

# Analisis Harmonik dan Perbaikan Nilai THD Arus dengan Perancangan Filter Pasif *Single-Tuned*

ANDIKA MUHAMMAD AKBAR, CANDRA FEBRI NUGRAHA

Departemen Teknik Elektro dan Informatika, Universitas Gadjah Mada, Indonesia  
Email: [andika.akbar@mail.ugm.ac.id](mailto:andika.akbar@mail.ugm.ac.id)

*Received* 17 Juli 2024 | *Revised* 15 September 2024 | *Accepted* 14 Oktober 2024

## ABSTRAK

*Sistem elektrifikasi kereta rel listrik (KRL) Jogja-Solo mempunyai tegangan nominal 1.500 Volt DC yang disuplai dari PLN 20 kV AC melalui gardu traksi untuk mengonversinya dengan komponen silicon rectifier yang bersifat sebagai beban non-linier. Beban tersebut menyebabkan harmonik, karena memiliki karakteristik menyuntikkan arus balik menuju sumber sehingga dapat menimbulkan distorsi pada gelombang arus. Penelitian ini bertujuan menganalisis harmonik dan memperbaiki nilai THD arus dengan merancang filter pasif untuk mereduksi gangguan tersebut pada panel outgoing RTR cubicle switchgear 20 kV di Gardu Traksi Purwosari. Pengukuran dengan power analyzer DW-6095 menunjukkan indeks harmonik yang melampaui standar IEEE Std 519<sup>TM</sup>-2014, sebesar 27,4%. Filter harmonik dirancang melalui pemodelan dan simulasi menggunakan software ETAP. Hasil yang paling optimal yaitu pemasangan tiga filter harmonik (orde 11, 13, dan 23) di dekat rectifier. Saat sistem disimulasikan dengan beban, nilai THD-I menurun secara signifikan hingga 0,97%.*

**Kata kunci:** *beban non-linear, ETAP, filter pasif, gardu traksi, harmonik*

## ABSTRACT

*The electrification system of the Jogja-Solo electric rail train (KRL) has a nominal voltage of 1,500 Volt DC supplied from PLN 20 kV AC through a traction substation to convert it with silicon rectifier component which is a non-linear load. The load causes harmonics, because they have the characteristic of injecting reverse current towards the source so that they can cause distortion in current waves. This study aims to analyze harmonics and improve the THD value of current by designing a passive filter to reduce the distortion on the outgoing RTR cubicle switchgear panel of 20 kV at the Purwosari Traction Substation. Measurements with the DW-6095 power analyzer showed a harmonic index that exceeded the IEEE Std 519<sup>TM</sup>-2014 standard, by 27.4%. The harmonic filters were designed through modeling and simulation using ETAP software. The most optimal result is installation of three harmonic filters (order 11, 13, and 23) near the rectifier. When the system is simulated with a load, THD-I value decreases significantly to 0.97%.*

**Keywords:** *non-linear loads, ETAP, passive filter, traction substation, harmonic*

## 1. PENDAHULUAN

*Commuter line* atau biasa dikenal dengan kereta rel listrik (KRL) merupakan layanan kereta komuter di Indonesia yang efisien dan ramah lingkungan. Pada Daerah Operasi VI yang menghubungkan daerah di Daerah Istimewa Yogyakarta dan Jawa Tengah, PT Kereta Api Indonesia (Persero) memperkenalkan KRL Jogja-Solo yang mulai beroperasi pada Februari 2021 sebagai pengganti kereta rel diesel (KRD) bernama Prameks. Saat ini alat transportasi tersebut telah menjadi andalan oleh sebagian besar masyarakat karena melewati 13 stasiun untuk pemberhentian sekaligus keberangkatan dan juga memiliki waktu antara (*headway*) sekitar 60 menit. KAI Commuter berhasil mencatat realisasi volume penumpang sebesar 96% dan pendapatan angkutan penumpang sebesar 78% dibandingkan program Rencana Kerja dan Anggaran Perusahaan tahun 2022 (**PT Kereta Commuter Indonesia, 2022**).

Kereta rel listrik sendiri beroperasi dengan nominal tegangan 1.500 Volt berjenis DC (*direct current*) atau arus searah. Sumber yang didapat berasal dari PLN sebesar 20 kV, sehingga harus mengubahnya sesuai dengan kebutuhan KRL. Sistem elektrifikasi pada KRL terdapat pada gardu traksi sebagai penerima peralatan daya di mana berfungsi untuk menerima, menurunkan, dan mendistribusikan tegangan.

Salah satu peralatan penting di gardu traksi adalah komponen penyearah untuk mengonversi keluaran tegangan AC menjadi DC. Pada Gardu Traksi Purwosari menggunakan jenis *silicon rectifier* dengan spesifikasi 12 *pulse*. Proses perubahan tersebut mempunyai efek yang akan menimbulkan masalah yaitu terjadinya distorsi harmonik (**Dermawan & Rahman, 2018**). Harmonik adalah gelombang yang mengalami distorsi periodik pada tegangan, arus, atau daya. Gelombang ini terdiri dari gelombang sinus dengan frekuensi yang merupakan kelipatan bulat dari frekuensi fundamental, sehingga bentuknya menjadi tidak sinusoidal (**Sinaga, dkk, 2020**). *Recitifier* termasuk dalam kategori beban non-linear karena menyebabkan perubahan bentuk gelombang yang dihasilkan menjadi yang tidak seharusnya.

Parameter penting untuk mengukur distorsi harmonik dalam sistem daya terhadap gelombang sinusoidal dapat dilihat dari nilai *total harmonic distortion* (THD) (**Ugwuagbo, dkk, 2023**). THD merupakan perbandingan antara nilai rms dari seluruh komponen harmonik terhadap nilai rms dari komponen fundamental arus atau tegangan yang biasanya dinyatakan dalam persen (**Assaffat & Chandra, 2018**).

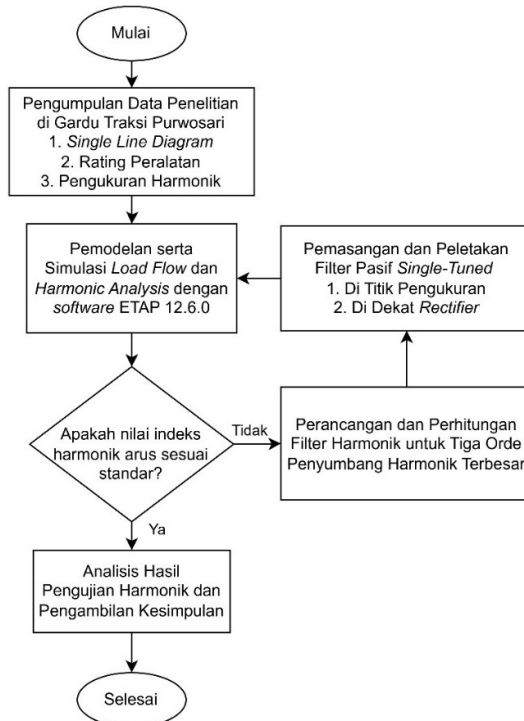
Salah satu dampak harmonik yaitu penurunan faktor daya dalam proses distribusi sistem tenaga listrik yang dapat menimbulkan beberapa kerugian, antara lain: meningkatkan kebutuhan daya semu [VA], melonjaknya rugi-rugi panas penghantar transmisi, dan menurunkan kualitas listrik karena adanya drop tegangan (**Durdhavale & Ahire, 2016**).

Harmonik dapat diatasi dengan pemasangan filter harmonik yang berjenis *passive filter* (**Das & Mishra, 2018**). Pemilihan jenis filter pasif tergantung pada karakteristik gelombang arus yang ingin diatasi, kebutuhan sistem listrik, serta tingkat distorsi harmonik. Selain itu, penggantian transformator dengan faktor K, kemampuan menangani beban yang mengandung harmonik, lebih tinggi dapat mengurangi harmonik (**Thango, dkk, 2021**).

Berdasarkan hal tersebut, dilakukanlah analisis distorsi harmonik karena diketahui adanya nilai indeks harmonik arus yang melampaui batas standar pada panel *outgoing RTR cubicle switchgear* 20 kV di Gardu Traksi Purwosari. Kemudian, alternatif solusi pemasangan filter harmonik lebih menguntungkan secara ekonomis dan teknis dalam penanganan masalah ini sehingga akan digunakan untuk memperbaiki nilai THD-I dengan merancang *single-tuned passive filter* untuk mereduksi gangguan harmonik.

## 2. METODE

Terdapat beberapa tahapan penting yang harus dilakukan yaitu pengumpulan data termasuk pada pengukuran harmonik, kemudian pembuatan model dan simulasi pada perangkat lunak, serta perancangan filter untuk mengatasi nilai THD arus yang tinggi. Langkah yang penulis lakukan dalam proses penelitian terhadap distorsi harmonik pada gardu traksi sebagai sistem elektrifikasi kereta rel listrik (KRL) direpresentasikan dalam Gambar 1.



**Gambar 1. Diagram Alir Penelitian**

### 2.1 Pengukuran Harmonik dan *Power Quality*

Tujuan pengukuran harmonik adalah untuk memahami sejauh mana distorsi harmonik terjadi dalam sistem. Orde yang di-*setting* untuk ekspor data hanya sampai 40 saja. Untuk harmonik tegangan hanya diukur pada satu hari saja (tanggal 7 Mei 2024) dengan waktu mengikuti jadwal KRL yang beroperasi pada wilayah gardu tersebut karena saat pengamatan nilainya masih di bawah standar sehingga menjadi batasan masalah terhadap penelitian ini. Data hasil pengukuran harmonik dimuat dalam Tabel 1.

**Tabel 1. Hasil Pengukuran Harmonik Tegangan**

Titik Pengukuran	THD-V			
	Maksimum		Minimum	
	Nilai [%]	Waktu	Nilai [%]	Waktu
Fase R	4,44	15.14	1,62	15.14
Fase S	3,76	13.00	1,41	12.59
Fase T	4,25	14.02	1,51	14.02

Sedangkan pengukuran harmonik arus dilakukan pada tanggal 8 Mei 2024 menggunakan metode yang sama dengan pengukuran harmonik tegangan terhadap ketiga fasenya yang mana datanya dimuat dalam Tabel 2.

**Tabel 2. Hasil Pengukuran Harmonik Arus**

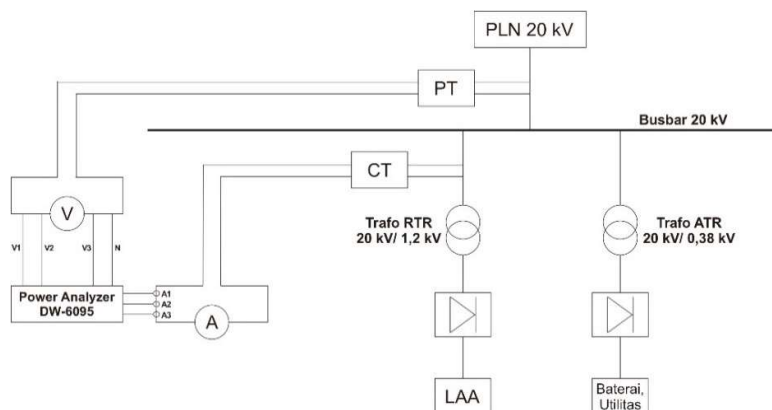
Titik Pengukuran	THD-I			
	Maksimum		Minimum	
	Nilai [%]	Waktu	Nilai [%]	Waktu
Fase R	28,9	09.53	10,24	09.48
Fase S	27,76	10.53	10,47	09.53
Fase T	24,11	13.16	10,18	13.23

Kemudian pada aspek kualitas daya digunakan untuk mengetahui kondisi awal sistem. Di waktu pengukuran, kondisi gardu traksi menerima *input* dari PLN dengan nominal 21 kV karena memang di wilayah tersebut ada kenaikan atau *tapping* tegangan. Berikut data pengukuran kualitas daya pada tanggal 7 Mei 2024 yang dipadankan dengan data pengukuran harmonik termuat dalam Tabel 3.

**Tabel 3. Hasil Pengukuran *Power Quality***

Profil Daya	Arus [A]	P [kW]	S [kVA]	Q [kVAR]	Faktor Daya
Maksimum	65,2	2288	2371	620,5	0,96
Minimum	5,6	166,1	205,2	120,5	0,81
Rata-Rata	11,3	394,7	423,2	152,6	0,93

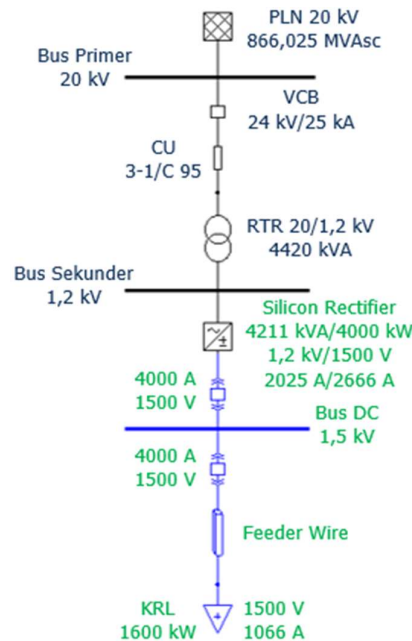
Metode untuk mengukur kualitas daya dan distorsi harmonik meliputi pengambilan data pada *cube switchgear* 20 kV yang menyuplai *silicon rectifier*. Harmonik berasal dari objek penelitian, sedangkan alat ukur bebas dari harmonik. Dalam pengukuran, *probe* tegangan alat ukur dipasang di sisi sekunder transformator tegangan (PT) dan *clamp* arus di keluaran kabel transformator arus (CT) pada panel *outgoing* RTR. Hal ini karena keterbatasan *rating* alat ukur serta izin dari pihak terkait. Pengukuran dilakukan selama tiga hari, dengan interval dua detik dan waktu sampling berbeda. Skema pengukuran ditunjukkan pada Gambar 2.



**Gambar 2. Rangkaian Pengukuran**

## 2.2 Pemodelan *Single Line Diagram*

Tahapan pemodelan dilakukan berdasarkan hasil pengukuran harmonik yang disamakan dengan data pengukuran *power quality* pada skenario operasi profil daya beban maksimum. Hasil pemadanan data tersebut akan dijadikan acuan parameter dalam kebutuhan simulasi aliran daya seperti pengaturan pada *operating load*. Selain itu, data-data spesifikasi dari peralatan dan juga data profil daya terukur digunakan sebagai *setting* parameter pada *single line diagram* gardu traksi, seperti ditampilkan oleh Gambar 3, yang dibuat melalui *software* ETAP versi 12.6.0 untuk mendapatkan pemodelan yang mendekati keadaan riil di lapangan.



Gambar 3. Pemodelan SLD Gardu Traksi

### 2.3 Perancangan Filter Pasif

Filter harmonik yang akan dirancang pada penelitian ini yaitu berjenis *single-tuned passive filter*. Filter tersebut idealnya hanya akan bekerja mengurangi distorsi harmonik pada satu orde tertentu saja, yaitu pada orde kerjanya (**Mustamam, dkk, 2017**). Dalam merancang filter pasif, maka perlu diketahui besarnya beberapa parameter yang dibutuhkan. Data tersebut termasuk kompensasi daya reaktif ( $Q_{VAR}$ ), reaktansi kapasitif ( $X_C$ ), kapasitansi ( $C$ ), reaktansi induktif ( $X_L$ ), dan induktansi ( $L$ ). Untuk mencari nilai tersebut dapat menggunakan persamaan dari referensi (**Dugan, dkk, 2002**).

1. Menghitung nilai faktor daya menggunakan Persamaan (1),

$$PF = \frac{P}{S} \quad (1)$$

2. Menentukan daya reaktif hasil perbaikan yang diinginkan dengan Persamaan (2),

$$Q_{VAR} = \sqrt{\left(\frac{P}{PF_{awal}}\right)^2 - P^2} - \sqrt{\left(\frac{P}{PF_{akhir}}\right)^2 - P^2} \quad (2)$$

3. Menghitung besar reaktansi kapasitif dari kapasitor untuk mendapatkan *rating* kapasitansi menggunakan Persamaan (3) dan (4),

$$X_C = \frac{V^2}{Q_{VAR}} \quad (3)$$

$$C = \frac{1}{2 \pi f X_C} \quad (4)$$

4. Menghitung nilai reaktansi induktif dan induktansi dengan Persamaan (5) dan (6),

$$X_L = \frac{X_C}{n^2} \quad (5)$$

$$L = \frac{X_L}{2 \pi f} \quad (6)$$

5. Mencari nilai komponen terakhir resistor menggunakan Persamaan (7),

$$R = \frac{\sqrt{L/C}}{Q_F} \quad (7)$$

di mana

PF = <i>power factor</i>	f = frekuensi fundamental [Hz]
P = daya aktif [kW]	$\pi$ = <i>phi</i>
S = daya semu [kVA]	X <sub>L</sub> = reaktansi induktif [ $\Omega$ ]
Q <sub>VAR</sub> = kompensasi daya reaktif [kVAR]	L = induktansi [mH]
X <sub>C</sub> = reaktansi kapasitif [ $\Omega$ ]	R = resistansi [ $\Omega$ ]
V = tegangan [kV]	n = orde harmonik yang difilter
C = kapasitans [ $\mu$ F]	Q <sub>F</sub> = <i>quality factor</i> [20-100]

Dalam perancangan filter diperlukan perhitungan faktor daya untuk kompensasi daya reaktif. Hal ini dikarenakan adanya komponen pada beban non-linier, sebagai penyumbang harmonik, yang mampu mempengaruhi nilai faktor daya. Adanya distorsi harmonik dapat meningkatkan daya semu (*apparent power*) yang harus disalurkan, sehingga menurunkan faktor daya (**Rani, dkk, 2016**). Maka dalam penelitian ini penulis menetapkan PF *correction* sebesar 0,98 (98%) sebagai faktor daya akhir (PF<sub>akhir</sub>) yang diharapkan. Untuk nilai Q<sub>F</sub> atau faktor kualitas akan menentukan selektivitas filter. Seiring bertambahnya daya, filter tidak mampu mengompensasi frekuensi yang berdekatan dengan frekuensi *cut off* dengan baik. Dengan demikian, faktor kualitas dipilih 60 karena dapat menyebabkan impedansi berkurang pada frekuensi yang diinginkan untuk difilter (**De Lima, dkk, 2016**).

## 2.4 Analisis Data

Dalam analisis data, digunakan standar IEEE Std 519<sup>TM</sup>-2014 tentang IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems. Tabel 4 memuat batasan harmonik tegangan. Berdasarkan nominal tegangan di Gardu Traksi Purwosari, yaitu 21 kV, maka nilai THD-V harus kurang dari lima persen ( $\leq 5\%$ ) dan IHD-V mempunyai ambang batas sebesar tiga persen ( $\leq 3\%$ ). Untuk standar harmonik arus terdapat tiga parameter: IHD-I, THD-I, dan TDD. Parameter tersebut tergantung pada nilai rasio hubung singkat yang terjadi di *point of common couple* (PCC) dan juga arus bebannya.

**Tabel 4. Standar Harmonik Tegangan (IEEE, 2014)**

<i>Bus voltage V at PCC</i>	IHD-V [%]	THD-V [%]
$V \leq 1,0$ kV	5,0	8,0
$1,0$ kV < $V \leq 69$ kV	3,0	5,0
$69$ kV < $V \leq 161$ kV	1,5	2,5
$161$ kV < $V$	1,0	1,5

**Tabel 5. Standar Harmonik Arus (IEEE, 2014)**

<i>Maximum harmonic current distortion in percent of I<sub>L</sub></i>						
<i>Individual harmonic order (odd harmonic)</i>						
<i>I<sub>sc</sub>/ I<sub>L</sub></i>	$3 \leq h < 11$	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h \leq 50$	TDD
< 20	4,0	2,0	1,5	0,6	0,3	5,0
20 < 50	7,0	3,5	2,5	1,0	0,5	8,0
50 < 100	10,0	4,5	4,0	1,5	0,7	12,0
100 < 1000	12,0	5,5	5,0	2,0	1,0	15,0
> 1000	15,0	7,0	6,0	2,5	1,4	20,0

Sesuai dengan Tabel 5, batas indeks harmonik arus yang direkomendasikan bagi pelanggan pada tegangan berkisar antara 120 V - 169 kV, harus ditinjau melalui  $SC_{Ratio}$  atau *short circuit ratio* (rasio hubung singkat) yang dihitung dengan Persamaan (8),

$$SC_{Ratio} = \frac{I_{SC}}{I_L} \quad (8)$$

$I_{SC}$  merupakan arus hubung singkat yang dapat ditentukan dari Persamaan (9),

$$I_{SC} = \frac{1000 \times MVA_{SC}}{\sqrt{3} \times kV} \quad (9)$$

$I_L$  merupakan arus beban penuh yang dapat ditentukan dengan Persamaan (10),

$$I_L = \frac{kW}{PF \times \sqrt{3} \times kV} \quad (10)$$

### 3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Data yang diperoleh dari pengukuran akan dianalisis dan digunakan sebagai bahan perhitungan spesifikasi dalam perancangan filter pasif *single-tuned*. Proses perbaikan nilai THD dimodelkan dan disimulasikan terhadap profil daya beban maksimum.

#### 3.1 Analisis Data terhadap Hasil Pengukuran

Perolehan nilai THD-V maksimum yang terekam oleh alat ukur terjadi pada fase R sebesar 4,44% di waktu 15.14 WIB. Seperti yang telah diketahui bahwa *rating* tegangan 21 kV masuk kategori  $1,0 \text{ kV} < V \leq 69 \text{ kV}$ , di mana memiliki standar harmonik tegangan pada IHD-V sebesar 3% dan THD-V mempunyai batasan 5%. Hasil IHD, dalam satuan Volt, terbesar antara lain: 192,78 di orde 11; 92,09 di orde 13; dan 84,72 di orde 23. Kesesuaian hasil orde penyumbang terbesar (angka ganjil) dengan standar pada pengukuran harmonik tegangan tertinggi ditunjukkan oleh Tabel 6, yang sudah diubah dalam satuan persen. Dapat diketahui bahwa harmonik tegangan yang terjadi dalam sistem mempunyai nilai indeks harmonik yang masih di bawah ambang batas standar (aman).

**Tabel 6. Kesesuaian Harmonik Tegangan pada Fase R**

Orde	Standar Indeks Harmonik		Hasil Pengukuran	
	IEEE Std 519™-2014		Indeks Harmonik	
	IHD-V [%]	THD-V [%]	IHD-V [%]	THD-V [%]
11			1,57	
13	3	5	0,75	4,4
23			0,69	

Selanjutnya mengenai pengukuran harmonik arus, merujuk pada Tabel 2, THD-I terbesar ada pada fase R dengan nilai 28,9% terjadi di jam 09.53 WIB dan arus yang mengalir sekitar 65,2 Ampere. Saat itu, KRL dalam keadaan *starting* motor atau istilahnya *unseat* yang berarti dari keadaan berhenti hingga waktu pertama berjalan. Orde yang muncul sebagai penyumbang harmonik arus terbesar identik dengan harmonik tegangan. Indeks harmonik arus cenderung lebih besar dari tegangan karena beban non-linear akan menarik arus yang bentuk gelombangnya tidak sinusoidal meskipun pada tegangan sumbernya berbentuk sinusoidal (**Sudibya & Irawaty, 2018**).

Pada pengukuran skenario operasi profil daya beban maksimum, terlihat hasil IHD terbesar dalam Ampere, antara lain: 14,09 di orde 11; 13,02 di orde 13; dan 4,52 di orde 23.

Kemudian untuk indeks harmonik arus pada profil daya beban maksimum, sebelumnya sudah diketahui dari data sekunder bahwa informasi *rating* arus hubung singkat terbesar dari sisi PLN sebesar 25 kA, sehingga nilai  $I_{SC}$  sudah diketahui yaitu 25.000 Ampere dan saat pengukuran, tegangan terukur sisi primer adalah 21 kV, maka nilai  $SC_{Ratio}$  sebesar 381,56. Angka hasil perhitungan tersebut masuk kategori *range* nilai dari  $100 < 1000$  yang mana memiliki batasan maksimal nilai TDD 15% serta IHD 5,5% untuk orde  $11 \leq h < 17$  dan 2% untuk orde  $23 \leq h < 35$ . Tabel 7 memperlihatkan ketidaksesuaian nilai distorsi arus dengan standar pada orde penyumbang harmonik terbesar terhadap profil daya beban maksimum.

**Tabel 7. Ketidakesuaian Harmonik Arus pada Profil Daya Beban Maksimum**

Orde	Standar Indeks Harmonik		Hasil Pengukuran	
	IEEE Std 519 <sup>TM</sup> -2014		Indeks Harmonik	
	IHD-I [%]	TDD-I [%]	IHD-I [%]	TDD-I [%]
11	5,5	15	21,62	
13			19,98	30,68
23	2		6,94	

Analisis mengacu pada standar IEEE Std 519<sup>TM</sup>-2014 yang menunjukkan bahwa indeks harmonik arus pada skenario beban maksimum melebihi batas. Upaya untuk memitigasi distorsi diperlukan filter harmonik berjenis *single-tuned passive filter* dengan orde 11, 13, dan 23 karena filter ini efektif untuk mengatasi harmonik pada orde tertentu, sehingga dirancang filter sebanyak tiga buah menggunakan pemodelan dan simulasi *software* ETAP.

### 3.2 Perhitungan Parameter Filter Pasif

Komponen filter harmonik yang ada di *software* mempunyai parameter untuk nilai tiap satu fasenya. Berikut Tabel 8 memuat perhitungan spesifikasi filter harmonik pada setiap ordenya berdasarkan profil daya beban maksimum saat pengukuran.

**Tabel 8. Spesifikasi Filter Harmonik**

Skenario Operasi	Parameter	Nilai Perhitungan Filter		
		di Titik Pengukuran	di Dekat <i>Rectifier</i>	
<b>Profil Daya Beban Maksimum</b>	$PF_{awal}$		0,96	
Arus [A]	65,2 $Q_{VAR}$ [kVAR]		67,89	
Tegangan [kV]	21 $X_C$ [ $\Omega$ ]	6495,66	21,21	
	1,2 $C$ [ $\mu F$ ]	0,49	150,07	
P /fase [kW]	766,2 $X_L$ [ $\Omega$ ]			
S /fase [kVA]	794,1	11	53,68	
$PF_{akhir}$	0,98	Orde 13	38,43	
Frekuensi [Hz]	50	23	12,27	
$Q_F$	60	L [mH]		
		11	170,87	0,55
		Orde 13	122,34	0,39
	23	39,08	0,12	
	R [ $\Omega$ ]			
		11	0,31123	0,00101
Orde 13		0,26335	0,00085	
	23	0,14884	0,00047	



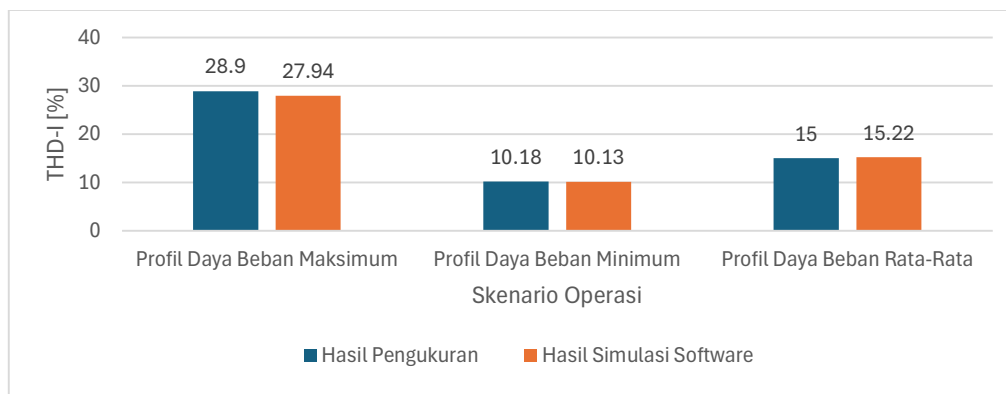
Perencanaan filter terdapat dua macam, untuk pemasangan di titik pengukuran dengan *rating* 21 kV dan di dekat *rectifier* pada bus yang memiliki besaran 1,5 kV. Hal tersebut untuk mengetahui lokasi yang optimal dan efektif dalam mengatasi harmonik yang diakibatkan oleh beban non-linear.

### 3.3 Simulasi Harmonik

Pembuatan skenario operasi didasari oleh padanan data terkait indeks harmonik dan *power quality*. Sesuai dengan pemodelan studi aliran daya, data yang digunakan untuk *input library harmonic* berasal dari pengukuran di lapangan. Pada kondisi profil daya beban maksimum nantinya akan diberi *magnitude* harmonik yang terukur pada komponen *rectifier* sebagai sumber harmonik karena bersifat beban non-linear. Di dalam perangkat lunak, *populate harmonic spectrum* hanya pada orde ganjil sesuai dengan karakteristik penyearah yaitu jumlah *pulse* sebanyak 12, sehingga memasukkan orde 11, 13, 23, 25, 35, dan 37 saja.

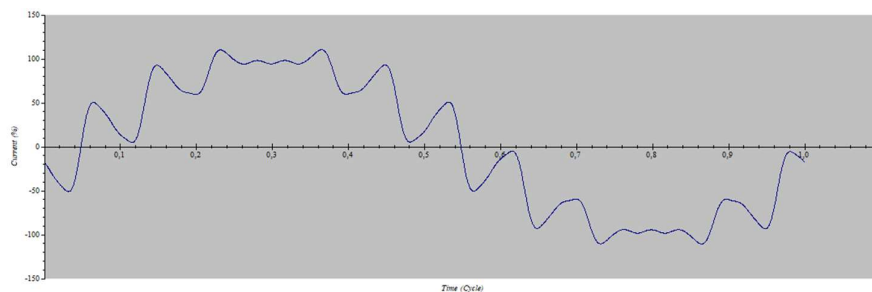
#### 3.3.1 Sebelum Pemasangan Filter

Berdasarkan hasil simulasi harmonik terhadap *operating load*, didapatkan data perbandingan dengan pengukuran yang divisualisasikan melalui Gambar 4 di mana hasilnya terlihat memiliki margin eror kecil atau selisih nilainya hanya sedikit. Kesesuaian hasil tersebut didasari oleh pengolahan data yang tepat. Perhitungan nilai  $SC_{Ratio}$  menunjukkan bahwa ketiga kondisi tersebut hal yang perlu diperbaiki adalah *individual harmonic distortion* atau IHD untuk orde penyumbang terbesarnya.

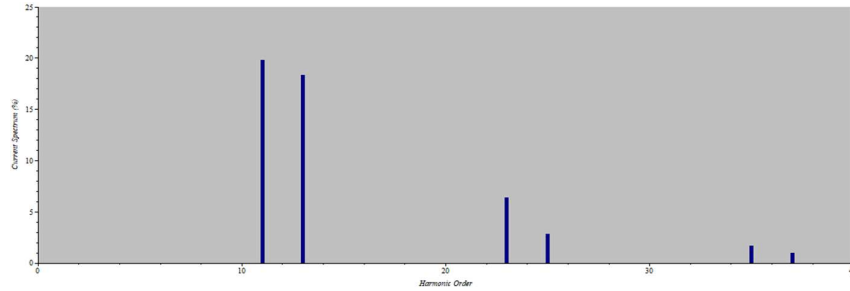


**Gambar 4. Perbandingan THD-I Hasil Pengukuran dan Simulasi *Software***

Adapun bentuk gelombang yang dihasilkan oleh profil daya beban maksimum ditunjukkan oleh Gambar 5 di mana tampak tidak berbentuk sinusoidal akibat adanya harmonik. Selain itu, Gambar 6 akan menampilkan spektrum orde harmonik yang dihasilkan. Hasil tersebut merupakan efek harmonik yang mempunyai frekuensi kelipatan dari frekuensi dasar yang menyusupi gelombang sehingga menjadikannya tidak sinusoidal.



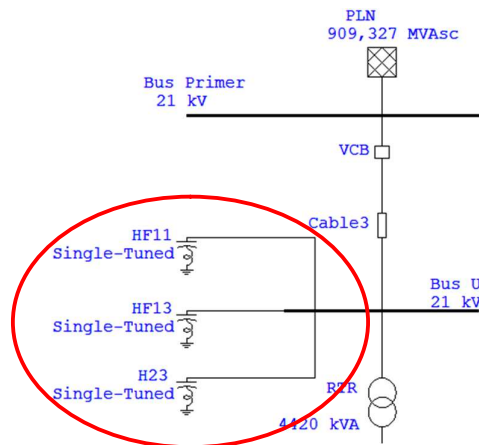
**Gambar 5. Gelombang Arus Sebelum Pemasangan Filter**



**Gambar 6. Spektrum Orde Harmonik Arus Sebelum Pemasangan Filter**

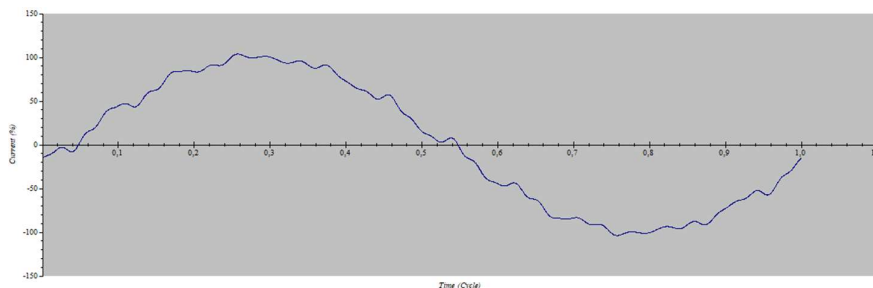
### 3.3.2 Sesudah Pemasangan Filter

Merujuk pada metode penelitian, filter akan dipasang pada dua titik yang berbeda sesuai dengan perencanaan. Tempat pertama yaitu berada di lokasi alat ukur *power and harmonic analyzer* terpasang. Kemudian tempat satunya yaitu di bus yang berdekatan dengan penyearah, sisi sekunder. Filter *single-tuned* nantinya dipakai untuk mengatasi orde penyumbang harmonik terbesar sehingga berjumlah tiga yang masing-masing terhadap orde 11, 13, dan 23 dengan pemasangan secara paralel. Supaya lebih jelas mengenai rangkaian pemasangan di titik pengukuran dapat dilihat pada Gambar 7.



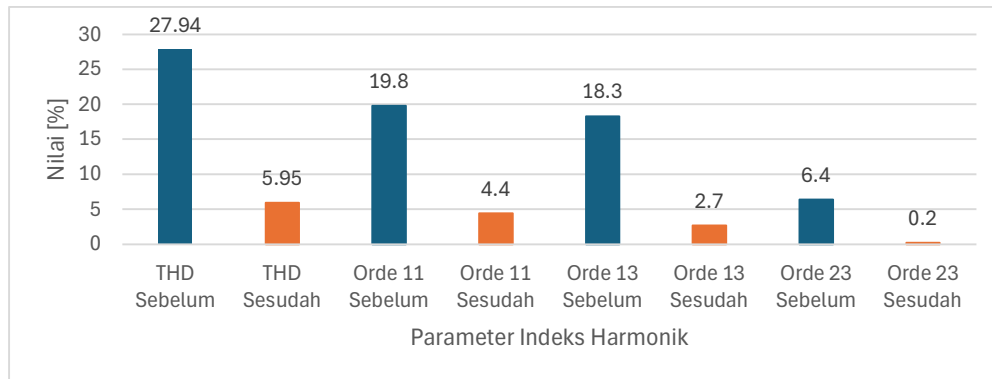
**Gambar 7. Pemasangan Filter di Titik Pengukuran**

Setelah dilakukan simulasi harmonik dengan kondisi filter terpasang pada profil daya beban maksimum, didapatkan bentuk gelombang seperti pada Gambar 8 yang terlihat bahwa bentuk gelombang arus yang dihasilkan sudah berubah menjadi lebih berbentuk sinusoidal. Namun, masih terdapat sedikit riak atau *noise* karena memang nilai THD belum 0% alias hilang sepenuhnya.



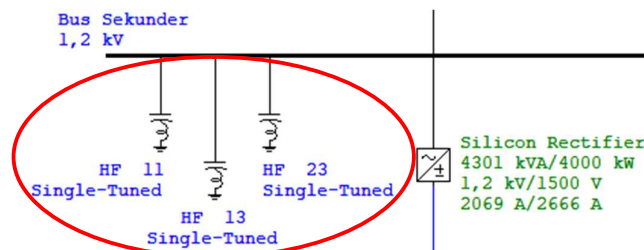
**Gambar 8. Gelombang Arus Sesudah Pemasangan Filter di Titik Pengukuran**

Lebih lanjut mengenai hasil simulasi pemasangan filter di titik pengukuran pada skenario operasi, masing-masing direpresentasikan melalui tren Gambar 9. Dari hasil pengujian, pemasangan filter di titik ini masih belum turun secara signifikan karena harmonik berasal dari sumber yang sedikit lebih jauh (*rectifier*). Filter pasif dengan spesifikasi tersebut mungkin memiliki keterbatasan dalam mereduksi seluruh spektrum harmonik secara efektif.



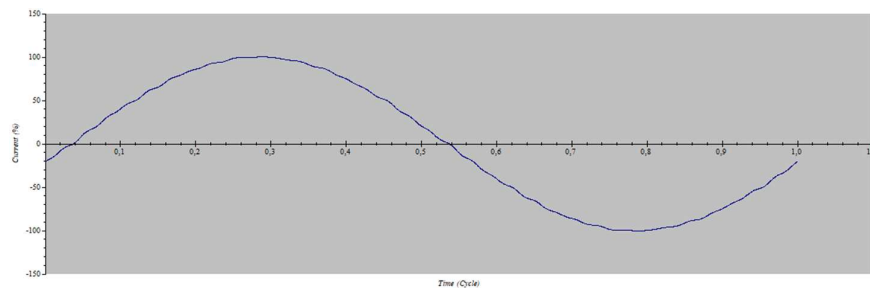
**Gambar 9. Hasil Simulasi Pemasangan Filter di Titik Pengukuran**

Kemudian, filter satunya akan dipasang pada sisi sekunder transformator yang menuju ke komponen penyearah dengan nominal 1.200 Volt. Spesifikasi filter juga akan berbeda dengan yang diletakkan pada titik pengukuran karena terdapat parameter nilai tegangan. Rangkaian filter pemasangan di dekat *rectifier* terlihat pada Gambar 10. Alasan pemasangan filter di dekat sumber harmonik adalah untuk meredam dan mengurangi gangguan harmonik sedini mungkin, sehingga mencegah penyebaran harmonik tersebut ke seluruh sistem listrik.

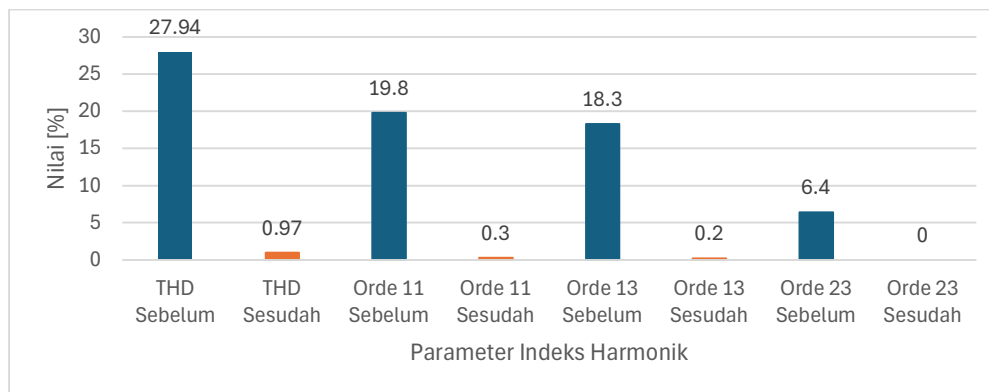


**Gambar 10. Pemasangan Filter di Dekat Rectifier**

Terlihat setelah melakukan simulasi harmonik dengan filter terpasang pada profil daya beban maksimum, diperoleh bentuk gelombang yang ditampilkan pada Gambar 11 sedangkan hasil simulasi terhadap indeks harmonik disajikan pada Gambar 12. Jika dilihat dari gambarnya, keluaran gelombang lebih mulus dan hampir menyerupai bentuk sinusoidal murni karena berbanding lurus dengan nilai THD yang dihasilkan sehingga akan sedikit riak yang muncul.



**Gambar 11. Gelombang Arus Sesudah Pemasangan Filter di Dekat Rectifier**



**Gambar 12. Hasil Simulasi Pemasangan Filter di Dekat *Rectifier***

Pemasangan yang dilakukan di titik tersebut dapat membuat filter bekerja secara optimal karena menargetkan sumber harmonik utama, yaitu *rectifier*. Akibatnya, sinyal masukan (sisi primer) dan yang keluar dari transformator (sisi sekunder) akan lebih bersih. Sedangkan filter yang dipasang pada titik pengukuran akan mereduksi harmonik dari lebih jauh sehingga sensitivitasnya akan berkurang. Alhasil, transformator masih terpengaruh oleh harmonik yang dihasilkan *rectifier*.

Tabel 9 memuat penurunan parameter *total harmonic distortion* arus untuk pemasangan filter di dua titik yang menunjukkan bahwa pemasangan di dekat *rectifier* dapat menurunkan nilai THD-I dari 27,94% menjadi 0,97%. Hal ini karena filter yang dipasang di dekatnya dapat langsung menargetkan dan mengurangi harmonik sebelum menyebar ke bagian lain dari sistem yang ada.

**Tabel 9. Penurunan THD-I Sesudah Pemasangan Filter pada 2 Titik**

Skenario Operasi Profil Daya	THD-I [%] Sebelum Pemasangan	Sesudah Pemasangan di Titik Pengukuran		Sesudah Pemasangan di Dekat <i>Rectifier</i>	
		THD-I [%]	Penurunan [%]	THD-I [%]	Penurunan [%]
Beban Maksimum	27,94	5,95	21,99	0,97	26,97

### 3.4 Analisis Data terhadap Hasil Simulasi

Berdasarkan hasil simulasi pada skenario operasi profil daya beban maksimum, analisis data akan dilakukan terhadap dua aspek, yaitu dari segi indeks harmonik dan parameter sistem tenaga listriknya (arus, daya semu, dan PF) untuk memberikan gambaran lengkap mengenai efektivitas skenario operasi yang diuji.

#### 3.4.1 Indeks Harmonik

Dalam analisis ini, akan dibandingkan nilai harmonik dari skenario operasi profil daya beban maksimum terhadap hasil simulasi sesudah pemasangan filter dengan standar yang telah ditetapkan. Perbandingan data dilakukan terhadap pengaruh dari masing-masing orde penyumbang harmonik. Studi kasus pemasangan filter pada profil daya beban maksimum dengan  $SC_{Ratio}$  sebesar 382,2 ini dilakukan untuk mengetahui nilai IHD yang dihasilkan apabila hanya satu filter apakah akan berbeda dengan dua filter hingga tiga filter yang terpasang. Berikut Tabel 10 memuat analisis perbandingan dengan standar IHD 5,5% untuk orde  $11 \leq h < 17$  dan 2% untuk orde  $23 \leq h < 35$ .

**Tabel 10. Analisis IHD-I pada Profil Daya Beban Maksimum**

Jumlah Filter yang Dipasang	IHD-I Sesudah Pemasangan [%]					
	Di Titik Pengukuran			Di Dekat <i>Rectifier</i>		
	11	13	23	11	13	23
1 Filter (11)	4,4	17,9	6,3	0,3	12,5	5,4
2 Filter (11,13)	4,4	2,6	6,3	0,3	0,2	4,4
3 Filter (11,13,25)	4,4	2,7	0,2	0,3	0,2	0
<b>Keterangan Warna</b>	Tidak sesuai standar			Sesuai standar		

Dari hasil analisis Tabel 10, dapat diketahui bahwa pada titik pengukuran dan di dekat *rectifier*, pemasangan tiga filter (orde 11, 12, 13) dapat membuat sistem mempunyai nilai indeks harmonik di bawah standar. Meskipun filter yang dirancang untuk mereduksi orde terbesar sebagai penyumbang harmonik, namun juga dapat memengaruhi nilai IHD pada orde lain sehingga dapat menurunkan parameter TDD dan THD sekaligus secara signifikan.

Spesifikasi filter yang digunakan untuk mendapatkan penurunan indeks harmonik paling optimal, yaitu di dekat *rectifier*, dengan nilai R dan L masing-masing berurutan dari orde 11, 13, 23 adalah 0,00101 [ $\Omega$ ]; 0,00085 [ $\Omega$ ]; 0,00047 [ $\Omega$ ] dan 0,55 [mH]; 0,39 [mH]; 0,12 [mH]. Sedangkan untuk nilai C sebesar 150,07 [ $\mu$ F]. Penggunaan filter yang tepat dapat membantu dalam menjaga stabilitas sistem dan memperpanjang umur peralatan yang terhubung dengan sumber harmonik, yaitu beban non-linear.

### 3.4.2 Perbandingan Arus, Daya Semu, dan PF

Selain distorsi harmonik menyebabkan nilai indeks terhadap arusnya meningkat (IHD, THD, dan TDD), fenomena tersebut juga akan mempengaruhi kualitas daya pada sistem tenaga listrik. Peristiwa itu terjadi karena frekuensi harmonik yang lebih tinggi dari frekuensi kerjanya akan mengakibatkan penurunan efisiensi atau terjadinya kerugian daya pada penghantar maupun peralatan listrik, misalnya transformator (Ariana, dkk, 2017).

Kualitas daya yang baik memastikan peralatan listrik berfungsi dengan optimal, mengurangi risiko kerusakan, dan meningkatkan efisiensi operasional. Pemasangan filter harmonik tidak hanya mempengaruhi nilai THD, tetapi juga memiliki dampak pada keseluruhan sistem, antara lain penurunan arus dan daya semua, serta perubahan PF seperti yang terlihat pada Tabel 11.

**Tabel 11. Perbandingan Arus, Daya Semu, PF Sebelum dan Sesudah Pemasangan Filter**

Parameter	Skenario Operasi Profil Daya Beban Maksimum	
	Sebelum	Sesudah
Arus [A]	65,2	63,7
S [kVA]	2372	2317
Faktor Daya	0,954	0,977

Tabel 11 memuat rangkuman hasil simulasi yang menunjukkan bahwa setelah dilakukan pengujian pemasangan filter, nilai dari parameter arus ketika harmonik menurun menjadi lebih dominan dan mengurangi kebutuhan daya semu. Sedangkan untuk faktor daya mengalami kenaikan yang mengindikasikan bahwa lebih banyak daya yang digunakan secara efektif oleh beban daripada terbuang sebagai reaktif, sehingga kualitas daya dari sistem tenaga listrik semakin baik.

#### 4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil analisis dan pembahasan terhadap data yang diperoleh, maka dapat disimpulkan dari penelitian ini beberapa hal. Pertama, evaluasi terhadap parameter indeks harmonik pada panel *outgoing* RTR *cubicle switchgear* 20 kV di Gardu Traksi Purwosari memberikan hasil bahwa THD tegangan diketahui masih dalam kondisi di bawah standar, sedangkan untuk pengukuran indeks harmonik arus (IHD dan TDD) ditemukan nilai yang melebihi ambang batas IEEE Std 519™-2014. Kedua, spesifikasi filter pasif *single-tuned* untuk menyaring harmonik agar menghasilkan nilai THD arus yang sesuai dengan standar dilakukan melalui perhitungan matematis. Terdapat dua macam hasil perancangan filter, yaitu untuk pemasangan di titik pengukuran yang mempunyai nilai tegangan 21 kV dan di dekat *rectifier* dengan nominal bus 1,2 kV. Ketiga, pemodelan *single line diagram* menggunakan *software* ETAP menunjukkan kesesuaian dengan keadaan riil di lapangan untuk *load flow* dan juga *harmonic analysis*. Hasil simulasi pemasangan tiga buah filter harmonik (orde 11, 13, dan 23) yang paling optimal dan efektif untuk skenario operasi profil daya beban maksimum didapatkan pada penempatan di dekat *rectifier* dengan penurunan sebesar 26,97% dari nilai THD-I yang sebelumnya 27,4% menjadi 0,97%.

#### DAFTAR RUJUKAN

- Ariana, I. G., Arjana, I. G. D., & Rinas, I. W. (2017). Analisis Pengaruh Harmonisa Terhadap Rugi -Rugi Daya (Losses) Pada Transformator Di Penyulang Sedap Malam. *Teknologi Elektro*, 16(1), 97–106. <https://doi.org/10.24843/mite.1601.14>
- Assaffat, L., & Chandra, S. A. (2018). Analisis Perbaikan Thd Tegangan Listrik Dengan Filter Pasif Studi Kasus Di Finish Mill Tuban IV PT Semen Indonesia (Persero) Tbk. *RELE (Rekayasa Elektrikal Dan Energi): Jurnal Teknik Elektro*, 1(1), 37–43. <https://doi.org/10.30596/rele.v1i1.2272>
- Das, J., & Mishra, A. (2018). Reduction of Harmonics by Using Active and Passive Harmonics Filters. *International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology*, 6(1), 944–950. <https://doi.org/10.22214/ijraset.2018.1143>
- De Lima, F. N., Braga, A. H., De Pádua Finazzi, A., Carvalho, B. C., & De Carvalho, E. O. P. (2016). Proposal of a Power Factor Correction Methodology in a Nonlinear Load Scenario. *Proceedings of International Conference on Harmonics and Quality of Power, ICHQP, 2016-Decem*, 146–151. <https://doi.org/10.1109/ICHQP.2016.7783459>
- Dermawan, E., & Rahman, R. L. (2018). Analisis Pengaruh Distorsi Harmonisa terhadap Deviasi Pengukuran Energi Listrik pada kWh Meter. *Jurnal Elektum*, 15(2), 7–16. <https://doi.org/https://doi.org/10.24853/elektum.15.2.%25p>
- Dugan, R. C., Santoso, S., McGranaghan, M. F., & Beaty, H. W. (2002). Electrical Power Systems Quality. In *Power Systems* (2nd ed.). McGraw Hill Professional. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-51118-4\\_1](https://doi.org/10.1007/978-3-319-51118-4_1)

- Durdhavale, S. R., & Ahire, D. D. (2016). A Review of Harmonics Detection and Measurement in Power System. *International Journal of Computer Applications*, 143(10), 42–45. <https://doi.org/https://doi.org/10.5120/IJCA2016910394>
- IEEE. (2014). IEEE Std 519-2014 (Revision of IEEE Std 519-1992), IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems. *IEEE Std 519-2014 (Revision of IEEE Std 519-1992)*, 2014, 1–29. <http://ieeexplore.ieee.org/servlet/opac?punumber=6826457>
- Mustamam, M., Baafai, U., & Ramli, M. (2017). Perbandingan Passive Lc Filter dan Passive Single Tuned Filter Untuk Mereduksi Harmonisa Variable Speed Drive dengan Beban Motor Induksi Tiga Fasa. *Jurnal Pendidikan Teknologi Dan Kejuruan*, 16(2), 95–105. <https://doi.org/10.24114/jptk.v16i2.4633>
- PT Kereta Commuter Indonesia. (2022). *Annual Report 2022: Wujudkan Ekosistem Transportasi Urban Modern Terintegrasi*. <https://commuterline.id/informasi-publik/laporan-tahunan>
- Rani, R. A., Saat, S., Yusop, Y., Husin, H., Abdul Rahman, F. K., & Isa, A. A. (2016). The Effects of Total Harmonics Distortion for Power Factor Correction at Non-Linear Load. *International Journal of Power Electronics and Drive Systems (IJPEDS)*, 7(2), 543–550. <https://doi.org/10.11591/ijped.v7.i2.pp551-560>
- Sinaga, J., Siburian, R. M., & Sirait, J. (2020). Analisa Pengaruh Harmonisa Pada Pengoperasian Beban Listrik. *Jurnal Teknologi Energi Uda*, 9(2), 88–97. <https://jurnal.darmaagung.ac.id/index.php/teknologienergi/article/view/958>
- Sudibya, B., & Irawaty, M. (2018). Analysis of the Effect of Linear and Non Linear Loads on the Effectiveness of Single Phase Transformers. *Prosiding Seminar Nasional Teknologi Informasi Dan Kedirgantaraan : Transformasi Teknologi Untuk Mendukung Ketahanan Nasional*, 4, SENATIK 2018, Vol. IV. <https://doi.org/10.28989/senatik.v4i0.226>
- Thango, B. A., Sikhosana, L. S., Nnachi, A. F., Jordaan, J. A., & Akumu, A. O. (2021). Design Considerations for K-Rated Transformers. *International Conference on Electrical, Computer, and Energy Technologies, ICECET 2021, December*, 1–5. <https://doi.org/10.1109/ICECET52533.2021.9698635>
- Ugwuagbo, E., Balogun, A., Ray, B., Anwar, A., & Ugwuishiwu, C. (2023). Total Harmonics Distortion Prediction at the Point of Common Coupling of Industrial Load with The Grid Using Artificial Neural Network. *Energy and AI*, 14(October 2022), 100281. <https://doi.org/10.1016/j.egyai.2023.100281>