots* pada lantai 2 yang dimana merupakan jalur input dari trafo dapat dilihat pada Gambar 4.5



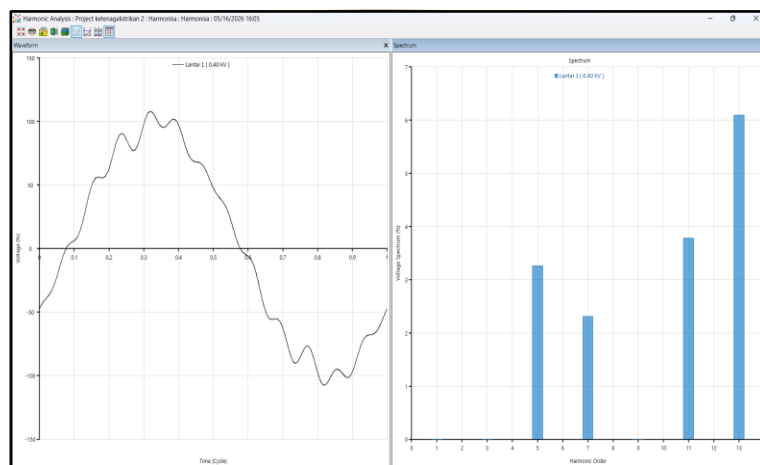
Gambar 4. 5 Simulasi Gelombang dan Spectrum pada Lantai 2

Berdasarkan hasil simulasi analisis harmonisa pada kondisi pembebanan penuh (full load) di Lantai 2 Gedung Teknik Elektro (0.4 kV), visualisasi grafik *Waveform* menunjukkan bentuk gelombang tegangan yang cacat, berdesis, dan tidak lagi berupa sinus murni akibat intervensi beban non-linear. Distorsi ini dikonfirmasi oleh grafik Spectrum yang menampilkan nilai *Individual Harmonic Distortion* (IHD v), di mana spektrum didominasi oleh harmonisa urutan ganjil karakteristik sistem tiga fasa, yaitu orde ke-5 (3.1 %), ke-7 (2.2%), ke-11 (3.6%),

dan yang paling tinggi adalah orde ke-13 (mendekati 5.9%). Dapat disimpulkan, tingginya magnitudo individual harmonisa ini—terutama pada orde ke-13 menjadi penyebab utama rusaknya kualitas gelombang tegangan di Lantai 2, sehingga diperlukan perencanaan filter pasif *single-tuned* yang dikhusus pada orde dominan tersebut untuk mereduksi cacat gelombang dan menjaga keandalan sistem distribusi.

B. Pembebanan pada lantai 1 (laboratorium)

Hasil output simulasi dari *harmonic analysis plots* pada lantai 1 yang dimana merupakan ruang laboratorium, yang dapat dilihat pada Gambar 4.6



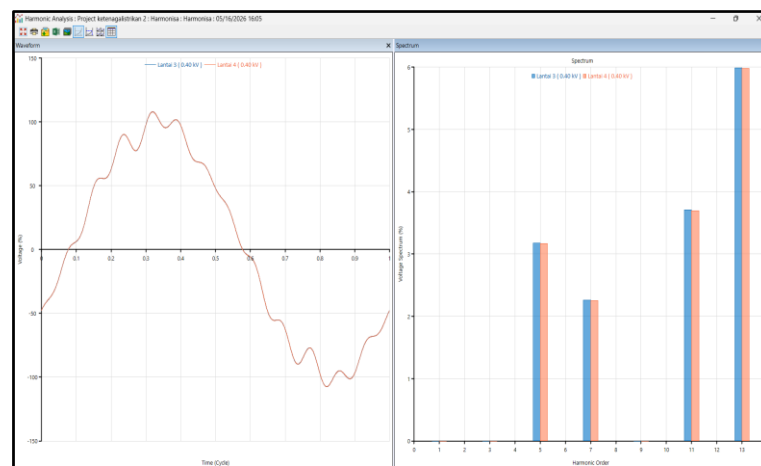
Gambar 4. 6 Simulasi Gelombang Dan Spectrum Pada Lantai 1

Berdasarkan hasil simulasi ETAP pada kondisi pembebanan penuh di Lantai 1 (0.4 kV), grafik *Waveform* menunjukkan cacat gelombang tegangan yang sangat menyimpang dari bentuk sinusoidal murni akibat karakteristik beban non-linear yang masif di area laboratorium tersebut. Melalui grafik *Spectrum*, terdeteksi nilai *Individual Harmonic Distortion* (IHD v) yang signifikan pada orde-orde ganjil, yaitu orde ke-5 (3.25 %), ke-7 (2.32 %), ke-11 (3.78 %), dan kontribusi terbesar berasal dari orde ke-13 yang menembus nilai 6.1 %. Tingginya magnitudo distorsi ini sangat sinkron dengan fungsi Lantai 1 sebagai Laboratorium Konversi Energi Listrik dan Laboratorium Sistem Tenaga, yang mana kedua laboratorium tersebut mengoperasikan banyak perangkat elektronika daya seperti *inverter*, *rectifier*, penyearah thyristor, hingga *variable speed drives* (VSD) untuk praktikum motor listrik. Kesimpulannya, akumulasi beban non-linear laboratorium ini menjadi

pemicu utama tingginya THD tegangan di Lantai 1 (8.29 %), sehingga perlu dipasang berupa pemasangan filter pasif *single-tuned*.

C. Pembebanan pada lantai 3 dan 4

Hasil output simulasi dari *harmonic analysis plots* pada lantai 3 dan 4 yang dimana merupakan ruang laboratorium, belajar dan komputasi, yang dapat dilihat pada Gambar 4.7



Gambar 4. 7 Simulasi Gelombang Dan Spectrum Pada Lantai 3 dan 4

Berdasarkan pada Gambar 4.7 yang merupakan hasil simulasi ETAP saat pembebanan penuh di Lantai 3 dan 4 dengan tegangan antar fasa 0.4 kV, grafik *Waveform* dan *Spectrum* menunjukkan pola distorsi yang hampir identik karena disuplai dari bus yang sama dengan beban sejenis. Nilai *Individual Harmonic Distortion* (IHD v) di kedua lantai didominasi oleh orde ganjil, yaitu orde ke-5 (3.18%), ke-7 (2.26 %), ke-11 3.71 %), dengan kontribusi terbesar pada orde ke-13 yang mencapai 5.95 %. Karakteristik ini sangat relevan dengan profil area yang difungsikan sebagai ruang dosen, ruang belajar, Laboratorium Komputasi, dan Instrumentasi Kendali, di mana terdapat akumulasi masif beban non-linear satu fasa seperti PC, laptop, AC *inverter*. Kesimpulannya, akumulasi beban elektronika ini memicu harmonisa ganjil yang merusak gelombang sinus hingga menaikkan THD tegangan melebihi ambang batas (8.13 % di Lantai 3 dan 8.11 % di Lantai 4), sehingga pemasangan filter pasif *single-tuned* sangat dibutuhkan untuk menjaga keandalan perangkat komputasi serta mencegah kegagalan sistem kendali digital yang sensitif.

4.1.2.2 Analisa Simulasi Dengan Data IHDv Full Load Tanpa Pasif Filter

Setelah dilakukannya simulasi dan didapatkan hasil spectrum pada setiap orde dengan nilai *Individual Harmonic Distortion* (IHD v) dan *Total Harmonic Distortion* (THD v). Dengan masing-masing nilai pada setiap lantai di gedung teknik elektro. Maka dapat dibuat data hasil simulasi yang dapat dilihat pada Tabel 4.2

Tabel 4. 2 Hasil Simulasi Full Load Tanpa Pasif Filter

Gedung Teknik Elektro	Individual Harmonic Distortion (%)							THD (%)
	1	3	5	7	9	11	13	
Lt. 1	0.00	0.00	3.26	2.33	0.00	3.77	6.09	8.29
Lt. 2	0.00	0.00	3.14	2.25	0.00	3.65	5.92	8.02
Lt. 3	0.00	0.00	3.17	2.28	0.00	3.69	5.99	8.13
Lt. 4	0.00	0.00	3.18	2.27	0.00	3.68	5.98	8.11

Berdasarkan pada Tabel 4.2 mengenai hasil simulasi kondisi beban penuh (*full load*) tanpa pasif filter di Gedung Teknik Elektro, terjadi peningkatan yang sangat besar pada nilai *Individual Harmonic Distortion* (%) di seluruh lantai dibandingkan kondisi sebelumnya. Distorsi tegangan individual tetap didominasi oleh orde ganjil kelistrikan tiga fasa, dengan nilai terendah berada pada orde ke-7 (2,25 % - 2,33 %) dan orde ke-5 (3,14 % - 3,26 %). Karakteristik beban non-linear yang bekerja penuh ini memicu lonjakan distorsi yang sangat masif pada orde tinggi, di mana orde ke-11 melesat hingga mencapai rentang 3,65 % - 3,77 %, dan puncaknya terjadi pada orde ke-13 yang mendominasi secara ekstrem pada kisaran nilai 5,92% hingga 6,09 % di seluruh lantai gedung.

Lonjakan yang terjadi pada komponen individual berdampak langsung pada nilai *Total Harmonic Distortion* (THD) tegangan yang meningkat di setiap lantai. Dengan THD tertinggi tercatat pada Lantai 1 sebesar 8,29 % dan nilai terendah di Lantai 2 sebesar 8,02 %. Berdasarkan dari data tersebut, dapat disimpulkan bahwa pada kondisi *full load*, sistem kelistrikan Gedung Teknik Elektro telah melebihi ambang batas aman standar IEEE 519-2014. Meskipun nilai distorsi individual

masih berada di sekitar batas aman (5,0 %) kecuali pada orde ke-13 yang melanggar batas karena mencapai 6,09 %, nilai THD di seluruh lantai secara konsisten telah melampaui batas maksimum yang diizinkan untuk tegangan rendah, yaitu sebesar 8,0 %. Kondisi ini mengindikasikan bahwa gelombang utama sistem distribusi gedung sudah mengalami distorsi kritis dan sangat memerlukan pemasangan filter pasif untuk mereduksi harmonisa tersebut.

4.2 Hasil Simulasi Menggunakan Filter *Single Tuned*

Berdasarkan dari hasil analisa simulasi tanpa menggunakan filter pasif *single tuned* dapat diketahui bahwa pada kondisi beban penuh, harmonisa yang dihasilkan sangat besar hingga melewati batas standar IEEE 519-2014 yaitu sebesar 8%, penyebab terjadinya hal ini karena pengaruh dari beban induktif yang dihasilkan dari penggunaan komponen elektronik seperti MOSFET, IGBT, dan perangkat elektronik seperti UPS, lampu LHE, AC, proyektor, komputer, laptop, dan lainnya. Hal inilah yang menyebabkan peningkatan THD yang besar, sehingga dalam mengurangi permasalahan cacat gelombang dan perbaikan THD v, maka dapat ditambahkan pasif filter dengan type *single tuned filter* pada simulasi ini.

4.2.1 Desain Filter Harmonisa

Sebelum dilakukan simulasi perlu diketahui bahwa terlebih dahulu dilakukan perancangan filter pasif (*single tuned*) karena filter ini mempunyai impedansi yang rendah dan biaya yang murah. Untuk memperbaiki faktor daya menggunakan perhitungan dalam perancangan filter pasif ini, dimana pada setiap lantai akan dilakukan perancangan filter masing-masing.

1. Perancangan Pasif Filter *Single Tuned* pada Lantai 1 dan 2

Dalam menentukan rancangan filter harmonisa, terlebih dahulu menentukan faktor daya serta besaran daya reaktif yang di filter oleh sistem pada gedung teknik elektro dengan menggunakan Persamaan 2.13

- $Q_c = P (\tan \theta_{in} - \tan \theta_{out})$
 $Q_c = 20kW (0.48105 - 0.32868)$
 $Q_c = 3047.4 VAR$

Kemudian Menentukan Orde Harmonisa yang direduksi :

- $n - (5 \% \times n) = n$
 $13 - (5 \% \times 13) = 12.35$

Selanjutnya menghitung besar nilai pada kapasitor yang akan digunakan dalam mereduksi harmonisa dengan menggunakan Persamaan 2.14 dan 2.15

- $X_c = \frac{V^2}{Q_c}$
 $X_c = \frac{400 V^2}{3047 VAR}$
 $X_c = 52.5037 \Omega$

- $C = \frac{Q_c}{2 \pi \cdot f \cdot V^2}$
 $C = \frac{3047.4 VAR}{(2 \times 3,14 \times 50 Hz \times 400 V^2)}$
 $C = 0.00006065 F$
 $C \approx 6.065 \mu F$

Setelah menentukan nilai kapasitor yang digunakan, selanjutnya menentukan nilai induktor ($X_L = X_c$) dengan menggunakan Persamaan 2.16 dan 2.17

- $X_L = \frac{X_c}{n^2}$
 $X_L = \frac{52.5037 \Omega}{12.35^2}$
 $X_L = 0.34423 \Omega$

- $L = \frac{X_L}{2 \pi f}$
 $L = \frac{0.34423 \Omega}{(2 \times 3.14 \times 50 Hz)}$
 $L = 0.001096 H$
 $L \approx 1096.033 mH$



Dalam menentukan nilai R yang akan digunakan disesuaikan dengan Qfactor sebesar 20 karena nilai pada parameter tegangan sebesar 400 V, sehingga dalam menentukan nilai R dapat menggunakan Persamaan 2.18

$$\bullet \quad R = \frac{n \times X_L}{Q}$$

$$R = \frac{12.35 \times 0.34423 \, \Omega}{20}$$

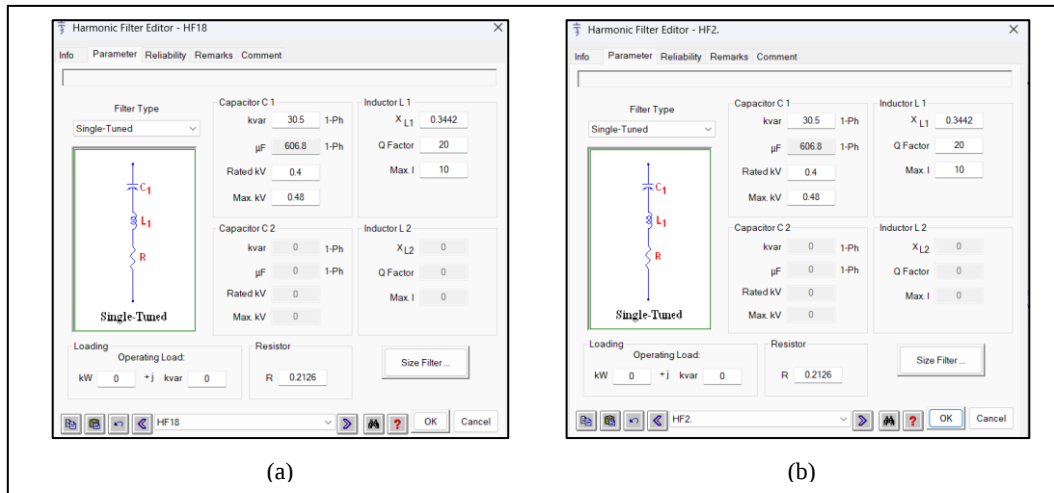
$$R = 0.212562 \, \Omega$$

Setelah menentukan semua parameter dari komponen pasif dalam mendesain Pasif filter *single tuned* maka dapat dimasukkan ke dalam Tabel 4.3

Tabel 4. 3 Parameter Desain Filter Single Tuned 1

Parameter		Nilai
Faktor Daya	tanϕ awal	0.48105
	tanϕ akhir	0.32868
QC (VAR)		3047.4
Orde (n)		12.35
Kapasitor	Xc (Ω)	52.5037
	C (μF)	6.065
Induktor	Xl (Ω)	0.34423
	L (mH)	1096.033
Qfactor		20
R (Ω)		0.212562

Berdasarkan dari Tabel 4.3 yang merupakan desain pasif filter *single tuned* yang akan dipasang pada lantai 1 dan lantai 2 karna memiliki kemiripan, sehingga filter yang sudah desain dapat dimasukkan, dan dapat dilihat pada Gambar 4.8



Gambar 4. 8 Filter Harmonic Single Tuned (a) lantai 2 (b) lantai 1

2. Perancangan Pasif Filter *Single Tuned* pada Lantai 3 dan 4

Dalam menentukan rancangan filter harmonisa, terlebih dahulu menentukan faktor daya serta besaran daya reaktif yang di filter oleh sistem pada gedung teknik elektro dengan menggunakan Persamaan 2.13

- $$Q_c = P (\tan \theta_{in} - \tan \theta_{out})$$

$$Q_c = 12kW (0.74973 - 0.32868)$$

$$Q_c = 5052.6 VAR$$

Kemudian Menentukan Orde Harmonisa yang direduksi :

- $$n - (5 \% x n) = n$$

$$13 - (5 \% x 13) = 12.35$$

Selanjutnya menghitung besar nilai pada kapasitor yang akan digunakan dalam mereduksi harmonisa dengan menggunakan Persamaan 2.14 dan 2.15

- $$X_c = \frac{V^2}{Q_c}$$

$$X_c = \frac{400 V^2}{5052.6 VAR}$$

$$X_c = 31.666 \Omega$$
- $$C = \frac{Q_c}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot V^2}$$

$$C = \frac{5052.6 VAR}{(2 \times 3,14 \times 50Hz \times 400V^2)}$$

$$C = 0.00010056 F$$

$$C \approx 100.56 \mu F$$

Setelah menentukan nilai kapasitor yang digunakan, selanjutnya menentukan nilai induktor ($X_L = X_C$) dengan menggunakan Persamaan 2.16 dan 2.17

- $X_L = \frac{X_C}{n^2}$

$$X_L = \frac{31.66 \Omega}{12.35^2}$$

$$X_L = 0.207615 \Omega$$

- $L = \frac{X_L}{2\pi f}$

$$L = \frac{0.207615 \Omega}{(2 \times 3.14 \times 50 \text{ Hz})}$$

$$L = 0.000661 H$$

$$L \approx 661.033 \text{ mH}$$

Dalam menentukan nilai R yang akan digunakan disesuaikan dengan Qfactor sebesar 20 karena nilai pada parameter tegangan sebesar 400 V, sehingga dalam menentukan nilai R dapat menggunakan Persamaan 2.18

- $R = \frac{n \times X_L}{Q}$

$$R = \frac{12.35 \times 0.207615 \Omega}{20}$$

$$R = 0.12820 \Omega$$

Setelah menentukan semua parameter dari komponen pasif dalam mendesain Pasif filter *single tuned* maka dapat dimasukkan ke dalam Tabel 4.4

Tabel 4. 4 Parameter Desain Filter Single Tuned 2

Parameter		Nilai
Faktor Daya	tanϕ awal	0.74973
	tanϕ akhir	0.32868
QC (VAR)		5052.6

Orde (n)		12.35
Kapasitor	$X_c (\Omega)$	31.666
	$C (\mu F)$	100.56
Induktor	$X_l (\Omega)$	0.207815
	$L (mH)$	661.033
Qfactor		20
$R (\Omega)$		0.12820

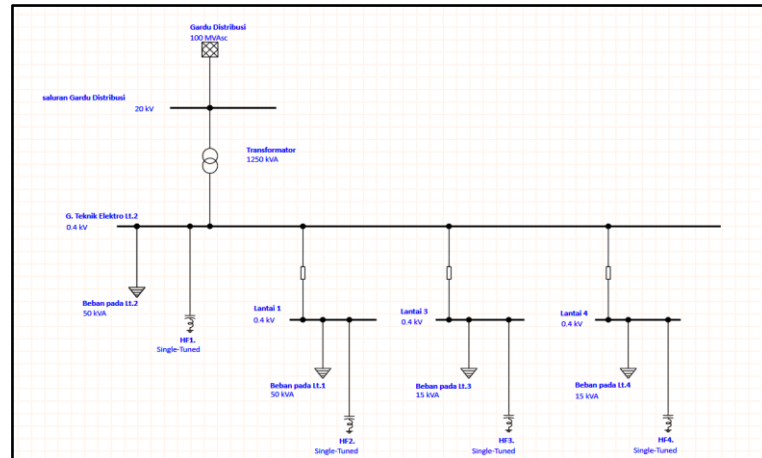
Berdasarkan dari Tabel 4.3 yang merupakan desain pasif filter *single tuned* yang akan dipasang pada lantai 3 dan lantai 4 karna hampir memiliki kemiripan parameter yang sama, sehingga filter yang sudah desain dapat dimasukan, dan dapat dilihat pada Gambar 4.9



Gambar 4. 9 Filter Harmonic Single Tuned (a) lantai 3 (b) lantai 4

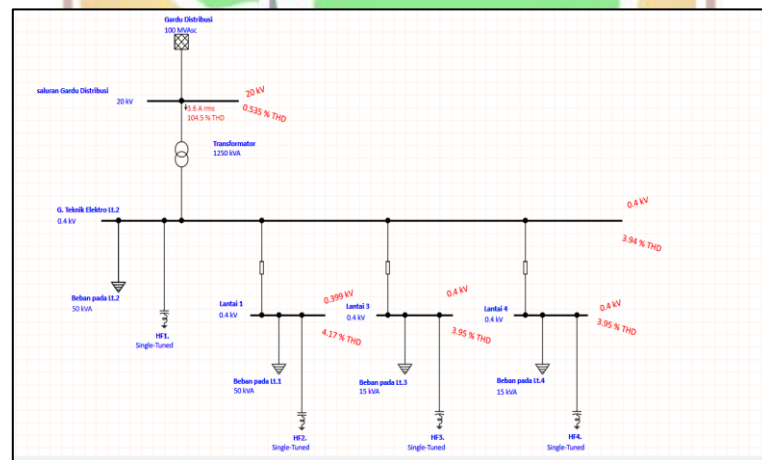
2.1.1 4.2.2 Simulasi Dengan Menggunakan Filter *Single Tuned*

Melalui pengujian simulasi sistem pembebanan pada gedung teknik elektro dengan menggunakan data hasil pengukuran pada Tabel 3.2 sebagai pembebanan penuh (*full load*) dalam merepresentasikan beban yang digunakan. Sehingga rangkaian SLD dapat dilihat pada Gambar 4.10



Gambar 4. 10 Single Line Diagram Pengujian Pasif filter single tuned pada Sistem Full Load

Setelah dilakukannya uji simulasi, hasil pengujian tanpa menggunakan Filter *Single Tuned* tersebut dari gambar dibawah dimana menghasilkan THD hingga 8%, dimana data THD yang didapatkan dapat dilihat pada Gambar 4.11



Gambar 4. 11 Hasil Simulasi Pada Keadaan Full Load Dengan Pasif Filter Single Tuned

Berdasarkan diagram satu garis (SLD) hasil simulasi setelah mitigasi, pemasangan komponen filter pasif *single-tuned* (HF1 hingga HF4) terbukti sangat efektif dalam mereduksi distorsi harmonisa di seluruh sistem distribusi Gedung Teknik Elektro. Nilai THD tegangan pada sisi tegangan rendah (0.4 kV) yang sebelumnya menghasilkan THD di atas 8 %, dan setelah dipasang pasif filter pada masing-masing bus disetiap lantai, mampu meredam THDv secara signifikan

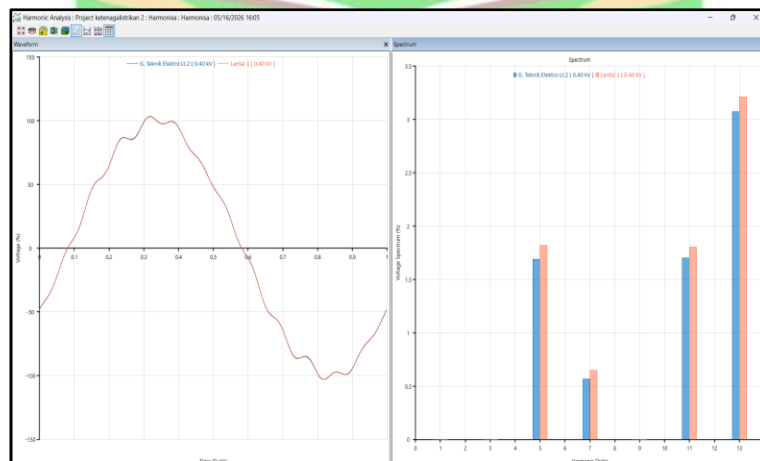
hingga turun ke kisaran 3 % dan 4 %, dengan data THDv yang diperhatikan pada Lantai 1 menjadi 4.17 %, Lantai 3 sebesar 3.95 %, Lantai 4 sebesar 3.95 %, dan bus utama pada lantai 2 menghasilkan THDv sebesar 3.94 %. Selain itu, distorsi pada sisi primer transformator (20 kV) juga ikut menurun drastis menjadi hanya 0.535 % THD. Dapat disimpulkan, bahwa pengaplikasian filter *single-tuned* ini berhasil dalam mereduksi *total harmonic distortion* (THDv) akibat beban non-linear, sehingga mampu mengamankan transformator 1250 kVA dari bahaya panas berlebih (*overheating*) serta menjamin kontinuitas operasional perangkat sensitif di seluruh laboratorium yang ada pada gedung teknik elektro.

4.2.2.1 Analisa Simulasi Spectrum Dengan Data *Full Load* Dengan Pasif Filter

Berdasarkan dari hasil simulasi yang dilakukan dengan memperlihatkan masing-masing parameter nilai *total harmonic distortion* pada setiap lantai di gedung teknik elektro yang sudah digunakan pasif filter *single tuned* dalam mereduksi harmonisa, maka hasil simulasi gelombang serta nilai spectrum di setiap orde dapat ditampilkan melalui *harmonic analysis plots* yang dapat dilihat pada setiap pembahasan berikut :

A. Pembebanan pada lantai 1 dan lantai 2

Hasil output simulasi dari *harmonic analysis plots* pada lantai 2 yang dimana merupakan jalur input dari trafo dapat dilihat pada Gambar 4.12



Gambar 4. 12 Simulasi Gelombang dan Spectrum pada Lantai 1 dan 2

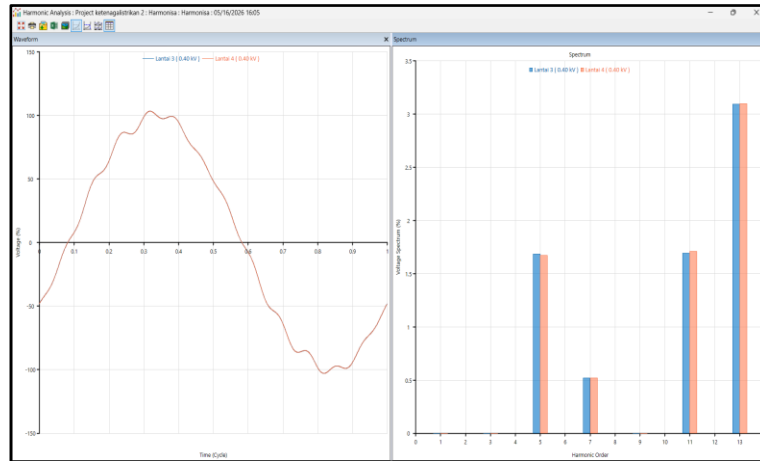
Berdasarkan simulasi pada kondisi pembebanan penuh (*full load*) dengan menggunakan pasif filter *single tuned* pada Gambar 4.12, dimana pada Gambar 4.5

dan 4.6 memperlihatkan representasi cacat gelombang tegangan (*waveform distortion*) yang sangat jelas sebelum pemasangan filter, dengan nilai *Total Harmonic Distortion* (THD) yang tinggi mencapai 8,1 %. Distorsi parah ini dipicu oleh tingginya nilai komponen IHD pada spektrum ganjil kelipatan non-tiga. Sebelum dilakukan reduksi, spektrum harmonisa didominasi oleh orde ke-5 dengan nilai IHD dihasilkan sebesar 3,1 % - 3,3 %, orde ke-7 menghasilkan 2,2 % - 2,3 %, orde ke-11 menghasilkan 3,7% - 3,8%, dan yang paling besar dihasilkan pada orde ke-13 dengan amplitudo tertinggi mencapai 5,9 % - 6,1 %. Besarnya magnitudo pada tiap orde individual inilah yang merusak bentuk gelombang sinusoidal murni pada Lantai 1 dan Lantai 2 menjadi bergelombang kasar.

Setelah sistem gedung teknik elektro dipasang *pasif filter single-tuned*, spektrum IHD pada kedua lantai berhasil direduksi, sehingga mampu menurunkan nilai THD hingga 3,9 % - 4 %. Secara rinci, penurunan spektrum individu terlihat sangat efektif: komponen paling dominan yaitu orde ke-13 berhasil dipangkas hampir separuhnya hingga menjadi 3,1 % - 3,2 %, orde ke-5 dan ke-11 turun ke 1,7 % - 1,8 %, serta orde ke-7 mengalami penurunan terdalam hingga di bawah 0,7 %. Penurunan tajam magnitudo tiap orde pada IHD ini secara langsung memperbaiki bentuk gelombang tegangan menjadi jauh lebih halus dan mendekati bentuk sinusoidal ideal. Kesimpulannya, perancangan *filter pasif single-tuned* ini terbukti baik dalam mereduksi distorsi spektrum harmonisa, sehingga kualitas daya pada gedung telah sepenuhnya memenuhi standar aman IEEE 519 (di bawah 5 %).

B. Pembebanan pada lantai 3 dan 4

Hasil output simulasi dari *harmonic analysis plots* pada lantai 3 dan 4 yang dimana merupakan lokasi pada laboratorium dan komputasi yang hasilnya dapat dilihat pada Gambar 4.12



Gambar 4. 13 Simulasi Gelombang Dan Spectrum Pada Lantai 3 dan 4

Berdasarkan hasil simulasi pada kondisi beban penuh dengan menggunakan pasif filter, dapat dibandingkan pada Gambar 4.7 yang memperlihatkan adanya distorsi gelombang tegangan yang buruk pada Lantai 3 dan Lantai 4 sebelum filter terpasang, dengan nilai THD sebesar 8,1%. Tingginya nilai THD tersebut disebabkan oleh besarnya kandungan harmonisa pada orde-orde ganjil tertentu. Sebelum pemasangan filter, komponen IHD yang paling menonjol adalah orde ke-13 dengan nilai mendekati 6%, kemudian disusul orde ke-11 sekitar 3,7%, orde ke-5 sekitar 3,2%, dan orde ke-7 sekitar 2,25%. Besarnya kontribusi masing-masing orde harmonisa ini mengakibatkan bentuk gelombang sinusoidal tegangan di kedua lantai tampak terdistorsi dengan cacat yang cukup jelas.

Setelah filter pasif tipe single-tuned dipasang pada Gambar 4.11, kualitas daya pada Lantai 3 dan Lantai 4 menunjukkan peningkatan yang signifikan. Nilai THD berhasil ditekan ke rentang 3,9%–4%, sehingga memenuhi batas aman yang ditetapkan standar IEEE 519, yakni di bawah 5%. Penurunan ini terjadi karena filter mampu meredam amplitudo harmonisa pada tiap orde secara spesifik: orde ke-13 yang sebelumnya paling dominan berkurang separuhnya menjadi sekitar 3,1%, orde ke-5 dan ke-11 turun hingga menyisakan sekitar 1,7%, sedangkan orde ke-7 mengalami penurunan paling tajam hingga hanya sekitar 0,5%. Reduksi yang signifikan pada setiap komponen spektrum harmonisa ini berdampak langsung pada membaiknya bentuk gelombang tegangan, yang kini tampak jauh lebih mulus dan mendekati sinusoidal ideal. Hal ini membuktikan bahwa penerapan filter pasif pada

Lantai 3 dan Lantai 4 terbukti efektif dalam melindungi sistem kelistrikan gedung dari gangguan harmonisa.

4.2.2.2 Analisa Simulasi Dengan IHDv *Full Load* Menggunakan Pasif Filter

Setelah dilakukannya simulasi dan didapatkan hasil spectrum pada setiap orde dengan nilai *Individual Harmonic Distortion* (IHD v) dan *Total Harmonic Distortion* (THD v). Dengan masing-masing nilai pada setiap lantai di gedung teknik elektro. Maka data hasil simulasi yang dapat dilihat pada Tabel 4.5

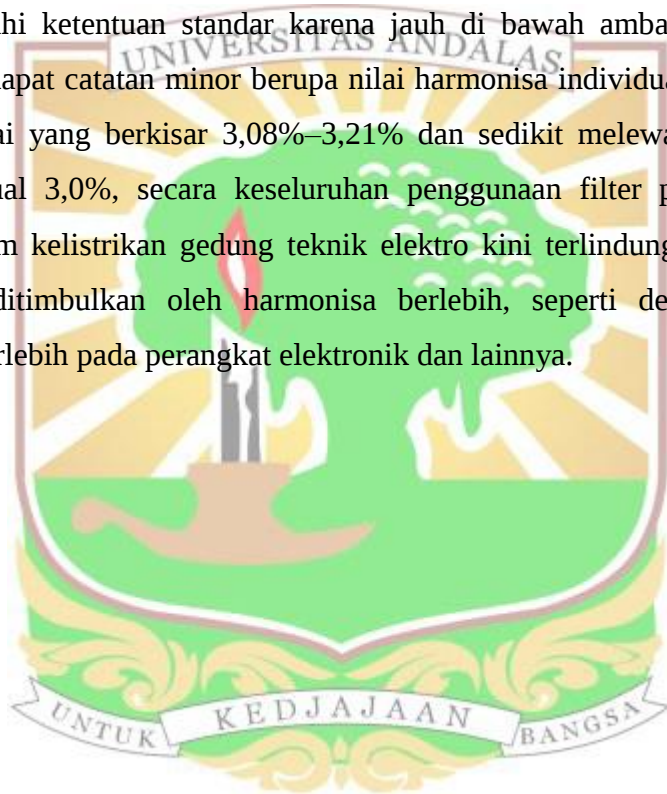
Tabel 4. 5 Hasil Simulasi Full Load Dengan Pasif Filter

Gedung Teknik Elektro	Individual Harmonic Distortion (%)							THD (%)
	1	3	5	7	9	11	13	
Lt. 1	0.00	0.02	1.69	0.57	0.02	1.70	3.08	4.16
Lt. 2	0.00	0.03	1.82	0.65	0.02	1.80	3.21	3.94
Lt. 3	0.00	0.01	1.69	0.52	0.02	1.70	3.10	3.95
Lt. 4	0.00	0.02	1.68	0.52	0.02	1.71	3.10	3.95

Berdasarkan dari Tabel 4.5 Yaitu hasil simulasi pada kondisi beban penuh, menunjukkan bahwa pemasangan filter pasif pada sistem kelistrikan Gedung Teknik Elektro mampu mereduksi distorsi harmonisa secara signifikan, baik pada level harmonisa individual maupun THD di seluruh lantai. Pada kondisi tanpa filter pada Tabel 4.2, sistem mengalami pencemaran harmonisa yang cukup berat, terutama pada orde-orde ganjil yang bersumber dari karakteristik beban non-linier. Harmonisa individual orde ke-11 tercatat berada di rentang 3,65%–3,77%, sementara orde ke-13 melonjak hingga 5,92%–6,09%. Akibatnya, nilai THD tegangan di seluruh titik distribusi mencapai angka yang mengkhawatirkan, dengan nilai tertinggi sebesar 8,29% pada Lantai 1 dan rata-rata lantai lainnya pun melampaui 8,0%. Setelah filter pasif single-tuned diterapkan (Tabel 4.5), terjadi penurunan yang sangat besar pada seluruh komponen harmonisa: orde ke-5 tersisa di kisaran 1,68%–1,82%, orde ke-7 turun drastis ke 0,52%–0,65%, dan orde ke-11 berhasil ditekan ke rentang 1,70%–1,80%. Penurunan pada masing-masing

komponen ini pada akhirnya membawa nilai THD keseluruhan di seluruh lantai gedung turun ke kisaran 3,94%–4,16%.

Sedangkan dari standar kualitas daya IEEE 519-2014 untuk sistem bertegangan nominal $V \leq 1,0$ kV, yang menetapkan batas maksimum 5,0% untuk harmonisa individual dan 8,0% untuk THD, status kepatuhan sistem kelistrikan gedung mengalami perubahan yang mendasar. Sebelum pemasangan filter (Tabel 4.2), sistem dinyatakan tidak memenuhi standar karena nilai THD di semua lantai melebihi 8,0% dan harmonisa individual orde ke-13 melampaui batas 5,0%. Setelah filter dipasang (Tabel 4.5), nilai THD yang kini berada di rentang 3,94%–4,16% telah memenuhi ketentuan standar karena jauh di bawah ambang batas 8,0%. Meskipun terdapat catatan minor berupa nilai harmonisa individual orde ke-13 di beberapa lantai yang berkisar 3,08%–3,21% dan sedikit melewati rekomendasi batas individual 3,0%, secara keseluruhan penggunaan filter pasif ini dinilai berhasil. sistem kelistrikan gedung teknik elektro kini terlindungi dari berbagai risiko yang ditimbulkan oleh harmonisa berlebih, seperti degradasi isolasi, pemanasan berlebih pada perangkat elektronik dan lainnya.



BAB V

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan dari hasil pengambilan data dan analisa pengaruh penggunaan pasif filter *single tuned* dalam mereduksi harmonisa melalui studi kasus pada gedung teknik elektro, maka dapat diambil kesimpulan, yaitu :

1. Pemodelan sistem distribusi tiga fasa seimbang 0,4 kV pada gedung teknik elektro Universitas Bengkulu menggunakan ETAP 21 membuktikan bahwa kondisi *Full Load* menghasilkan polusi harmonisa yang masif. Spektrum awal pada Tabel 4.2 menunjukkan dominasi harmonisa orde ganjil bukan kelipatan tiga, khususnya orde ke-11 (3,65%–3,77%) dan orde ke-13 (5,92%–6,09%), yang mengindikasikan tingginya penggunaan perangkat berbasis penyearah (*rectifier*) seperti komputer laboratorium komputasi dan *variable speed drive* (VSD) di Laboratorium Konversi Energi. Penerapan Passive Filter *Single-Tuned* (HF₁–HF₄) yang disetel pada orde kritis 12,35 terbukti efektif menyediakan jalur impedansi rendah untuk mengalihkan arus harmonisa langsung ke sistem pembumian sebelum mencapai transformator utama.
2. Penerapan filter pasif memberikan dampak signifikan terhadap kualitas daya. Tanpa filter, nilai THDv berada di rentang 8,02%–8,29%, melampaui batas IEEE 519-2014 sebesar 8,0% untuk tegangan rendah $\leq 1,0$ kV, terutama akibat harmonisa orde ke-13 yang mencapai 6,09% (di atas batas individual 5,0%). Kondisi ini berpotensi menyebabkan *overheating* pada transformator 1250 kVA dan degradasi isolasi konduktor. Setelah pemasangan filter, THDv berhasil ditekan ke rentang 3,94%–4,16%, dengan penurunan signifikan pada orde ke-5 (1,68%–1,82%), orde ke-7 (0,52%–0,65%), dan orde ke-11 (1,70%–1,80%). Meskipun orde ke-13 masih tersisa di kisaran 3,08%–3,21% (sedikit di atas rekomendasi internal 3,0%), secara keseluruhan sistem telah memenuhi standar IEEE 519-2014 dan bentuk gelombang tegangan kembali mendekati sinusoidal ideal.

5.2 Saran

Adapun beberapa saran yang dapat diberikan untuk pengembangan penelitian selanjutnya adalah:

1. Penelitian selanjutnya disarankan untuk mengeksplorasi kemungkinan penggantian atau penggabungan filter *single-tuned* dengan jenis filter pasif lainnya, seperti *double-tuned* filter maupun *high-pass damped* filter. Kajian perbandingan perlu difokuskan pada aspek efisiensi teknis sekaligus ekonomis, mengingat *double-tuned* filter mampu meredam dua frekuensi harmonisa kritis secara bersamaan, misalnya orde ke-11 dan 13 hanya dengan menggunakan satu rangkaian induktor-kapasitor utama. Pendekatan ini berpotensi menghasilkan sistem penyaringan yang lebih kompak dan efektif, terutama dalam menuntaskan sisa distorsi individual orde ke-13 yang hingga saat ini masih bertahan di atas ambang batas 3%.
2. Untuk meningkatkan akurasi pada penelitian lanjutan perlu dilengkapi dengan perhitungan teori terhadap impedansi beban non-linier gedung. Peneliti berikutnya dianjurkan untuk membandingkan secara analitis data harmonisa hasil simulasi atau pengukuran lapangan (MH ukur) dengan nilai hasil perhitungan matematis (MH hitung). Validasi ini penting untuk menilai seberapa jauh model simulasi ETAP merepresentasikan kondisi fisis aktual sistem kelistrikan gedung.
3. Mengingat efektivitas parameter komponen (R, L, C) dalam menekan THD telah terbukti melalui simulasi pada Tabel 4.5, penelitian ke depan tidak seharusnya terbatas pada lingkup perangkat lunak saja. Tahap yang direkomendasikan adalah realisasi fisik berupa fabrikasi prototipe filter kompensasi, mencakup pemilihan material kapasitor daya, pelilitan induktor secara presisi sesuai nilai induktansi (mH) hasil perhitungan, serta pengujian ketahanan termal filter saat dialiri arus harmonisa aktual di laboratorium Gedung Teknik Elektro.

