

Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

**ANALISIS DAN PERANCANGAN *SINGLE TUNED PASSIVE FILTER*
UNTUK MITIGASI DISTORSI HARMONISA PADA
TRANSFORMATOR DISTRIBUSI**

TUGAS AKHIR

Diajukan Sebagai Salah Satu Syarat untuk Memperoleh Gelar Sarjana Teknik pada Prodi Teknik
Elektro Fakultas Sains dan Teknologi



UIN SUSKA RIAU

Oleh:

HERLY SYAHPUTRA
12250510358

UIN SUSKA RIAU
PROGRAM STUDI TEKNIK ELEKTRO
FAKULTAS SAINS DAN TEKNOLOGI
UNIVERSITAS ISLAM NEGERI SULTAN SYARIF KASIM RIAU
PEKANBARU

2026

Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

LEMBAR PERSETUJUAN

**ANALISIS DAN PERANCANGAN *SINGLE TUNED PASSIVE FILTER*
UNTUK MITIGASI DISTORSI HARMONISA PADA
TRANSFORMATOR DISTRIBUSI**

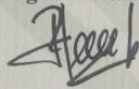
TUGAS AKHIR

oleh:

HERLY SYAHPUTRA
12250510358

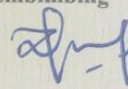
Telah diperiksa dan disetujui sebagai laporan Tugas Akhir di Pekanbaru,
pada tanggal 12 Maret 2026

Ketua Program Studi Teknik Elektro



Dr. Liliana, S.T., M.Eng.
NIP. 19781012 200312 2 004

Pembimbing



Dr. Ir. Zulfatri Aini, S.T., M.T., IPP.
NIP. 19721021 200604 2 001

LEMBAR PENGESAHAN

ANALISIS DAN PERANCANGAN *SINGLE TUNED PASSIVE FILTER* UNTUK MITIGASI DISTORSI HARMONISA PADA TRANSFORMATOR DISTRIBUSI

TUGAS AKHIR

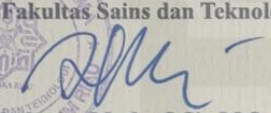
oleh:

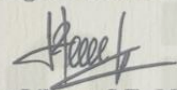
HERLY SYAHPUTRA
12250510358

Telah dipertahankan di depan Sidang Dewan Penguji Tugas Akhir sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik dari Fakultas Sains dan Teknologi Universitas Islam Negeri Sultan Syarif Kasim Riau di Pekanbaru, pada tanggal 12 Maret 2026

Pekanbaru, 12 Maret 2026

Mengesahkan,


Dekan Fakultas Sains dan Teknologi
Dr. Yuslenita Muda, S.Si., M.Sc.
NIP. 19770103 200710 2 001

Ketua Program Studi Teknik Elektro

Dr. Liliana, S.T., M.Eng.
NIP. 19781012 200312 2 004

DEWAN PENGUJI :

Ketua : Ir. Oktaf Brillian Kharisma, S.T., M.T.,
IPM., APEC ENG., ASEAN ENG.
Sekretaris : Dr. Ir. Zulfatri Aini, S.T., M.T., IPP.
Anggota I : Dr. Liliana., S.T., M.Eng.
Anggota II : Marhama Jelita., S.Pd., M.Sc.



- Hak Cipta Diindungi Undang-Undang**
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
 2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

LEMBAR HAK ATAS KEKAYAAN INTELEKTUAL

Tugas Akhir yang tidak diterbitkan ini terdaftar dan tersedia di Perpustakaan Universitas Islam Negeri Sultan Syarif Kasim Riau dan terbuka untuk umum dengan ketentuan bahwa hak cipta ada pada penulis. Referensi kepustakaan diperkenankan dicatat, tetapi pengutipan atau ringkasan hanya dapat dilakukan dengan mengikuti kaidah pengutipan yang berlaku.

Pengadaan atau penerbitan sebagian atau seluruh Tugas Akhir ini harus memperoleh izin dari Dekan Fakultas Sains dan Teknologi Universitas Islam Negeri Sultan Syarif Kasim Riau. Perpustakaan yang meminjamkan Tugas Akhir ini untuk anggotanya diharapkan untuk mengisi nama, tanda peminjaman dan tanggal pinjam.

Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

LEMBAR PERNYATAAN

Saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Herly Syahputra
NIM : 12250510358
Tempat/Tgl. Lahir : Batam, 09 Agustus 2003
Fakultas : Sains dan Teknologi
Prodi : Teknik Elektro
Judul Tugas Akhir : **Analisis dan Perancangan *Single Tuned Passive Filter* Untuk Mitigasi Distorsi Harmonisa Pada Transformator Distribusi**

Dengan ini saya menyatakan bahwa di dalam Tugas Akhir ini tidak terdapat karya yang pernah diajukan oleh saya maupun orang lain untuk keperluan lain, dan sepanjang pengetahuan saya juga tidak memuat karya atau pendapat yang pernah ditulis atau diterbitkan oleh orang lain kecuali disebutkan dalam referensi dan didalam daftar pustaka. Saya bersedia menerima sanksi jika pernyataan ini tidak sesuai dengan yang sebenarnya.

Pekanbaru, 12 Maret 2026
Yang membuat pernyataan,



HERLY SYAHPUTRA
NIM. 12250510358

LEMBAR PERSEMBAHAN

Alhamdulillah Rabbil 'Alamin, puji syukur yang mendalam saya panjatkan ke hadirat Allah SWT. yang telah melimpahkan karunia, kemudahan, serta kekuatan sehingga skripsi ini dapat terselesaikan dengan baik.

Karya ini pertama-tama saya persembahkan untuk diri saya sendiri, Herly Syahputra, sebagai apresiasi atas ketangguhan, kerja keras, dan kesabaran yang telah dikerahkan selama ini. Terima kasih telah bertahan dan tidak menyerah meski jalan yang dilalui tidak selalu mudah, tetap melangkah maju dengan doa dan usaha yang lebih kuat untuk masa depan.

Penghormatan dan rasa terima kasih yang mendalam saya sampaikan kepada dosen pembimbing saya, Ibu Dr. Ir. Zulfatri Aini, S.T., M.T., IPP., atas segala bimbingan, arahan, dan ilmu yang telah diberikan dengan penuh kesabaran. Arahan beliau bukan hanya sekadar tuntunan akademis, melainkan inspirasi bagi saya dalam menyelesaikan penelitian ini.

Lembar persembahan ini juga merupakan ungkapan kasih sayang paling tulus kepada kedua orang tua saya, Bapak Zainal Abidin dan Ibu Yumin. Skripsi ini adalah buah dari doa-doa sunyi yang kalian langitkan serta dukungan tanpa batas yang menjadi pelita dalam setiap langkah saya. Di sela rasa syukur ini, secara khusus saya persembahkan karya ini untuk mengenang almarhumah adik tercinta, Herlyna Putri, yang meskipun raga tak lagi bersama, namun semangat dan kenangannya akan selalu menjadi bagian dari setiap pencapaian saya.

Terakhir, terima kasih kepada semua pihak yang telah hadir memberikan semangat dan bantuan dalam bentuk apa pun yang sangat berarti hingga saya sampai di titik ini.

UIN SUSKA RIAU

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

ANALISIS DAN PERANCANGAN *SINGLE TUNED PASSIVE FILTER* UNTUK MITIGASI DISTORSI HARMONISA PADA TRANSFORMATOR DISTRIBUSI

HERLY SYAHPUTRA

NIM : 12250510358

Tanggal Sidang : 12 Maret 2026

Program Studi Teknik Elektro

Fakultas Sains dan Teknologi

Universitas Islam Negeri Sultan Syarif Kasim Riau

Jl. Soebrantas KM 15 No. 155 Pekanbaru

ABSTRAK

Tingginya distorsi harmonisa pada transformator 1000 *kVA* di UIN Sultan Syarif Kasim Riau berpotensi mempercepat degradasi isolasi dan merusak perangkat elektrik. Penelitian ini bertujuan menganalisis parameter kualitas daya ditinjau dari nilai *IHD_v*, *IHD_i*, *THD_v*, dan *TDD*, melakukan studi komparasi metode derating *K-Factor* dan *THDF*, serta merancang *single tuned passive filter*. Metode penelitian meliputi pengukuran lapangan selama tujuh hari, perhitungan matematis, dan validasi melalui simulasi ETAP. Hasil evaluasi menunjukkan nilai *TDD* arus mencapai 24,89% dan melampaui standar IEEE 519-1992. Hal ini menyebabkan penurunan kapasitas trafo, di mana metode *THDF* memberikan hasil sisa kapasitas lebih konsekratif sebesar 61,70% dibandingkan metode *K-Factor* sebesar 81,07%. Kondisi ini juga memicu kerugian finansial akibat *losses* sebesar Rp. 532.205.040,00 per tahun. Secara teoretis, pemasangan filter awal mampu menekan *losses* menjadi 60,64 *kW* dengan potensi penghematan Rp. 40.839.120,00. Namun, analisis batasan operasional mengungkap bahwa penggunaan filter bersama kapasitor eksisting memicu resonansi paralel dan *overvoltage* sebesar 127,72% yang menyalahi standar ANSI/IEEE 18-1992. Mitigasi akhir dilakukan dengan merancang ulang filter tanpa menyertakan kapasitor lama. Hasil simulasi ETAP membuktikan desain ulang ini efektif mereduksi *TDD* secara signifikan menjadi 7,53% dan mengembalikan performa sistem ke batas aman sesuai standar.

Kata Kunci : *Derating*, ETAP, Harmonisa, *Passive Filter*, Transformator.

ANALYSIS AND DESIGN OF SINGLE TUNED PASSIVE FILTER FOR HARMONIC DISTORTION MITIGATION ON DISTRIBUTION TRANSFORMER

HERLY SYAHPUTRA

NIM : 12250510358

Date of Final Exam : 12 March 2026

*Department of Electrical Engineering
Faculty of Science and Technology*

*State Islamic University of Sultan Syarif Kasim Riau
Soebrantas Street No. 155 Pekanbaru*

ABSTRACT

High harmonic distortion in the 1000 kVA transformer at UIN Sultan Syarif Kasim Riau potentially accelerates insulation degradation and damages electrical equipment. This research aims to analyze power quality parameters in terms of IHD_v , IHD_i , THD_v , and TDD values, perform a comparative study of K -Factor and $THDF$ derating methods, and design a single-tuned passive filter. The methodology involves seven-day field measurements, mathematical calculations, and validation through ETAP simulation. Evaluation results show that the current $STDD$ reached 24.89%, exceeding the IEEE 519-1992 standard. This condition leads to a reduction in transformer capacity, where the $THDF$ method yields a more conservative remaining capacity of 61.70% compared to the K -Factor method at 81.07%. Furthermore, this distortion triggers financial losses due to energy losses amounting to IDR 532,205,040.00 per year. Theoretically, the initial filter installation is capable of reducing losses to 60.64 kW with a potential saving of IDR 40,839,120.00. However, operational limit analysis reveals that integrating the filter with the existing capacitor triggers parallel resonance and an overvoltage of 127.72%, which violates the ANSI/IEEE 18-1992 standard. Final mitigation was conducted by redesigning the filter without including the old capacitor. ETAP simulation results demonstrate that this redesign effectively reduces the $STDD$ significantly to 7.53% and restores system performance to safe limits in accordance with the standards.

Keyword : *Derating, ETAP, Harmonics, Passive Filter, Transformer.*

Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:

a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.

2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

KATA PENGANTAR

Segala puji dan syukur penulis panjatkan kehadirat Allah SWT, yang atas limpahan rahmat, hidayah, dan karunia-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir ini dengan baik. Shalawat serta salam senantiasa tercurah kepada junjungan besar Nabi Muhammad SAW, sebagai suri tauladan bagi seluruh umat.

Tugas Akhir yang berjudul “Analisis dan Perancangan *Single Tuned Passive Filter* Untuk Mitigasi Distorsi Harmonisa Pada Transformator Distribusi” ini disusun sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik (S.T.) pada Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Islam Negeri Sultan Syarif Kasim Riau.

Penulis menyadari bahwa dalam penyusunan Proposal Tugas Akhir ini, banyak tantangan dan hambatan yang dihadapi. Namun, berkat bimbingan, arahan, motivasi, dan bantuan dari berbagai pihak, alhamdulillah semua itu dapat teratasi. Oleh karena itu, pada kesempatan ini penulis ingin menyampaikan ucapan terima kasih yang tulus kepada:

1. Ibu Prof. Dr. Hj. Leny Nofianti MS, SE, M.Si, Ak, CA., selaku Rektor Universitas Islam Negeri Sultan Syarif Kasim Riau.
 2. Ibu Dr. Yuslenita Muda, M.Si., M.Sc., selaku Dekan Fakultas Sains dan Teknologi UIN Sultan Syarif Kasim Riau.
 3. Ibu Dr. Liliana, S.T., M.Eng., selaku Ketua Program Studi Teknik Elektro UIN Sultan Syarif Kasim Riau.
 4. Ibu Dr. Ir. Zulfatri Aini, S.T., M.T. IPP., selaku Dosen Pembimbing yang telah meluangkan waktu, tenaga, dan pikiran untuk memberikan arahan, bimbingan, dan motivasi dari awal hingga selesainya penulisan Proposal Tugas Akhir ini.
 5. Ibu Dr. Liliana, S.T., M.Eng., selaku Dosen Penguji 1 Proposal Tugas Akhir ini.
 6. Ibu Marhama Jelita, S.Pd. M.Sc., selaku Dosen Penguji 2 Proposal Tugas Akhir ini.
- Seluruh Dosen dan Staf Program Studi Teknik Elektro UIN Sultan Syarif Kasim Riau yang telah memberikan ilmu dan bantuan administrasi selama masa perkuliahan.
- Bapak Indra selaku pihak teknisi dan pengelola gardu UIN Sultan Syarif Kasim Riau yang telah memberikan izin dan bantuan teknis selama proses pengambilan data di lapangan.

Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

Ayahanda dan Ibunda tercinta serta seluruh keluarga yang telah memberikan dukungan moril, materil, dan doa yang tiada henti.

10. Teman-teman seperjuangan di Program Studi Teknik Elektro angkatan 2022 atas kebersamaan, semangat, dan dukungannya.

11. Semua pihak yang tidak dapat penulis sebutkan satu per satu, yang telah banyak membantu dalam penyelesaian Proposal Tugas Akhir ini.

Penulis menyadari bahwa Tugas Akhir ini masih jauh dari kesempurnaan. Oleh karena itu, kritik dan saran yang bersifat membangun sangat penulis harapkan demi perbaikan di masa mendatang. Semoga Tugas Akhir ini dapat memberikan manfaat dan kontribusi positif bagi pengembangan ilmu pengetahuan, khususnya di bidang kualitas daya listrik.

Pekanbaru, 12 Maret 2026

Penulis,

Herly Syahputra
NIM. 12250510358

UIN SUSKA RIAU

DAFTAR ISI

	Halaman
LEMBAR PERSETUJUAN	i
LEMBAR PENGESAHAN	ii
LEMBAR HAK ATAS KEKAYAAN INTELEKTUAL.....	iii
LEMBAR PERSEMBAHAN	v
ABSTRAK.....	vi
ABSTRACT.....	vii
KATA PENGANTAR	viii
DAFTAR ISI	x
DAFTAR GAMBAR.....	xiv
DAFTAR TABEL.....	xv
DAFTAR RUMUS	xvi
DAFTAR SINGKATAN	xviii
BAB I PENDAHULUAN	I-1
1.1 Latar Belakang	I-1
1.2 Rumusan Masalah	I-3
1.3 Tujuan Penelitian.....	I-4
1.4 Manfaat Penelitian	I-4
1.5 Batasan Masalah.....	I-5
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	II-1
2.1 Penelitian Terkait.....	II-1
2.2. Harmonisa	II-3
2.2.1 Definisi dan Konsep Dasar Harmonisa	II-3
2.2.2 Jenis-Jenis Harmonisa Dalam Sistem Tiga Fasa	II-4
2.2.3 Sumber Harmonisa	II-4
2.3 Parameter dan Standar Harmonisa	II-5
2.3.1 <i>IHD</i> dan <i>THD</i>	II-5
2.3.2 Standar Harmonisa IEEE 519-1992	II-6
2.4 Transformasi <i>Fourier</i>	II-9
2.5 Dampak Harmonisa Pada Transformator	II-10
2.5.1 Penurunan Kapasitas Trafo (<i>Derating</i>)	II-10
2.5.2 Peningkatan Rugi-Rugi Daya Trafo (<i>Losses</i>).....	II-13
2.5.3 Kerugian Biaya Akibat <i>Losses</i> Trafo.....	II-15

Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
 a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.

2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

2.6	Filter Harmonisa.....	II-16
2.6.1	Filter Aktif.....	II-16
2.6.2	Filter Pasif.....	II-16
2.7	Perancangan <i>Single Tuned Passive Filter</i>	II-18
2.8	Analisis Efektivitas Filter.....	II-21
2.8.1	Perhitungan Batasan Operasional Komponen Filter	II-21
2.8.2	Kalkulasi Penurunan Arus Harmonisa Pasca Difilter	II-25
2.8.3	Menghitung Rugi-Rugi Penyerapan Daya Oleh Filter.....	II-28
BAB III METODOLOGI PENELITIAN.....		III-1
3.1	Jenis Penelitian.....	III-1
3.2	Lokasi Penelitian.....	III-1
3.3	Studi Literatur	III-2
3.4	Tahapan Penelitian	III-2
3.4.1	Pengumpulan Data	III-3
3.4.2	Penentuan Batasan Standar Distorsi Harmonisa	III-7
3.4.3	Perhitungan <i>Derating</i> Trafo	III-7
3.4.4	Perhitungan <i>Losses</i> Trafo	III-8
3.4.5	Perhitungan Kerugian Biaya Akibat <i>Losses</i> Trafo	III-9
3.4.6	Perancangan <i>Single Tuned Passive Filter</i>	III-9
3.4.7	Perhitungan Batasan Operasional Komponen Filter	III-10
3.4.8	Perhitungan Penurunan Distorsi Harmonisa Arus Pasca di Filter.....	III-11
3.4.9	Perhitungan Nilai IHD_i dan TDD Pasca di Filter.....	III-11
3.4.10	Perhitungan <i>Derating</i> Trafo Pasca Difilter.....	III-12
3.4.11	Perhitungan <i>Losses</i> Penyerapan Daya Oleh Filter	III-13
3.4.12	Perhitungan <i>Losses</i> Trafo Pasca Difilter	III-13
3.4.13	Perhitungan Kerugian Biaya Akibat <i>Losses</i> Trafo Pasca Difilter	III-14
3.4.14	Validasi Filter Harmonisa Dengan Simulasi ETAP.....	III-15
3.4.15	Hasil Analisis.....	III-15
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN		IV-1
4.1	Penentuan Batasan Standar Distorsi Harmonisa	IV-1
4.1.1	Batasan Standar Distorsi Harmonisa Tegangan	IV-1
4.1.2	Batasan Standar Distorsi Harmonisa Arus	IV-2
4.2	Perhitungan <i>Derating</i> Trafo	IV-4
4.2.1	Metode <i>K-Factor</i>	IV-4

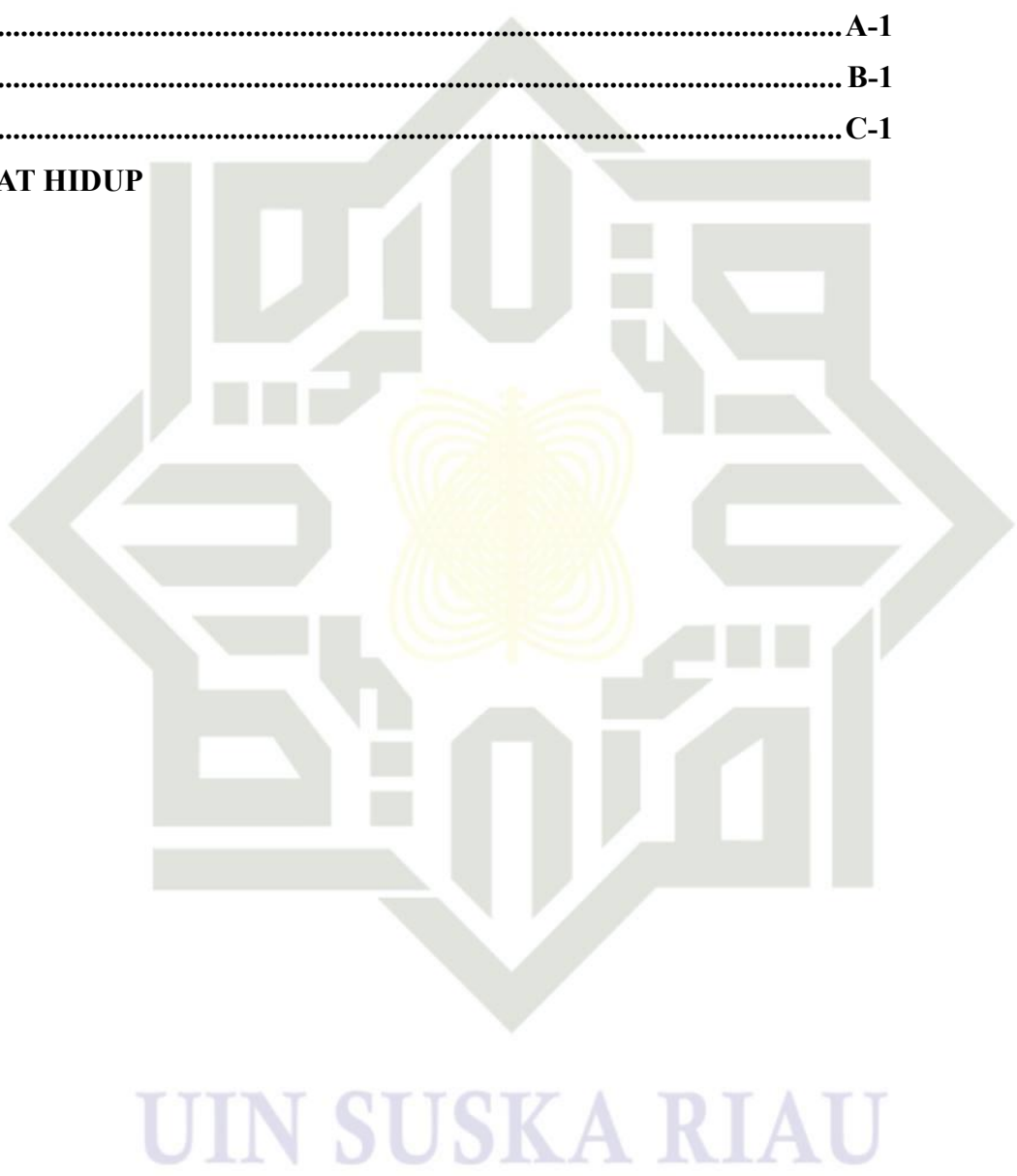
4.2.2	Metode <i>THDF</i>	IV-6
4.3	Perhitungan <i>Losses</i> Trafo	IV-8
4.3.1	<i>Losses</i> fasa R	IV-8
4.3.2	<i>Losses</i> fasa S.....	IV-8
4.3.3	<i>Losses</i> fasa T	IV-9
4.4	Perhitungan Kerugian Biaya Akibat <i>Losses</i> Trafo	IV-9
4.5	Perancangan <i>Single Tuned Passive Filter</i>	IV-9
4.5.1	Filter fasa R	IV-10
4.5.2	Filter fasa S.....	IV-11
4.5.3	Filter fasa T	IV-13
4.6	Perhitungan Batasan Operasional Komponen Filter	IV-15
4.6.1	Filter fasa R	IV-15
4.6.2	Filter fasa S.....	IV-17
4.6.3	Filter fasa T	IV-19
4.7	Kalkulasi Penurunan Distorsi Harmonisa Arus Pasca di Filter.....	IV-22
4.7.1	Penurunan Distorsi Harmonisa Arus Fasa R	IV-23
4.7.2	Penurunan Distorsi Harmonisa Arus Fasa S	IV-24
4.7.3	Penurunan Distorsi Harmonisa Arus Fasa T	IV-26
4.8	Perhitungan Nilai <i>IHD_i</i> dan <i>TDD</i> Pasca di Filter	IV-27
4.8.1	Nilai <i>IHD_i</i> dan <i>TDD</i> Fasa R	IV-27
4.8.2	Nilai <i>IHD_i</i> dan <i>TDD</i> Fasa S.....	IV-28
4.8.3	Nilai <i>IHD_i</i> dan <i>TDD</i> Fasa T.....	IV-28
4.9	Perhitungan <i>Derating</i> Trafo Pasca di Filter	IV-30
4.9.1	Metode <i>K-Factor</i>	IV-30
4.9.2	Metode <i>THDF</i>	IV-32
4.10	Perhitungan <i>Losses</i> Penyerapan Daya Oleh Filter	IV-33
4.10.1	<i>Losses</i> Filter Fasa R.....	IV-33
4.10.2	<i>Losses</i> Filter Fasa S.....	IV-34
4.10.3	<i>Losses</i> Filter Fasa T.....	IV-35
4.11	Perhitungan <i>Losses</i> Trafo Pasca di Filter	IV-36
4.11.1	<i>Losses</i> fasa R	IV-36
4.11.2	<i>Losses</i> fasa S.....	IV-37
4.11.3	<i>Losses</i> fasa T	IV-37
4.12	Perhitungan Kerugian Biaya Akibat <i>Losses</i> Trafo Pasca di Filter	IV-37

Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
2. Dilarang mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

4.13	Validasi Filter Harmonisa Dengan ETAP.....	IV-38
4.14	Hasil Analisis	IV-44
BAB V PENUTUP		V-1
5.1	Kesimpulan	V-1
5.2	Saran.....	V-2
DAFTAR PUSTAKA		
LAMPIRAN A		A-1
LAMPIRAN B		B-1
LAMPIRAN C		C-1
DAFTAR RIWAYAT HIDUP		

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.



UIN SUSKA RIAU

DAFTAR GAMBAR

	Halaman
2.1 Distorsi Gelombang Harmonisa	II-3
2.2 Konfigurasi Filter Pasif	II-17
3.1 Alur Tahapan Penelitian	III-3
3.2 Transformator 1000 <i>kVA</i> UIN Sultan Syarif Kasim	III-4
3.3 <i>Power Quality Analyzer</i>	III-5
3.4 Panel LVMDP	III-5
3.5 SLD UIN Sultan Syarif Kasim Riau	III-5
4.1 Nilai <i>TDD</i> Pada Fasa R Sebelum di Filter	IV-38
4.2 Nilai <i>IHD_i</i> Orde Ke-5 Pada Fasa R Sebelum di Filter	IV-39
4.3 Nilai <i>TDD</i> Pada Fasa R Setelah di Filter	IV-39
4.4 Nilai <i>IHD_i</i> Orde Ke-5 Pada Fasa R Setelah di Filter	IV-40
4.5 Hasil Uji <i>Load Flow</i> Pada Fasa R Kondisi Filter <i>Eksisting</i>	IV-41
4.6 Hasil Uji <i>Load Flow</i> Pada Fasa R Kondisi Filter <i>Non-Eksisting</i>	IV-41
4.7 Hasil Uji <i>Load Flow</i> Pada Fasa R Kondisi Kapasitor dan Filter Harmonisa <i>Non-Eksisting</i>	IV-42
4.8 Nilai <i>TDD</i> Pada Fasa R Kondisi Kapasitor dan Filter Harmonisa <i>Non-Eksisting</i>	IV-42
4.9 Nilai <i>IHD_i</i> Orde Ke-5 Pada Fasa R Kondisi Kapasitor dan Filter Harmonisa <i>Non-Eksisting</i>	IV-43
4.10 Nilai <i>TDD</i> Pada Fasa R Setelah diberi Desain Filter Baru	IV-43
4.11 Nilai <i>IHD_i</i> Orde Ke-5 Pada Fasa R Setelah diberi Desain Filter Baru	IV-44

Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

DAFTAR TABEL

	Halaman
2.1 Batasan Distorsi Harmonisa Tegangan	II-7
2.2 Batasan Distorsi Harmonisa Arus	II-9
2.3 <i>K-Factor Ratings</i>	II-11
2.4 Nilai P_{EC-R}	II-14
2.5 <i>Losses</i> Tanpa Beban	II-15
2.6 Standar Batasan Kerja Filter	II-25
3.1 Data Daya Gedung	III-6
4.1 Batasan Standar Distorsi Harmonisa Tegangan < 69 kV.....	IV-1
4.2 Pengukuran Distorsi Harmonisa Tegangan Trafo 1000 kVA	IV-1
4.3 Batasan Standar Distorsi Harmonisa Arus 20 < 50.....	IV-3
4.4 Pengukuran Distorsi Harmonisa Arus Trafo 1000 kVA.....	IV-3
4.5 Spesifikasi <i>Single Tuned Passive Filter</i>	IV-14
4.6 Hasil Perbandingan Total Kerja Filter Dengan Batasan Standar Operasional ANSI/IEEE 18-1992	IV-22
4.7 Perbandingan Harmonisa Arus Sebelum dan Setelah di Filter	IV-29
4.8 Perbandingan Harmonisa Arus Sebelum dan Setelah di Filter Pada ETAP.....	IV-40
4.9 Perbandingan Harmonisa Arus Sebelum dan Setelah di Desain Filter Baru Pada ETAP.....	IV-44

UIN SUSKA RIAU

DAFTAR RUMUS

	Halaman
2.1 Orde Harmonisa	II-3
2.2 <i>Individual Harmonic Distortion</i> Tegangan	II-5
2.3 <i>Individual Harmonic Distortion</i> Arus	II-5
2.4 <i>Total Harmonic Distortion</i>	II-6
2.5 <i>Total Demand Distortion</i>	II-6
2.6 Rasio Hubung Singkat	II-7
2.7 Arus Hubung Singkat	II-8
2.8 Arus Beban Penuh Trafo	II-8
2.9 Arus Beban Permintaan Maksimum	II-8
2.10 Deret <i>Fourier</i> Umum	II-9
2.11 Deret <i>Fourier</i> Bentuk Amplitudo dan Fasa	II-10
2.12 <i>K-Factor</i>	II-11
2.13 <i>Derating Factor</i>	II-12
2.14 <i>Transformer Harmonic Derating Factor</i>	II-12
2.15 Kapasitas Daya Baru	II-12
2.16 <i>Losses</i> Akibat Beban Harmonisa	II-13
2.17 Arus Harmonisa Dalam Per-Unit	II-13
2.18 Daya Aktif Satu Fasa	II-14
2.19 Konversi <i>Losses</i> Harmonisa	II-14
2.20 Total <i>Losses</i> Trafo	II-15
2.21 Kerugian Biaya Akibat <i>Losses</i>	II-16
2.22 Kebutuhan Daya Reaktif Kompensasi	II-18
2.23 Reaktansi Kapasitif	II-19
2.24 Kapasitansi	II-19
2.25 Reaktansi Induktif	II-19
2.26 Induktansi	II-20
2.27 Reaktansi Pada Orde Harmonisa Target	II-20
2.28 Resistansi Filter	II-20
2.29 Impedansi Fundamental Filter	II-21
2.30 Arus Fundamental Filter	II-22
2.31 Tegangan Fundamental Kapasitor	II-22

2.32	Daya Reaktif Fundamental Kapasitor	II-22
2.33	Total Arus Harmonisa Pada Filter	II-23
2.34	Tegangan Harmonisa Kapasitor	II-23
2.35	Arus <i>RMS</i> Total Filter	II-23
2.36	Tegangan Puncak Kapasitor	II-24
2.37	Tegangan <i>RMS</i> Total Kapasitor	II-24
2.38	Daya Reaktif Kapasitor Total	II-24
2.39	Impedansi Hubung Singkat Sistem	II-25
2.40	Reaktansi Hubung Singkat Sistem	II-25
2.41	Resistansi Hubung Singkat Sistem	II-26
2.42	Reaktansi Induktif Filter pada Orde ke- <i>h</i>	II-26
2.43	Reaktansi Kapasitif Filter pada Orde ke- <i>h</i>	II-26
2.44	Resistansi Sistem pada Orde ke- <i>h</i>	II-27
2.45	Reaktansi Sistem pada Orde ke- <i>h</i>	II-27
2.46	Impedansi Total Sistem pada Orde ke- <i>h</i>	II-27
2.47	Arus yang Diredam Filter	II-27
2.48	Arus Harmonisa Baru	II-28
2.49	Daya Aktif yang Diserap Filter	II-28
2.50	Daya Reaktif Filter	II-29
2.51	Daya Semu Filter	II-29
2.52	Faktor Daya Filter	II-29
2.53	<i>Losses</i> Akibat Pemasangan Filter	II-30

Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

© Hak cipta milik UIN Suska Riau
State Islamic University of Sultan Syarif Kasim Riau

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

DAFTAR SINGKATAN

AC	: <i>Air Conditioner</i>
ANSI	: <i>American National Standards Institute</i>
CAPEX	: <i>Capital Expenditure</i>
CBEMA	: <i>Computer & Business Equipment Manufacturers Association</i>
ETAP	: <i>Electrical Transient Analyzer Program</i>
FFT	: <i>Fast Fourier Transform</i>
HVDC	: <i>High Voltage Direct Current</i>
IEEE	: <i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
IGBT	: <i>Insulated Gate Bipolar Transistor</i>
IHD	: <i>Individual Harmonic Distortion</i>
LCCA	: <i>Life Cycle Cost Analysis</i>
LVMDP	: <i>Low Voltage Main Distribution Panel</i>
MOSFET	: <i>Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor</i>
ONAN	: <i>Oil Natural Air Natural</i>
PCC	: <i>Point of Common Coupling</i>
PF	: <i>Power Factor</i>
PLN	: <i>Perusahaan Listrik Negara</i>
RMS	: <i>Root Mean Square</i>
SLD	: <i>Single Line Diagram</i>
TDD	: <i>Total Demand Distortion</i>
THD	: <i>Total Harmonic Distortion</i>
THDF	: <i>Transformer Harmonic Derating Factor</i>
UPS	: <i>Uninterruptible Power Supply</i>

UIN SUSKA RIAU

Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Di era modern, ketersediaan energi listrik yang andal bukan lagi sekadar kebutuhan penunjang, melainkan fondasi vital bagi operasional berbagai sektor termasuk di institusi pendidikan tinggi [1]. Kualitas daya listrik merupakan sebuah parameter yang ditentukan oleh tiga aspek fundamental, yakni tegangan, arus, dan frekuensi yang menjadi tolok ukur utama dalam menjamin keandalan pasokan tersebut [2]. Namun ironisnya, masalah kualitas daya sering kali tidak bersumber dari penyedia layanan, melainkan dari karakteristik beban yang digunakan oleh konsumen itu sendiri [3]. Fenomena ini menjadi tantangan signifikan, terutama dengan meningkatnya penggunaan beban non-linier secara masif di berbagai fasilitas termasuk di lingkungan kampus [1].

Pada dasarnya, sistem tenaga listrik dirancang untuk beroperasi dengan gelombang sinusoidal yang ideal [4]. Akan tetapi, peralatan elektronik modern seperti komputer, *air conditioner* (AC) berbasis *inverter*, lampu *fluorescent*, dan *Uninterruptible Power Supply* (UPS) secara inheren merupakan beban non-linier [2] [5]. Beban-beban ini menarik arus dengan bentuk gelombang yang tidak lagi sinusoidal, sehingga menyebabkan distorsi pada gelombang asli yang disuplai dari pembangkit [6]. Distorsi inilah yang memunculkan masalah harmonisa, yaitu komponen gelombang berfrekuensi kelipatan dari frekuensi fundamental yang mencemari sistem tenaga listrik [4]. Dampak paling langsung dari harmonisa adalah timbulnya kenaikan suhu pada berbagai peralatan listrik [6] [7].

Transformator distribusi menjadi salah satu komponen yang paling rentan merasakan dampak destruktif dari harmonisa [7]. Sebagai garda terdepan yang terhubung langsung dengan beban konsumen, transformator menanggung beban distorsi arus secara kontinu [2]. Arus harmonisa menyebabkan peningkatan rugi-rugi daya secara signifikan, yang pada akhirnya dapat memaksa penurunan kapasitas operasional transformator [8] [9].

Pasokan listrik di UIN Sultan Syarif Kasim Riau dilayani oleh dua unit transformator berkapasitas 1000 *kVA* dan 500 *kVA*. Trafo 1000 *kVA* digunakan untuk melayani 13 beban gedung, sedangkan trafo 500 *kVA* digunakan untuk melayani beban peralatan Laboratorium Fakultas Sains dan Teknologi. Namun, unit transformator utama berkapasitas 1000 *kVA* yang melayani beban-beban krusial di kampus tercatat pernah mengalami kerusakan fatal sehingga harus diganti dengan unit baru.

Berdasarkan investigasi penelitian terdahulu yang dilakukan pada tahun 2016 terhadap unit transformator lama, hasil analisis menunjukkan bahwa tingkat distorsi harmonisa telah melampaui ambang batas standar IEEE 519-1992, dengan dominasi distorsi terjadi pada harmonisa orde ke-3. Melalui pendekatan metode *K-Factor*, penelitian tersebut menyimpulkan bahwa transformator lama yang merupakan tipe standar (K1) tidak dirancang untuk menahan beban panas tambahan yang ditimbulkan oleh harmonisa [9]. Permasalahan kualitas daya ini terbukti masih berlanjut meskipun unit transformator telah diganti. Penelitian lanjutan pada tahun 2023 di lokasi yang sama mengonfirmasi bahwa gangguan harmonisa masih terjadi pada unit transformator baru, dimana nilai *TDD* pada beberapa fasa tercatat kembali melebihi batasan standar IEEE 519-2014. Dengan menerapkan metode *THDF*, analisis tersebut menemukan adanya penurunan kapasitas pada trafo serta dampak ekonomi yang signifikan, yakni kerugian finansial tahunan akibat rugi-rugi daya harmonisa mencapai lebih dari Rp. 51 juta [5].

Meskipun penelitian terdahulu telah membahas dampak harmonisa, fokus analisis umumnya masih terbatas pada penurunan kapasitas transformator dan rugi-rugi daya akibat distorsi arus. Belum ada evaluasi mendalam mengenai *THDv* pada transformator tersebut. Padahal distorsi tegangan merupakan parameter krusial yang juga berdampak langsung pada kinerja peralatan listrik di sisi beban. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk melakukan analisis komprehensif terhadap kedua parameter kualitas daya, baik *THDv* maupun *TDD*. Penelitian ini juga akan melakukan analisis komparatif antara metode *K-Factor* dan *THDF* menggunakan satu set data pengukuran yang sama. Metode *K-Factor* digunakan untuk menentukan penurunan kapasitas trafo melalui pendekatan pembobotan spektrum arus harmonisa terhadap batas pembebanan transformator, sebagaimana yang diterapkan pada penelitian sebelumnya pada tahun 2016 [9]. Sebagai pembanding, metode *THDF* diterapkan untuk mengevaluasi sisa kapasitas trafo menggunakan pendekatan berbasis distorsi bentuk gelombang antara nilai *RMS* dan nilai puncak arus, sebagaimana yang diterapkan pada penelitian sebelumnya pada tahun 2018 dan 2023 [2] [5]. Dengan menerapkan kedua metode tersebut, penelitian ini akan memberikan evaluasi penurunan kapasitas transformator yang lebih akurat dan menyeluruh sebagai bahan pembanding.

Oleh karena itu, penelitian ini akan melakukan investigasi ulang pada tahun 2025 dengan tetap mengacu pada standar IEEE 519-1992 untuk menjaga konsistensi komparasi data dan keterbatasan alat ukur yang hanya mampu mengukur harmonisa tegangan dan arus hingga orde ke-40. Berdasarkan hasil pengukuran harmonisa terkini, penelitian ini akan

menganalisis dampak teknis termasuk perbandingan metode *derating K-Factor* dan *THDF* serta dampak kerugian biaya akibat *losses*. Selanjutnya, akan dirancang sebuah solusi mitigasi berupa *single tuned passive filter*. Analisis historis di lokasi menunjukkan bahwa distorsi harmonisa yang paling dominan dan secara konsisten melebihi standar adalah pada orde ke-3 [5] [9]. Karena masalah terkonsentrasi pada satu frekuensi spesifik, maka solusi yang paling efisien dan tepat sasaran adalah perancangan *single tuned passive filter* [10]. Pemilihan filter jenis *single tuned* ini didasarkan pada keunggulannya yang dirancang spesifik untuk meredam satu frekuensi target tertentu secara efektif [11]. Filter pasif jenis ini juga lebih dipilih karena selain lebih ekonomis dibandingkan filter aktif, ia juga mampu memberikan manfaat tambahan berupa perbaikan kualitas daya dengan mengkompensasi daya reaktif [1] [12] [13]. Filter ini bekerja dengan menyediakan jalur berimpedansi rendah yang akan mengalihkan dan meredam arus harmonisa orde ketiga sebelum merusak transformator dan mengganggu sistem utama [1].

Metodologi penelitian ini disusun melalui tiga tahapan. Tahap pertama mengukur harmonisa dan menghitung penurunan kapasitas trafo dengan metode *K-Factor* dan *THDF*. Berdasarkan hasil evaluasi tersebut, tahap kedua dilanjutkan dengan perancangan spesifikasi *single tuned passive filter* melalui perhitungan teoritis berdasarkan data pengukuran. Tahap terakhir adalah validasi desain filter menggunakan simulasi perangkat lunak ETAP untuk memverifikasi efektivitas filter dalam mereduksi harmonisa.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah diuraikan, maka rumusan masalah dalam penelitian ini adalah:

1. Bagaimana kondisi kualitas daya ditinjau dari parameter *IHD_v*, *IHD_i*, *THD_v* dan *TDD* serta dampak teknisnya terhadap penurunan kapasitas, rugi-rugi daya, dan kerugian biaya operasional pada transformator 1000 *kVA* berdasarkan pengukuran terkini yang mengacu pada standar IEEE 519-1992?
2. Bagaimana hasil analisis komparatif penurunan kapasitas transformator ketika dihitung menggunakan metode *K-Factor* dan metode *THDF* pada satu set data pengukuran yang sama?
3. Bagaimana spesifikasi desain nilai komponen *R*, *L*, dan *C* dari *single tuned passive filter* yang optimal untuk mereduksi harmonisa, dan bagaimana hasil validasi desain tersebut menggunakan simulasi ETAP?

4. Bagaimana perbandingan performa teknis dari nilai IHD_v , IHD_i , THD_v , TDD , $derating$, $losses$ dan potensi penghematan biaya transformator sebelum dan sesudah pemasangan filter pasif?

1.3 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan yang ingin dicapai dari penelitian ini adalah:

1. Menganalisis kondisi kualitas daya dari nilai, IHD_v , IHD_i , THD_v , TDD , $derating$, $losses$, dan dampak ekonomis kerugian biaya akibat harmonisa pada transformator 1000 kVA menggunakan data pengukuran tahun 2025 dan standar IEEE 519-1992.
2. Membandingkan hasil perhitungan penurunan kapasitas transformator menggunakan metode $K-Factor$ dan metode $THDF$ untuk mendapatkan pemahaman komprehensif mengenai sisa kapasitas aman transformator.
3. Merancang spesifikasi teknis komponen R , L , dan C untuk *single tuned passive filter* yang dihitung secara teoretis untuk meredam harmonisa, dan memvalidasi rancangan tersebut menggunakan perangkat lunak ETAP.
4. Menganalisis perbandingan performa teknis dari nilai IHD_v , IHD_i , THD_v , TDD , $derating$, $losses$, dan kelayakan ekonomi dari transformator sebelum dan sesudah penerapan filter pasif.

1.4 Manfaat Penelitian

Penelitian ini diharapkan dapat memberikan manfaat sebagai berikut:

1. Bagi akademisi, menjadi referensi ilmiah mengenai metodologi analisis harmonisa yang komprehensif serta studi komparasi metode $derating$, yang mengintegrasikan perhitungan teoritis dengan validasi simulasi perangkat lunak standar industri.
2. Bagi UIN Sultan Syarif Kasim Riau, memberikan diagnosis teknis yang akurat mengenai masalah kualitas daya pada transformator, rekomendasi solusi mitigasi yang tervalidasi untuk meningkatkan keandalan pasokan listrik, serta analisis potensi efisiensi energi dan penghematan biaya operasional.
3. Bagi praktisi ketenagalistrikan, menawarkan wawasan praktis mengenai penerapan evaluasi standar IEEE-519-1992 dan desain filter pasif untuk sistem distribusi tenaga listrik skala menengah yang mengalami masalah serupa.

Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

1.5 Batasan Masalah

Untuk menjaga agar penelitian ini tetap fokus, maka ditetapkan batasan masalah sebagai berikut:

1. Penelitian ini difokuskan hanya pada objek transformator utama berkapasitas 1000 *kVA*.
2. Solusi mitigasi yang dirancang terbatas pada *single tuned passive filter* yang ditujukan untuk meredam harmonisa yang spesifik sebagai orde paling dominan. Penelitian ini tidak merancang filter aktif atau filter untuk orde harmonisa lainnya.
3. Validasi efektivitas filter dilakukan melalui simulasi perangkat lunak ETAP dan tidak mencakup tahap implementasi perangkat fisik di lapangan.
4. Analisis dan evaluasi batasan distorsi harmonisa mengacu pada standar yaitu IEEE 519-1992.
5. Analisis ekonomi terbatas pada kuantifikasi biaya kerugian energi akibat harmonisa dan potensi penghematannya, tidak mencakup analisis biaya investasi (CAPEX) atau biaya siklus hidup (LCCA) dari implementasi filter.

Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penelitian Terkait

Penelitian terdahulu yang dilakukan di UIN Sultan Syarif Kasim Riau oleh [9] menginvestigasi dampak beban non-linier terhadap transformator distribusi 1000 *kVA*. Hasil pengukuran menunjukkan tingginya distorsi harmonisa arus yang melampaui standar IEEE 519-1992 dengan dominasi pada orde ke-3. Sebagai solusi, dirancang *single tuned passive filter* yang terbukti efektif mereduksi distorsi di seluruh fasa. Implementasi filter ini menurunkan nilai *THDi* secara signifikan, dengan penurunan terbesar terjadi pada fasa T dari 8,68% menjadi 4,78%. Selain perbaikan kualitas daya, filter tersebut juga berhasil menurunkan nilai *K-Factor*, memulihkan kapasitas trafo, serta mengurangi rugi-rugi daya, dimana *losses* pada fasa T berkurang drastis dari 4,77 *kW* menjadi 1,76 *kW*.

Penelitian lanjutan di lokasi yang sama oleh [2] menerapkan pendekatan yang lebih kompleks menggunakan *double tuned passive filter* untuk mengatasi distorsi harmonisa yang didominasi oleh dua orde sekaligus, yaitu orde ke-3 dan ke-5. Implementasi filter ganda ini terbukti efektif mereduksi distorsi arus secara simultan di seluruh fasa, dengan perbaikan indeks kualitas daya *THDi* yang signifikan hingga mencapai 1,99% pada fasa R. Selain menekan distorsi, solusi ini juga berhasil memulihkan kapasitas kerja transformator secara nyata ditandai dengan penurunan nilai penurunan kapasitas dari 0,12 *MVA* menjadi 0,05 *MVA*.

Penelitian lanjutan oleh [5] pada unit transformator baru memperluas cakupan analisis hingga ke dampak ekonomi akibat distorsi harmonisa. Pada kondisi eksisting, tingginya distorsi *THDi* yang mencapai 5,07% berkontribusi terhadap total rugi-rugi daya sebesar 8,66 *kW* dan penurunan kapasitas trafo sebesar 0,13 *MVA*. Dampak teknis ini berimplikasi langsung pada kerugian finansial tahunan yang mencapai Rp 51.585.888. Sebagai solusi, perancangan *single tuned passive filter* terbukti efektif memperbaiki kinerja sistem. Implementasi filter berhasil menurunkan *THDi* di seluruh fasa dan memulihkan kapasitas transformator dengan menekan nilai *derating* menjadi 0,10 *MVA*. Secara simultan, total *losses* berhasil direduksi menjadi 5,21 *kW*, yang berdampak pada penghematan biaya operasional secara signifikan dengan menekan total kerugian finansial tahunan menjadi Rp. 30.999.500.

Penelitian lain oleh [10] merancang sistem mitigasi untuk transformator yang melayani beban elektronik dominan, di mana tercatat sistem melewati standar kualitas daya dengan nilai $THDi$ mencapai 6,6%. Tingginya distorsi ini diidentifikasi sebagai pemicu utama penurunan efisiensi dan risiko *overheating* yang mengancam umur peralatan. Solusi menggunakan *single tuned passive filter* yang disimulasikan terbukti efektif memulihkan kualitas daya, menekan $THDi$ secara signifikan di seluruh fasa hingga kembali ke level aman di bawah 5% sesuai standar yang berlaku.

Sementara itu, studi komparatif oleh [1] mengevaluasi efektivitas mitigasi pada sistem dengan distorsi harmonisa mencapai $THDi$ 19,87%. Hasil menunjukkan *trade-off* signifikan, penggunaan *capacitor bank* mampu menekan $THDi$ hingga 4,3% namun menyebabkan faktor daya *leading* hingga -17,96%. Sebaliknya, *single tuned passive filter* menawarkan stabilitas sistem yang lebih baik dengan menurunkan $THDi$ ke level aman 13,64% sekaligus memperbaiki faktor daya menjadi 99,2%, menjadikannya solusi yang lebih optimal dan seimbang untuk karakteristik beban institusi pendidikan.

Tinjauan terhadap penelitian-penelitian terdahulu menjadi landasan utama bagi penyusunan skripsi ini. Fakta bahwa gangguan harmonisa orde ke-3 di UIN Sultan Syarif Kasim Riau terus berulang meskipun unit trafo telah diganti [5], yang mestinya dilakukan investigasi ulang terhadap kondisi kualitas daya terkini pada tahun 2025.

Pemilihan solusi *single tuned passive filter* berdasarkan pada bukti efektivitasnya dalam menurunkan distorsi arus hingga ke level aman pada berbagai studi kasus [5] [9] [10]. Hal ini diperkuat oleh temuan [1] yang membuktikan bahwa jenis filter ini lebih unggul dibandingkan *capacitor bank* karena mampu memperbaiki kualitas daya tanpa risiko menyebabkan faktor daya *leading*.

Sebagai pengembangan dari studi sebelumnya yang hanya menggunakan satu metode evaluasi kapasitas, penelitian ini menerapkan komparasi langsung antara metode *K-Factor* dan *THDF* untuk mendapatkan hasil analisis *derating* yang komprehensif. Selain itu, penelitian ini juga melengkapi celah analisis terdahulu dengan menambahkan evaluasi distorsi tegangan $THDv$ sesuai standar IEEE 519-1992 dan pembaruan perhitungan kerugian ekonomi pada tahun terkini, sehingga solusi yang ditawarkan menjadi lebih komprehensif dan tepat sasaran.

Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:

- a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
- b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.

2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

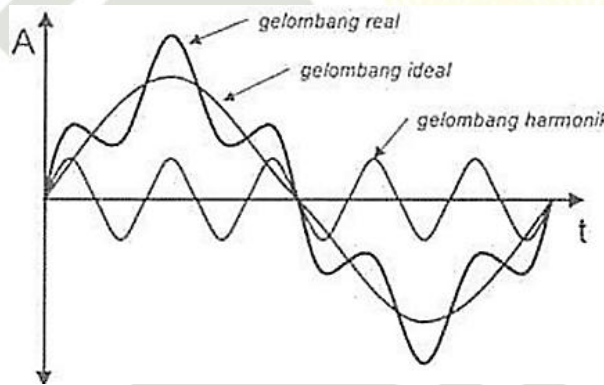
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

2.2. Harmonisa

Harmonisa menjadi aspek krusial dalam analisis kualitas daya karena dampaknya yang signifikan terhadap efisiensi sistem. Untuk memahami permasalahan ini secara menyeluruh, pembahasan akan dibagi ke dalam tiga fokus utama sebagai berikut.

2.2.1 Definisi dan Konsep Dasar Harmonisa

Harmonisa merupakan fenomena distorsi bentuk gelombang periodik pada sistem tenaga listrik, di mana gelombang arus atau tegangan menyimpang dari bentuk sinusoidal murni. Distorsi ini disebabkan oleh adanya komponen-komponen gelombang sinusoidal dengan frekuensi yang merupakan kelipatan bilangan bulat dari frekuensi fundamental sistem. Komponen-komponen berfrekuensi lebih tinggi ini menumpang pada gelombang fundamental, sehingga gelombang yang dihasilkan disebut sebagai gelombang terdistorsi atau gelombang riil adalah hasil penjumlahan sesaat antara gelombang frekuensi dasar dengan seluruh komponen gelombang harmoniknya [14].



Gambar 2.1 Distorsi Gelombang Harmonisa [14]

Secara matematis, hubungan antara frekuensi harmonisa dengan frekuensi fundamental didefinisikan sebagai orde harmonisa (h). Sebagai contoh, pada sistem 50 Hz, harmonisa orde ke-2 memiliki frekuensi 100 Hz, orde ke-3 memiliki frekuensi 150 Hz, dan seterusnya. Orde harmonisa dapat dihitung menggunakan persamaan berikut [14]:

$$h = \frac{f_h}{f_1} \tag{2.1}$$

Keterangan:

- h = Orde harmonisa
- f_h = Frekuensi harmonisa ke- h (Hz)
- f_1 = Frekuensi fundamental (Hz)

2.2.2 Jenis-Jenis Harmonisa Dalam Sistem Tiga Fasa

Dalam sistem tenaga listrik tiga fasa, harmonisa diklasifikasikan tidak hanya berdasarkan ordenya (ganjil atau genap), tetapi juga berdasarkan urutan fasanya, yang menentukan dampaknya terhadap sistem. Klasifikasi ini adalah sebagai berikut [14]:

1. Harmonisa urutan positif (*positive sequence*)

Terdiri dari harmonisa orde ke-1, ke-4, ke-7, dan seterusnya. Harmonisa ini memiliki urutan fasa yang sama dengan komponen fundamental dan cenderung menyebabkan pemanasan tambahan pada konduktor, transformator, dan motor [14].

2. Harmonisa urutan negatif (*negative sequence*)

Terdiri dari harmonisa orde ke-2, ke-5, ke-8, dan seterusnya. Harmonisa ini memiliki urutan fasa yang berlawanan dan sangat merugikan bagi motor induksi tiga fasa. Arus urutan negatif menghasilkan medan putar yang berlawanan arah dengan putaran normal, yang menyebabkan torsi negatif, getaran, suara bising, dan pemanasan berlebih [14].

3. Harmonisa urutan nol (*zero sequence*) atau *triplens*

Terdiri dari harmonisa kelipatan tiga, yaitu orde ke-3, ke-6, ke-9, dan seterusnya. Komponen-komponen ini bersifat sefasa pada ketiga fasa. Pada sistem tiga fasa empat kawat yang terhubung bintang (*Y*), arus harmonisa urutan nol tidak saling meniadakan di titik netral, melainkan saling menjumlahkan. Hal ini menyebabkan arus pada penghantar netral menjadi sangat tinggi, bahkan bisa melebihi arus fasa, dan menimbulkan risiko pemanasan berlebih yang ekstrem pada kabel netral hingga potensi kebakaran [14].

2.2.3 Sumber Harmonisa

Penyebab fundamental dari distorsi harmonisa pada sistem tenaga listrik adalah karakteristik dari beban yang terhubung. Beban listrik secara umum dapat diklasifikasikan menjadi dua jenis, yaitu beban linier dan beban non-linier [9].

Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:

- a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
- b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.

2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

Beban linier

Beban linier adalah beban yang memiliki impedansi konstan, di mana arus yang ditarik berbanding lurus dengan tegangan yang diterapkan padanya. Akibat dari hubungan linier ini, jika beban disuplai oleh tegangan dengan bentuk gelombang sinusoidal murni, maka arus yang mengalir juga akan memiliki bentuk gelombang sinusoidal murni, meskipun mungkin terjadi pergeseran fasa antara tegangan dan arus. Dengan kata lain, beban linier tidak mengubah bentuk gelombang dari sumbernya. Oleh karena itu, beban linier tidak menghasilkan distorsi harmonisa. Contoh klasik dari beban linier adalah pemanas resistif, lampu pijar, dan motor induksi yang beroperasi pada kecepatan konstan tanpa penggerak elektronik [9].

Beban non-linier

Beban non-linier adalah sumber utama dari distorsi harmonisa. Beban ini menarik arus yang tidak proporsional dengan tegangan dalam setiap siklusnya. Peralatan ini umumnya menggunakan komponen elektronika daya berbasis semikonduktor seperti dioda, *thyristor*, atau transistor yang bekerja sebagai saklar berkecepatan tinggi. Proses *switching* inilah yang memotong gelombang arus, sehingga menghasilkan bentuk gelombang arus yang tidak lagi sinusoidal dan menyuntikkan kembali arus harmonik ke dalam sistem tenaga listrik [9].

2.3 Parameter dan Standar Harmonisa

Dalam menentukan harmonisa pada suatu sistem, ada parameter dan standar yang menjadi acuan dalam menentukan harmonisa tersebut sebagai berikut.

2.3.1 *IHD* dan *THD*

IHD adalah perbandingan persentase antara nilai *RMS* komponen harmonisa orde-*h* terhadap komponen fundamental [14].

$$IHD_v = \frac{V_h}{V_1} \times 100 \quad (2.2)$$

$$IHD_i = \frac{I_h}{I_1} \times 100 \quad (2.3)$$

Keterangan:

- THD_v Distorsi harmonisa individu tegangan (%)
- THD_i Distorsi harmonisa individu arus (%)
- V_h Tegangan harmonisa pada orde ke- h (V)
- I_h Arus harmonisa pada orde ke- h (A)
- V_1 Tegangan fundamental (V)
- I_1 Arus fundamental (A)

THD_v dan TDD adalah nilai efektif total dari semua komponen harmonisa yang dibandingkan dengan komponen fundamental [14].

$$THD_v = \frac{\sqrt{\sum_{h>1}^{h_{max}} V_h^2}}{V_1} \times 100 \quad (2.4)$$

$$TDD = \frac{\sqrt{\sum_{h>1}^{h_{max}} I_h^2}}{I_1} \times 100 \quad (2.5)$$

Keterangan:

- THD_v = Total Harmonic Distortion tegangan (%)
- TDD = Total Harmonic Distortion arus (%)
- $\sum_{h>1}^{h_{max}} I_h^2$ = Total Arus Harmonisa (A)
- V_h = Tegangan harmonisa pada orde ke- h (V)
- I_h = Arus harmonisa pada orde ke- h (A)
- V_1 = Tegangan fundamental (V)
- I_1 = Arus fundamental (A)

2.3.2 Standar Harmonisa IEEE 519-1992

Standar IEEE 519-1992, yang berjudul "*IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems*", digunakan sebagai acuan utama dalam mengevaluasi batas distorsi harmonisa yang diizinkan pada sistem tenaga listrik. Standar ini menetapkan batasan pada titik *Point of Common Coupling (PCC)*, yaitu titik pertemuan antara instalasi pengguna dengan jaringan utilitas [15].

Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang
 1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber.
 a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
 2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:

- a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
- b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.

2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

1. Batasan distorsi harmonisa tegangan

Berdasarkan IEEE 519-1992, batasan distorsi tegangan ditentukan berdasarkan level tegangan sistem di *PCC*. Untuk sistem distribusi tegangan rendah dan menengah di bawah 69 kV , batasan yang berlaku adalah sebagai berikut [15].

Tabel 2.1 Batasan Distorsi Harmonisa Tegangan [15]

<i>Bus Voltage V at PCC</i>	<i>Individual Voltage Distortion (%)</i>	<i>Total Voltage Distortion THD (%)</i>
69 kV and bellow	3.0	5.0
$69.001\text{ kV trough }161\text{ kV}$	1.5	2.5
$161.001\text{ kV and above}$	1.0	1.5

Note:

High voltage system can have up to 2.0% THD where the cause in an HVDC terminal that will attenuate by the time it is tapped for a user.

2. Batasan distorsi harmonisa arus

Batasan distorsi harmonisa arus dalam IEEE 519-1992 dinyatakan dalam parameter *Total Demand Distortion (TDD)*. *TDD* didefinisikan sebagai rasio akar jumlah kuadrat arus harmonisa terhadap arus beban permintaan maksimum (I_L) [15]. Batasan *TDD* ditentukan berdasarkan rasio hubung singkat (SC_{ratio}) di *PCC*. Untuk menentukan kategori batasan yang berlaku, perlu dihitung terlebih dahulu rasio hubung singkat dengan persamaan berikut [14]:

$$SC_{ratio} = \frac{I_{SC}}{I_L} \quad (2.6)$$

Keterangan:

SC_{ratio} = Rasio hubung singkat

I_{SC} = Arus hubung singkat maksimum di *PCC* (A)

I_L = Arus beban permintaan maksimum (A)

I_{SC} adalah arus hubung singkat maksimum di *PCC*, yang dapat dihitung dengan [16]:

Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

$$I_{SC} = \frac{I_{FL} \times 100}{Z} \quad (2.7)$$

Keterangan:

I_{SC} = Arus hubung singkat maksimum di PCC (A)

I_{FL} = Arus beban penuh trafo (A)

Z = Impedansi trafo (%)

I_{FL} adalah arus beban penuh pada trafo yang dapat dihitung dengan persamaan [14]:

$$I_{FL} = \frac{S}{\sqrt{3} \times V_{LL}} \quad (2.8)$$

Keterangan:

I_{FL} = Arus beban penuh trafo (A)

S = Kapasitas trafo (kVA)

V_{LL} = Tegangan *line to line* trafo sisi sekunder (kV)

I_L adalah arus permintaan beban maksimum yang terpasang pada sistem. I_L dapat dihitung dengan persamaan berikut [14]:

$$I_L = \frac{P_{max}}{\sqrt{3} \times V_{LL} \times \cos\phi} \quad (2.9)$$

Keterangan:

I_L = Arus beban permintaan maksimum (A)

P_{max} = Daya aktif beban maksimum 3 fasa (kW)

V_{LL} = Tegangan *line to line* trafo sisi sekunder (kV)

$\cos\phi$ = Faktor daya

Setelah mendapatkan nilai rasio hubung singkat (SC_{ratio}), batasan TDD yang berlaku dapat ditentukan dari Tabel 2.2 berikut.

Tabel 2.2 Batasan Distorsi Harmonisa Arus [15]

<i>Maximum Harmonic Current Distortion in Percent of I_L</i>						
<i>Individual Harmonic Order (Odd Harmonic)</i>						
<i>I_{sc}/I_L</i>	< 11	11 ≤ <i>h</i> < 17	17 ≤ <i>h</i> < 23	23 ≤ <i>h</i> < 35	35 ≤ <i>h</i>	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

Even harmonics are limited to 25% of the oddharmonics limit above.

**All power generation equipment is limited to these values of current distortion, regardless of actual I_{sc}/I_L. Where:*

I_{sc} = maximum short-circuit current at PCC.

I_L = maximum demand load current at PCC.

2.4 Transformasi Fourier

Transformasi *fourier* merupakan pendekatan matematis yang digunakan untuk menganalisis bentuk gelombang nonsinusoidal periodik. Prinsip dasar dari metode ini menyatakan bahwa setiap bentuk gelombang periodik yang terdistorsi dapat diformulasikan atau diuraikan ke dalam suku-suku deret fourier. Setiap suku dalam deret tersebut merepresentasikan komponen harmonisa yang membentuk gelombang terdistorsi tersebut.

Secara umum, sebuah fungsi periodik $f(t)$ dengan frekuensi dasar ω_0 dapat dinyatakan dalam persamaan matematis sebagai berikut [17]:

$$f(t) = A_0 + \sum_{h=1}^{\infty} [A_h \cos(h\omega_0 t) + B_h \sin(h\omega_0 t)] \quad (2.10)$$

Keterangan:

$f(t)$ = Fungsi periodik waktu

A_0 = Komponen DC rata-rata atau amplitudo komponen searah

h = Orde harmonisa

ω_0 = Frekuensi sudut fundamental (*rad/s*)

A_h = Koefisien *fourier* komponen *cos*

B_h = Koefisien *fourier* komponen *sin*

Persamaan tersebut juga dapat disederhanakan ke dalam bentuk amplitudo (C_h) dan sudut fasa (φ_h) sebagai berikut [17]:

$$f(t) = A_0 + \sum_{h=1}^{\infty} C_h \sin(h\omega_0 t + \varphi_h) \quad (2.11)$$

Keterangan:

$f(t)$ = Fungsi periodik waktu

A_0 = Komponen DC rata-rata atau amplitudo komponen searah

h = Orde harmonisa

ω_0 = Frekuensi sudut fundamental (rad/s)

C_h = Amplitudo puncak harmonisa ke- h

φ_h = Sudut fasa harmonisa ke- h

Dalam implementasi analisis sistem tenaga listrik, perhitungan ini sering dilakukan menggunakan metode *Fast Fourier Transform* (FFT). FFT merupakan metode analisis sinyal yang sangat signifikan dan banyak digunakan di berbagai bidang teknik untuk mengubah sinyal dari domain waktu menjadi domain frekuensi [6]. Perangkat lunak simulasi seperti *Matlab/Simulink* menggunakan algoritma FFT ini untuk menganalisis spektrum harmonisa dan mengevaluasi efektivitas peredaman harmonisa dalam sistem kelistrikan [11].

2.5 Dampak Harmonisa Pada Transformator

Ketika sebuah transformator distribusi melayani beban non-linier, itu akan menyebabkan pemanasan tambahan. Pemanasan berlebih ini jika tidak ditangani, dapat memperpendek umur pakai transformator. Untuk mencegah hal tersebut, kapasitas operasional transformator harus diturunkan dari nilai *nameplate*-nya, yang dikenal sebagai *derating*.

2.5.1 Penurunan Kapasitas Trafo (*Derating*)

Terdapat beberapa metode untuk mengkuantifikasi besarnya derating yang diperlukan, di antaranya adalah metode berbasis *K-Factor* dan metode THDF.

Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

Metode *K-Factor*

Metode *K-Factor* yang mengacu pada standar IEEE C57.110-1986, berfokus pada kemampuan transformator untuk menahan panas tambahan yang dihasilkan oleh arus harmonisa. *K-factor* adalah sebuah nilai numerik yang mengindikasikan kemampuan sebuah transformator untuk menahan efek pemanasan dari arus harmonisa tanpa melebihi batas suhu operasional desainnya [18]. Transformator standar yang umum digunakan oleh PLN memiliki *rating K-Factor* 1 (K1), yang berarti unit tersebut dirancang untuk melayani 100% beban linier dan tidak memiliki kapasitas termal tambahan untuk beban non-linier [9]. Untuk melayani beban non-linier yang signifikan, diperlukan transformator dengan *rating K-Factor* yang lebih tinggi, yang secara khusus dirancang dengan material dan konstruksi yang mampu menangani panas tambahan.

Tabel 2.3 *K-Factor Ratings* [19]

Type	Beban Linier	Beban Non-Linier	Total <i>K-Factor Load Valve</i>
K1	100%	0%	1
K4	100%	50%	4
K13	100%	100%	13
K20	100%	125%	20
K30	100%	150%	30

Nilai *K-Factor* dihitung dari spektrum arus harmonisa beban. Rumus ini memberikan bobot yang lebih besar pada harmonisa orde tinggi karena rugi-rugi arus *eddy* meningkat secara eksponensial dengan frekuensi. Rumus perhitungannya adalah sebagai berikut [18]:

$$K = \frac{\sum_{h=1}^{\infty} h^2 i_h^2}{\sum_{h=1}^{\infty} i_h^2} \quad (2.12)$$

Keterangan:

K = *K-Factor*

I_h = Arus harmonisa pada orde ke- h (A)

h = Orde harmonisa

Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

Setelah nilai *K-Factor* dari beban dihitung, persentase penurunan kapasitas untuk transformator standar (K1) dapat diestimasi. Rumus yang digunakan adalah [18]:

$$D = \frac{1.15}{1 + (0.15 \times K)} \times 100 \quad (2.13)$$

Keterangan:

D = *Derating factor* (%)

K = *K-Factor*

Metode THDF (*Transformer Harmonic Derating Factor*)

Metode THDF, yang diperkenalkan oleh *Computer & Business Equipment Manufacturers Association* (CBEMA), merupakan pendekatan alternatif yang lebih praktis untuk mengevaluasi *derating* pada transformator yang sudah terpasang. THDF adalah sebuah faktor pengali yang digunakan untuk menentukan kapasitas daya baru dari sebuah transformator yang dibebani oleh arus non-sinusoidal [2]. Berbeda dengan *K-Factor* yang menganalisis spektrum harmonisa, metode ini berfokus pada distorsi bentuk gelombang arus secara keseluruhan. Prinsipnya adalah dengan membandingkan rasio antara nilai *RMS* dan nilai puncak dari arus yang terdistorsi dengan rasio pada gelombang sinusoidal murni. Gelombang yang sangat runcing akibat harmonisa akan memiliki nilai *THDF* yang lebih rendah.

Nilai *THDF* dihitung menggunakan persamaan berikut [2]:

$$THDF = \frac{\sqrt{2} \times I_{rms}}{I_{peak}} \times 100 \quad (2.14)$$

$$S_{derated} = THDF \times S_{rated} \quad (2.15)$$

Keterangan:

$THDF$ = *Transformer Harmonic Derating Factor* (%)

$S_{derated}$ = Kapasitas daya trafo setelah *derating* (kVA)

S_{rated} = Kapasitas daya awal trafo (kVA)

Hasil dari perhitungan *THDF* secara langsung menunjukkan kapasitas baru dari transformator.

2.5.2 Peningkatan Rugi-Rugi Daya Trafo (*Losses*)

Trafo dirancang untuk beroperasi dengan efisiensi maksimum dan rugi-rugi minimum pada frekuensi fundamental. Namun, adanya distorsi harmonisa yang terjadi pada beban yang disebabkan oleh beban non-linier, akan menyebabkan panas yang berlebih pada trafo. Pemanasan ini timbul akibat adanya peningkatan rugi-rugi daya pada transformator tersebut [14].

Untuk menghitung total rugi oleh beban (P_{LL}) yang diakibatkan oleh harmonisa, dapat digunakan persamaan dalam satuan per-unit (pu) sebagai berikut [14].

$$P_{LL}(pu) = \sum_{h>1}^{h=\infty} I_h^2 + \left(\left(\sum_{h>1}^{h=\infty} I_h^2 \times h^2 \right) \times P_{EC-R} \right) \quad (2.16)$$

Keterangan:

- $P_{LL}(pu)$ = *Losses* akibat beban harmonisa (pu)
- $\sum_{h>1}^{h=\infty} I_h^2$ = Komponen *losses* tembaga (pu)
- $(\sum_{h>1}^{h=\infty} I_h^2 \times h^2) P_{EC-R}$ = Komponen *losses eddy current* (pu)
- P_{EC-R} = Faktor *eddy current losses* (%)

Dimana nilai I_h dalam satuan per-unit (pu) diperoleh dengan persamaan [14]:

$$I_h(pu) = \frac{I_h}{I_1} \quad (2.17)$$

Keterangan:

- $I_h(pu)$ = Arus harmonisa pada orde ke- h (pu)
- I_h = Arus harmonisa pada orde ke- h (A)
- I_1 = Arus fundamental (A)

Dan nilai P_{EC-R} ditentukan pada tabel berikut.

Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
 a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.

2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

© Hak cipta milik UIN Suska Riau
 State Islamic University of Sultan Syarif Kasim Riau

Tabel 2.4 Nilai P_{EC-R} [14]

Type	MVA	Voltage	P_{EC-R} (%)
Dry	≤ 1		3 - 8
	$\geq 1,5$	5 kV HV	12 - 10
	$\leq 1,5$	15 kV HV	9 - 15
Oil-Filled	$\leq 2,5$	480 kV LV	1
	2,5 - 5	481 kV LV	1 - 5
	> 5	482 kV LV	9 - 15

Untuk mengonversi nilai P_{LL} dari satuan per-unit (pu) ke dalam satuan daya nyata (kW) terlebih dahulu diperlukan nilai daya aktif satu fasa ($P_{1\phi}$) dengan persamaan [20]:

$$P_{1\phi} = \frac{S \times \cos\phi}{3} \quad (2.18)$$

Keterangan:

$P_{1\phi}$ = Daya aktif 1 fasa (kW)

S = Kapasitas trafo (kVA)

$\cos\phi$ = Faktor daya

Setelah nilai $P_{1\phi}$ diketahui, nilai P_{LL} dalam kW dapat dihitung dengan [14]:

$$P_{LL}(kW) = P_{LL}(pu) \times P_{1\phi} \quad (2.19)$$

Keterangan:

$P_{LL}(kW)$ = Losses akibat beban harmonisa (kW)

$P_{LL}(pu)$ = Losses akibat beban harmonisa ($8pu$)

$P_{1\phi}$ = Daya aktif 1 fasa (kW)

Nilai losses tanpa beban (P_{NL}) diperoleh dari SPLN D3.002-1:2007 pada tabel berikut.

- Hak Cipta Diindungi Undang-Undang
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
 2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

Tabel 2.5 Losses Tanpa Beban [21]

Daya (kVA)	Losses Tanpa Beban (W)
1	2
25	75
50	125
100	210
160	300
200	355
250	420
315	500
400	595
500	700
630	835
800	1000
1000	1100
1250	1400
1600	1680
2000	1990
2500	2350

Sehingga total losses trafo dapat dihitung dengan persamaan berikut:

$$P_T = P_{LL} + P_{NL} \quad (2.20)$$

Keterangan:

P_T = Total losses trafo (kW)

P_{LL} = Losses akibat beban harmonisa (kW)

P_{NL} = Losses tanpa beban (kW)

2.5.3 Kerugian Biaya Akibat Losses Trafo

Peningkatan rugi-rugi daya pada transformator yang disebabkan oleh distorsi harmonisa bukan hanya sekedar masalah teknis yang menimbulkan panas berlebih dan *derating*. Peningkatan losses tersebut diukur dalam satuan kW yang merupakan energi listrik yang terbuang sia-sia. Energi yang terbuang ini tetap tercatat oleh alat ukur dan harus dibayar oleh konsumen, sehingga secara langsung menimbulkan kerugian finansial yang berkelanjutan.

Perhitungan untuk mengonversi total rugi-rugi daya (kW) menjadi total kerugian biaya (B_L) dalam Rupiah per tahun dapat menggunakan persamaan berikut [22]:

$$C_{Loss} = P_T \times t \times C_{kWh} \quad (2.21)$$

Keterangan:

- C_{Loss} Total biaya kerugian akibat *losses* trafo (Rp/Tahun)
- P_T Total *losses* daya trafo (*kW*)
- t Waktu operasional trafo dalam setahun (8760 Jam)
- C_{kWh} Tarif dasar listrik yang berlaku (Rp/*kWh*)

2.6 Filter Harmonisa

Filter harmonisa adalah sebuah rangkaian yang mampu untuk meredam harmonisa. Pada umumnya filter harmonisa dibagi menjadi dua jenis, yakni filter aktif dan filter pasif.

2.6.1 Filter Aktif

Filter aktif merupakan suatu rangkaian filter yang tersusun dari komponen elektronika daya atau komponen aktif seperti *Op-Amplifier*, IGBT (*Insulated Gate Bipolar Transistor*), serta MOSFET (*Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor*). Prinsip dasar dari filter aktif adalah menggunakan teknologi elektronika daya untuk menghasilkan komponen arus spesifik yang bertujuan untuk menghilangkan komponen arus harmonisa yang dihasilkan oleh beban non-linier. Filter aktif tidak berisiko menimbulkan resonansi dengan sistem dan kinerjanya tidak bergantung pada karakteristik impedansi sistem. Namun, dari segi biaya, komponen filter aktif ini jauh lebih mahal dibandingkan filter pasif dan memiliki sistem kontrol yang lebih kompleks [14].

2.6.2 Filter Pasif

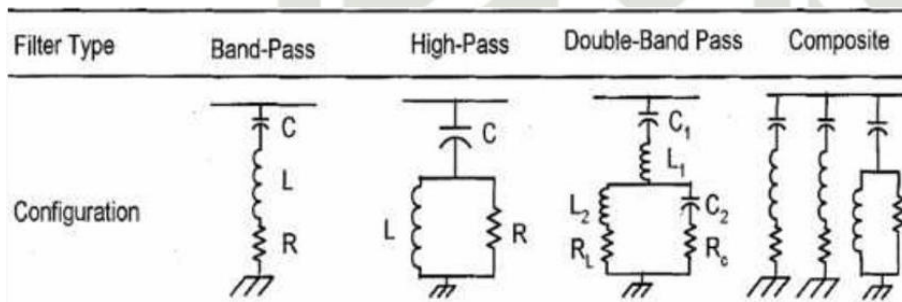
Filter pasif merupakan salah satu jenis filter yang paling populer dan umum digunakan dalam upaya mereduksi distorsi harmonisa pada sistem tenaga listrik. Implementasi filter pasif dianggap sebagai cara yang efektif dan ekonomis untuk mengatasi masalah harmonisa. Rangkaian filter ini tersusun dari komponen-komponen pasif, yaitu resistor (*R*), induktor (*L*), dan kapasitor (*C*) [9].

Prinsip kerja utama dari filter pasif adalah menyediakan sebuah jalur alternatif dengan impedansi yang sangat rendah untuk mengalihkan arus harmonisa yang tidak diinginkan agar tidak mengalir kembali ke sistem utama. Arus harmonisa yang memiliki frekuensi tinggi secara alami akan mengalir melalui kapasitor karena kapasitor memiliki impedansi yang

rendah pada frekuensi tinggi. Oleh karena itu, filter ini biasanya dipasang secara paralel dengan beban. Dengan demikian, arus harmonisa dari beban non-linier akan diredam oleh filter sehingga arus yang menuju sumber kembali mendekati bentuk sinusoidal [9].

Selain fungsi utamanya dalam meredam harmonisa, filter pasif memiliki keunggulan lain yang signifikan, yaitu kemampuannya untuk mengkompensasi daya reaktif. Adanya komponen kapasitor pada rangkaian filter secara otomatis juga berfungsi untuk memperbaiki faktor daya ($\cos \phi$) sistem secara keseluruhan. Keunggulan lainnya adalah desainnya yang relatif sederhana dan biayanya yang lebih murah dibandingkan dengan filter aktif [9].

Terdapat beberapa jenis konfigurasi filter pasif yang dapat digunakan, di antaranya adalah *single tuned passive filter (band pass)*, *high pass filter*, *double band pass filter*, dan *composite filter* [9].



Gambar 2.2 Konfigurasi Filter Pasif [23]

Filter pasif memiliki beberapa jenis konfigurasi yang dapat dimanfaatkan untuk meredam harmonisa. Pemilihan jenis filter disesuaikan dengan karakteristik spektrum harmonisa yang ingin diatasi [9].

Single tuned filter (filter band pass) adalah jenis yang paling umum digunakan, terutama pada sistem tegangan rendah. Filter ini dirancang untuk bekerja secara spesifik pada satu frekuensi kerja atau satu orde harmonisa dominan, dengan menyediakan impedansi yang sangat rendah pada frekuensi tersebut. *High pass filter* ini berfungsi untuk melewatkan harmonisa berfrekuensi tinggi dan meredam atau mengurangi amplitudo harmonisa pada frekuensi yang lebih rendah. Rangkaian umumnya terdiri dari kapasitor, resistor, dan induktor yang terhubung secara paralel. *Double band pass filter* ini memiliki karakteristik yang hampir sama dengan dua buah *single-tuned filter* yang digabungkan, di mana ia dirancang untuk bekerja efektif pada dua frekuensi kerja atau dua orde harmonisa yang berbeda secara simultan. *Composite filter* merupakan gabungan dari beberapa jenis filter.

Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang
 1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
 a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
 2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:

- a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
- b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.

2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

Sebagai contoh, sebuah *composite filter* bisa terdiri dari dua buah *single tuned filter* dan satu buah *high pass filter* yang bekerja bersamaan untuk meredam spektrum harmonisa yang lebih kompleks [9].

Di antara berbagai jenis filter pasif, *single tuned passive filter (filter band pass)* dipilih sebagai solusi yang paling tepat untuk studi kasus ini. Filter jenis ini dirancang untuk bekerja secara spesifik pada satu frekuensi kerja atau satu orde harmonisa dominan, dengan menyediakan impedansi yang sangat rendah pada frekuensi tersebut [9].

2.7 Perancangan Single Tuned Passive Filter

Perancangan *single tuned passive filter* adalah proses menentukan spesifikasi teknis dari komponen-komponen pasif yaitu kapasitor (C), induktor (L), dan resistor (R) agar filter tersebut dapat meredam arus harmonisa pada satu frekuensi target secara efektif. Langkah-langkah perancangan umumnya adalah sebagai berikut:

1. Menentukan kebutuhan daya reaktif kompensasi ($Q_{C1\phi}$)

Langkah pertama dalam perancangan filter adalah menentukan besarnya kebutuhan daya reaktif yang akan dikompensasi oleh filter. Selain berfungsi meredam harmonisa, filter pasif juga secara inheren berfungsi untuk memperbaiki faktor daya sistem. Besarnya daya reaktif kompensasi dihitung dengan menggunakan persamaan berikut [14]:

$$Q_{C1\phi} = P_{1\phi}(\tan \phi_1 - \tan \phi_2) \quad (2.22)$$

Keterangan:

$Q_{C1\phi}$ = Daya reaktif kompensasi yang dibutuhkan 1 fasa ($kVAR$)

$P_{1\phi}$ = Rata-rata daya aktif 1 fasa (kW)

ϕ_1 = Rata-rata sudut faktor daya awal 1 fasa

ϕ_2 = Sudut faktor daya target

Menghitung nilai kapasitor

Setelah nilai kebutuhan daya reaktif kompensasi (Q_C) diketahui, langkah kedua adalah menghitung nilai reaktansi kapasitif (X_C) dan kapasitansi (C). Tahap pertama yakni menghitung nilai X_C dengan persamaan [14]:

Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

$$X_C = \frac{V_{LN}^2}{Q_{C1\phi}} \quad (2.23)$$

Keterangan:

X_C = Reaktansi kapasitif per fasa (Ω)

V_{LN} = Tegangan *line to neutral* (V)

$Q_{C1\phi}$ = Daya reaktif kompensasi yang dibutuhkan per fasa (VAR)

Kemudian tahap kedua, yakni menghitung nilai C dengan persamaan [14]:

$$C = \frac{1}{2\pi f X_C} \quad (2.24)$$

Keterangan:

C = Kapasitansi (F)

f = Frekuensi fundamental (Hz)

X_C = Reaktansi kapasitif (Ω)

3. Menghitung nilai induktor

Setelah nilai kapasitor diketahui, langkah ketiga adalah menghitung nilai reaktansi induktif (X_L) dan induktansi (L). Tahap pertama, yakni menghitung nilai X_L agar beresonansi dengan nilai X_C pada target orde harmonisa yang akan dituning (h_n) dengan persamaan [14]:

$$X_L = \frac{X_C}{h_n^2} \quad (2.25)$$

Keterangan:

X_L = Reaktansi induktif (Ω)

X_C = Reaktansi kapasitif (Ω)

h_n = Orde harmonisa yang akan dituning

Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

Agar filter bekerja secara efektif dan aman, nilai h_n yang akan dituning harus diatur sedikit lebih rendah dari orde harmonisa target yakni sebesar 5% untuk mencegah risiko resonansi dengan impedansi sistem [9]. Kemudian tahap kedua, yakni menghitung nilai L dengan persamaan [14]:

$$L = \frac{X_L}{2\pi f} \quad (2.26)$$

Keterangan:

- L = Induktansi (H)
- X_L = Reaktansi induktif (Ω)
- f = Frekuensi fundamental (Hz)

4. Menghitung nilai resistor (R)

Langkah terakhir dalam perancangan filter adalah menghitung nilai resistor (R). Untuk menghitung nilai R perlu diketahui nilai reaktansi pada target orde harmonisa yang akan dituning (X_n) dengan persamaan [14]:

$$X_n = n \times X_L \quad (2.27)$$

Keterangan:

- X_n = Reaktansi pada target orde harmonisa yang dituning (Ω)
- n = Orde harmonisa yang menjadi target
- X_L = Reaktansi induktif (Ω)

Yakni dengan cara orde harmonisa dominan yang menjadi target dituning (n) dikali dengan reaktansi induktif (X_L). Untuk menghitung nilai R juga perlu diketahui nilai faktor kualitas (Q). Nilai Q yang lebih tinggi menghasilkan kualitas filter yang lebih baik. Namun umumnya, nilai Q yang sering digunakan berkisar antara rentang nilai 40 hingga 80. Nilai R dihitung dengan persamaan berikut [14]:

$$R = \frac{X_n}{Q} \quad (2.28)$$

Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:

- a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
- b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.

2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

Keterangan:

R = Resistansi filter (Ω)

X_n = Reaktansi pada orde harmonisa dominan yang dituning (Ω)

Q = Faktor kualitas filter

2.8 Analisis Efektivitas Filter

Analisis efektivitas filter merupakan tahapan evaluasi yang dilakukan setelah menentukan spesifikasi komponen filter yang telah dirancang. Tujuan dari analisis ini adalah untuk memastikan bahwa filter yang dirancang sudah memenuhi standar dan efektif dalam meredam harmonisa.

2.8.1 Perhitungan Batasan Operasional Komponen Filter

Tahapan ini bertujuan untuk memastikan bahwa spesifikasi filter yang telah dirancang dapat beroperasi dengan aman dan tidak akan mengalami kegagalan akibat beban arus atau tegangan yang berlebih. Analisis ini dilakukan dengan menghitung total beban kerja yang akan diterima komponen filter. Total beban kerja filter yang akan dihitung terdiri dari komponen fundamental dan komponen harmonisa [14].

Untuk menghitung total beban kerja filter ini dibagi menjadi 3 tahapan, yakni:

1. Analisis kerja fundamental filter

Tahap ini menghitung beban kerja yang diterima filter hanya dari frekuensi fundamental sistem [14].

a. Impedansi fundamental (Z_{fund})

$$Z_{fund} = |X_L - X_C| \quad (2.29)$$

Keterangan:

Z_{fund} = Impedansi filter pada frekuensi fundamental (Ω)

X_L = Reaktansi induktif (Ω)

X_C = Reaktansi kapasitif (Ω)

Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

- b. Arus fundamental (I_{fund})

$$I_{fund} = \frac{V_{LN}}{Z_{fund}} \quad (2.30)$$

Keterangan:

I_{fund} = Arus fundamental yang mengalir ke filter (A)

V_{LN} = Tegangan *line to neutral* (V)

Z_{fund} = Impedansi fundamental (Ω)

- c. Tegangan kapasitor (V_C)

$$V_C = I_{fund} \times X_C \quad (2.31)$$

Keterangan:

V_C = Tegangan fundamental kapasitor (V)

I_{fund} = Arus fundamental yang mengalir ke filter (A)

X_C = Reaktansi kapasitif (Ω)

- d. Daya reaktif kapasitor fundamental (Q_{fund})

$$Q_{fund} = V_C \times I_{fund} \quad (2.32)$$

Keterangan:

Q_{fund} = Daya reaktif kapasitor pada frekuensi fundamental (VAR)

V_C = Tegangan fundamental kapasitor (V)

I_{fund} = Arus fundamental yang mengalir ke filter (A)

Analisis kerja filter pada harmonisa

Tahap ini menghitung beban kerja tambahan yang diterima filter dari seluruh komponen arus harmonisa [14].

Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:

- a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
- b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.

2. Dilarang mengemukakan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

a. Total arus harmonisa pada filter (I_h)

$$I_h = \sum_{h>1}^{h=\infty} I_h \times \frac{Q_{1\phi}}{V_{LN}} \quad (2.33)$$

Keterangan:

I_h = Arus harmonisa total yang mengalir ke filter (A)

$\sum_{h>1}^{h=\infty} I_h$ = Total arus harmonisa (pu)

$Q_{1\phi}$ = Rata-rata daya reaktif 1 fasa (VAR)

V_{LN} = Tegangan *line to neutral* (V)

b. Tegangan harmonisa kapasitor (V_{ch})

$$V_{ch} = I_h \times \frac{X_C}{h} \quad (2.34)$$

Keterangan:

V_{ch} = Tegangan harmonisa kapasitor (V)

I_h = Arus harmonisa total yang mengalir ke filter (A)

X_C = Reaktansi kapasitif (Ω)

h = Orde harmonisa dominan target filter

c. Perhitungan total kerja filter (validasi batasan operasional)

Tahap ini menggabungkan hasil perhitungan fundamental dan harmonisa untuk mendapatkan beban kerja total pada komponen filter [14].

a. Arus *RMS* total (I_{rms})

$$I_{rms} = \sqrt{I_{fund}^2 + I_h^2} \quad (2.35)$$

Keterangan:

I_{rms} = Arus *RMS* total yang mengalir ke filter (A)

I_{fund} = Arus fundamental yang mengalir ke filter (A)

Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

I_h = Arus harmonisa total yang mengalir ke filter (A)

b. Tegangan puncak (V_p)

$$V_p = V_C + V_{ch} \quad (2.36)$$

Keterangan:

V_p = Tegangan puncak (V)

V_C = Tegangan kapasitor (V)

V_{ch} = Tegangan harmonisa kapasitor (V)

c. Tegangan *RMS* total (V_{rms})

$$V_{rms} = \sqrt{V_C^2 + V_{ch}^2} \quad (2.37)$$

Keterangan:

V_{rms} = Tegangan *RMS* total (V)

V_C = Tegangan kapasitor (V)

V_{ch} = Tegangan harmonisa kapasitor (V)

d. Daya reaktif kapasitor total ($Q_{C\ Total}$)

$$Q_{C\ Total} = I_{rms} \times V_{rms} \quad (2.38)$$

Keterangan:

$Q_{C\ Total}$ = Daya reaktif kapasitor total ($kVAR$)

I_{rms} = Arus *RMS* total (A)

V_{rms} = Tegangan *RMS* total (V)

Nilai-nilai dari perhitungan total kerja filter ini yang kemudian dibandingkan dengan batasan standar ANSI/IEEE 18-1992 untuk memastikan desain filter dinyatakan layak dan aman untuk dioperasikan yang ditampilkan pada Tabel 2.6 berikut.

Tabel 2.6 Standar Batasan Kerja Filter [14]

Kerja	Definisi	Batasan (%)
Tegangan Puncak	V / V_{rated}	120
Tegangan RMS	V_{rms} / V_{rated}	110
Arus RMS	I_{rms} / I_{fund}	180
VAR	VAR_{Total} / VAR_{fund}	135

2.8.2 Kalkulasi Penurunan Arus Harmonisa Pasca Dfilter

Setelah spesifikasi komponen filter dirancang dan unjuk kerjanya divalidasi, langkah selanjutnya adalah menghitung kemampuan filter tersebut dalam mereduksi arus harmonisa. Perhitungan ini bertujuan untuk mengetahui besar nilai arus harmonisa baru ($I_{h(new)}$) yang akan mengalir ke sistem setelah filter dipasang.

Langkah-langkah perhitungan untuk mendapatkan nilai arus harmonisa baru adalah sebagai berikut:

1. Menghitung impedansi, reaktansi, dan resistansi hubung singkat sistem (Z_{SC})
 - a. Persamaan impedansi hubung singkat sistem (Z_{SC}) [14]:

$$Z_{SC} = \frac{V_{LL}}{\sqrt{3} \times I_{SC}} \quad (2.39)$$

Keterangan:

Z_{SC} = Impedansi hubung singkat sistem (Ω)

V_{LL} = Tegangan *line to line* trafo sisi sekunder (V)

I_{SC} = Arus hubung singkat maksimum di PCC (A)

- b. Persamaan reaktansi hubung singkat sistem (X_{SC}) [14]:

$$X_{SC} = X_{SCT} = \frac{Z}{100} \times \frac{V_{LL}^2}{S} \quad (2.40)$$

Keterangan:

X_{SC} = Reaktansi hubung singkat sistem (Ω)

X_{SCT} = Reaktansi hubung singkat trafo dengan asumsi nilai reaktansi adalah impedansi trafo (Ω)

Z = Impedansi trafo (%)

Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

V_{LL} = Tegangan *line to line* sisi sekunder trafo (kV)
 S = Kapasitas trafo (MVA)

- c. Persamaan resistansi hubung singkat sistem ($R_{SC(l)}$) [14]:

$$R_{SC(1)} = \sqrt{Z_{SC}^2 - X_{SCT}^2} \quad (2.41)$$

Keterangan:

$R_{SC(l)}$ = Resistansi hubung singkat sistem fundamental (Ω)
 Z_{SC} = Impedansi hubung singkat sistem (Ω)
 X_{SCT} = Reaktansi hubung singkat trafo dengan asumsi nilai reaktansi adalah impedansi transformator (Ω)

2. Menghitung impedansi pada orde harmonisa dominan (h)
 - a. Persamaan reaktansi L dan C filter pada orde ke- h [14]:

$$X_{L(h)} = h \times X_{L(1)} \quad (2.42)$$

Keterangan:

$X_{L(h)}$ = Reaktansi induktif pada orde harmonisa ke- h (Ω)
 h = Orde harmonisa dominan
 $X_{L(1)}$ = Reaktansi induktif fundamental (Ω)

$$X_{C(h)} = \frac{X_{C(1)}}{h} \quad (2.43)$$

Keterangan:

$X_{C(h)}$ = Reaktansi kapasitif pada orde harmonisa ke- h (Ω)
 $X_{C(1)}$ = Reaktansi kapasitif fundamental (Ω)
 h = Orde harmonisa dominan

Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:

- a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
- b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.

2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

b. Persamaan resistensi dan reaktansi sistem pada orde ke- h [24]:

Untuk nilai resistansi hubung singkat pada orde harmonisa ke- h diasumsikan sama dengan nilai resistansi hubung singkat fundamental, dengan persamaan:

$$R_{SC(1)} = R_{SC(h)} \quad (2.44)$$

Keterangan:

$R_{SC(1)}$ = Resistansi hubung singkat sistem fundamental (Ω)

$R_{SC(h)}$ = Resistansi hubung singkat sistem pada orde harmonisa ke- h (Ω)

$$X_{SC(h)} = h \times X_{SC(1)} \quad (2.45)$$

Keterangan:

$X_{SC(h)}$ = Reaktansi hubung singkat sistem pada orde ke- h (Ω)

h = Orde harmonisa dominan

$X_{SC(1)}$ = Reaktansi hubung singkat sistem fundamental (Ω)

c. Persamaan impedansi total sistem pada orde ke- h [24]:

$$Z_{SC(h)} = \sqrt{R_{SC(h)}^2 + X_{SC(h)}^2} \quad (2.46)$$

Keterangan:

$Z_{SC(h)}$ = Impedansi hubung singkat sistem pada orde ke- h (Ω)

$R_{SC(h)}$ = Resistansi hubung singkat sistem pada orde harmonisa ke- h (Ω)

$X_{SC(h)}$ = Reaktansi hubung singkat sistem pada orde ke- h (Ω)

d. Menghitung arus harmonisa baru ($I_{h(new)}$)

a. Persamaan arus yang diredam filter ($I_{f(h)}$) [24]:

$$I_{f(h)} = \frac{Z_{SC(h)}}{Z_{SC(h)} + |X_{L(h)} - X_{C(h)}|} \times I_h \quad (2.47)$$

Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

Keterangan:

$I_{f(h)}$ = Arus harmonisa pada orde ke- h yang difilter (A)

Z_{SC} = Impedansi hubung singkat sistem (Ω)

$X_{L(h)}$ = Reaktansi induktif pada orde harmonisa ke- h (Ω)

$X_{C(h)}$ = Reaktansi kapasitif pada orde harmonisa ke- h (Ω)

I_h = Arus harmonisa pada orde ke- h (A)

- b. Persamaan arus harmonisa baru pada orde ke- h setelah difilter [24]:

$$I_{h(new)} = I_h - I_{f(h)} \quad (2.48)$$

Keterangan:

$I_{h(new)}$ = Arus harmonisa baru pada orde ke- h setelah difilter (A)

I_h = Arus harmonisa orde ke- h sebelum filter (A)

$I_{f(h)}$ = Arus harmonisa pada orde ke- h yang difilter (A)

Nilai $I_{h(new)}$ inilah yang kemudian digunakan untuk menghitung ulang nilai IHD , THD_v , TDD , $derating$, dan $losses$ trafo yang baru untuk mengevaluasi efektivitas total dari filter yang dirancang.

2.8.3 Menghitung Rugi-Rugi Penyerapan Daya Oleh Filter

Setelah filter dirancang, perlu diketahui besarnya rugi-rugi daya yang diakibatkan oleh penyerapan daya oleh filter itu sendiri. Meskipun filter pasif dirancang untuk meredam harmonisa, filter tersebut juga merupakan sebuah beban yang terhubung ke sistem dan akan mengonsumsi daya [25]. Langkah-langkah untuk menghitung rugi-rugi daya yang diserap oleh filter adalah sebagai berikut [25]:

1. Menghitung daya aktif yang diserap filter (P)

$$P = I_{fund}^2 \times R \quad (2.49)$$

Keterangan:

P = Daya aktif yang diserap filter (W)

I_{fund} = Arus fundamental filter (A)

Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

R = Resistansi filter (Ω)

Menghitung daya reaktif filter (Q)

$$Q = I_{fund}^2 \times Z_{fund} \quad (2.50)$$

Keterangan:

Q = Daya reaktif filter (VAR)

I_{fund} = Arus fundamental filter (A)

Z_{fund} = Impedansi filter pada frekuensi fundamental (Ω)

Menghitung daya semu filter (S)

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad (2.51)$$

Keterangan:

S = Daya semu filter (kVA)

P = Daya aktif yang diserap filter (kW)

Q = Daya reaktif filter ($kVAR$)

Menghitung faktor daya filter ($\cos\phi$)

$$\cos\phi = \frac{P}{S} \quad (2.52)$$

Keterangan:

$\cos\phi$ = Faktor daya filter

P = Daya aktif yang diserap filter (kW)

S = Daya semu filter (kVA)

Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

Menghitung nilai *losses* akibat pemasangan filter (P_{loss})

$$P_{loss} = \left(\sqrt{(Q - Q_{C1\phi})^2 + P^2} \right) \times \cos \phi \quad (2.53)$$

Keterangan:

P_{loss} = Rugi-rugi daya akibat pemasangan filter (kW)

Q = Daya reaktif filter ($kVAR$)

$Q_{C1\phi}$ = Daya reaktif kompensasi yang dibutuhkan per fasa ($kVAR$)

P = Daya aktif yang diserap filter (kW)

$\cos \phi$ = Faktor daya

BAB III

METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Jenis Penelitian

Jenis penelitian yang digunakan dalam penyusunan tugas akhir ini dikategorikan sebagai penelitian kuantitatif dengan pendekatan deskriptif komparatif dan eksperimental melalui simulasi. Pendekatan kuantitatif dipilih sebagai landasan utama karena fokus penelitian ini bertumpu pada pengolahan data numerik yang terukur secara objektif. Penerapan pendekatan ini dimulai dari tahap pengumpulan data primer di lapangan, yang mencakup pengukuran parameter listrik seperti tegangan, arus, dan daya untuk mendapatkan nilai $THDv$ dan TDD . Data terukur tersebut kemudian diolah secara matematis untuk menghitung nilai K -Factor dan THDF, menentukan persentase penurunan kapasitas transformator 1000 kVA berdasarkan kondisi beban tahun 2025, menghitung besar rugi-rugi daya, serta menghitung estimasi kerugian biaya tahunan akibat harmonisa. Selain itu, perhitungan kuantitatif juga diterapkan dalam merancang spesifikasi teknis komponen R , L , dan C pada desain filter pasif.

Selanjutnya, penelitian ini menggunakan pendekatan deskriptif komparatif untuk menganalisis dan membandingkan data hasil perhitungan *derating* dengan membandingkan dua metode yang berbeda, yaitu metode K -Factor dan metode THDF pada satu set data pengukuran yang sama. Selain itu, pendekatan ini digunakan untuk mengevaluasi perbandingan performa teknis dan ekonomis transformator mencakup parameter TDD , *derating*, dan *losses* antara kondisi sebelum dan sesudah pemasangan filter, serta mengevaluasi kesesuaian data pengukuran beban tahun 2025 terhadap batasan standar IEEE 519-1992 dan membandingkannya dengan tren kondisi historis. Terakhir, penelitian ini mendapatkan pendekatan simulasi menggunakan perangkat lunak ETAP sebagai metode validasi eksperimental untuk menguji keandalan rancangan filter pasif sebelum diterapkan, guna memastikan efektivitas penurunan harmonisa sesuai dengan target yang ditetapkan.

3.2 Lokasi Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan di lingkungan UIN Sultan Syarif Kasim Riau, dengan fokus pengamatan pada unit transformator distribusi utama berkapasitas 1000 kVA . Transformator ini memegang peranan vital dalam sistem kelistrikan kampus karena melayani beban-beban strategis, meliputi gedung rektorat, berbagai gedung fakultas, hingga

asrama mahasiswa. Penelitian yang dilaksanakan pada tahun 2025 ini merupakan langkah investigasi ulang untuk mengevaluasi kondisi kualitas daya terkini pasca penggantian unit transformator.

Pemilihan lokasi ini didasarkan pada justifikasi kuat terkait riwayat kerusakan fatal pada transformator lama di titik yang sama pada tahun 2023, yang mengharuskan penggantian dengan unit baru. Kerusakan tersebut terindikasi kuat disebabkan oleh pembebanan berlebih akibat tingginya distorsi harmonisa yang melampaui batas aman, sebagaimana telah dikaji dalam penelitian terdahulu. Mengingat karakteristik beban kampus yang dinamis, penelitian ini bertujuan untuk memverifikasi apakah permasalahan distorsi harmonisa tersebut masih berlanjut pada unit transformator yang baru.

3.3 Studi Literatur

Pada tahap studi literatur, dilakukan pengumpulan, penelaahan, dan analisis terhadap berbagai referensi penelitian sebelumnya. Sumber-sumber rujukan meliputi buku teks, artikel jurnal ilmiah nasional dan internasional, prosiding seminar, dokumen standar IEEE, serta laporan tugas akhir terdahulu yang relevan dengan topik penelitian.

Kajian pustaka ini bertujuan untuk membangun landasan teori serta untuk mengidentifikasi *research gap* yang belum dilakukan oleh studi sebelumnya. Fokus utama dari studi literatur ini adalah untuk memahami teori-teori dasar mengenai kualitas daya, standar harmonisa IEEE 519-1992, analisis dampak harmonisa terhadap rugi-rugi daya, serta studi komparatif metode penurunan kapasitas transformator antara *K-Factor* dan *THDF*. Selain itu, penelitian ini juga fokus pada metodologi perancangan *single tuned passive filter* dan teknik simulasi sistem tenaga menggunakan perangkat lunak ETAP untuk validasi hasil.

3.4 Tahapan Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan melalui beberapa tahapan yang sistematis untuk memastikan tercapainya tujuan penelitian. Alur kerja penelitian ini dapat digambarkan dalam sebuah diagram alir dan dijabarkan sebagai berikut.

Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:

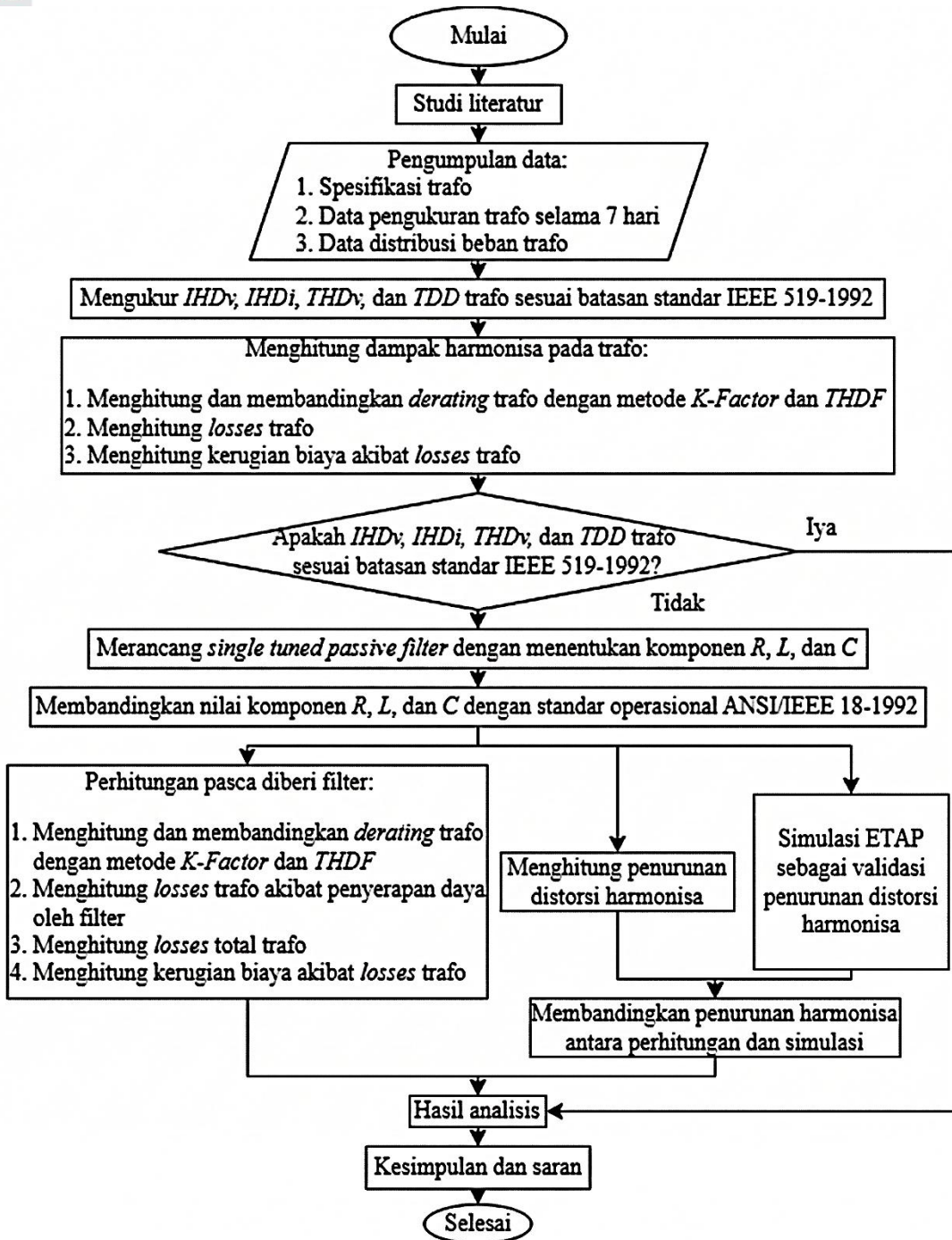
- a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
- b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.

2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.



Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.



Gambar 3.1 Alur Tahapan Penelitian

3.4.1 Pengumpulan Data

Tahap pengumpulan data merupakan langkah fundamental dalam penelitian ini yang bertujuan untuk mendapatkan informasi yang kemudian akan dianalisis kondisi eksisting dan perancangan sebagai solusi mitigasi. Data-data yang dikumpulkan dalam penelitian ini mencakup data spesifikasi trafo, data pengukuran trafo, serta data distribusi beban dan konfigurasi jaringan trafo.

Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

Data spesifikasi trafo

Merek	: B&D
Kapasitas daya	: 1000 <i>kVA</i>
Tegangan primer	: 20 <i>kV</i>
Tegangan sekunder	: 0.4 <i>kV</i>
Frekuensi	: 50 <i>Hz</i>
Impedansi	: 5%
<i>K-Factor ratings</i>	: K1
Pendingin	: ONAN



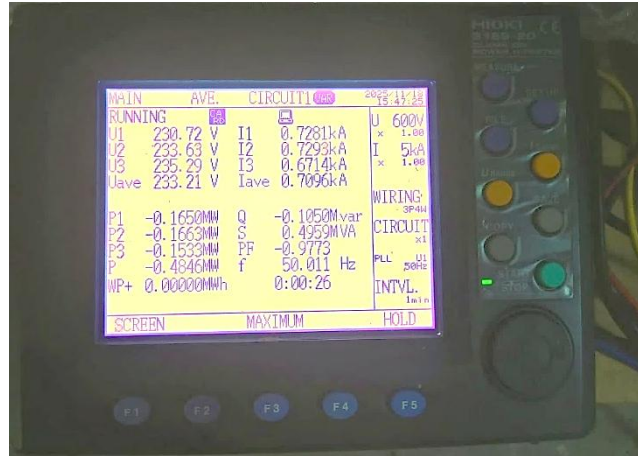
Gambar 3.2 Transformator 1000 *kVA* UIN Sultan Syarif Kasim Riau
(Sumber: Foto Langsung)

Data pengukuran trafo

Proses perekaman data pengukuran trafo berlangsung selama tujuh hari, dimulai pada tanggal 17 November 2025 hingga 24 November 2025.

Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.



Gambar 3.3 Power Quality Analyzer
(Sumber: Foto Langsung)

Proses perekaman data pengukuran trafo menggunakan alat *power quality analyzer* merek *Hioki 3169-20 Clamp On Power HiTester*.



Gambar 3.4 Panel LVMDP
(Sumber: Foto Langsung)

Data ini diperoleh melalui pengukuran secara langsung pada *PCC* yakni keluaran sisi tegangan rendah trafo, tepatnya di panel LVMDP. Parameter-parameter yang dicatat meliputi tegangan (V), arus (I), daya semu (kVA), daya aktif (kW), daya

reaktif ($kVAR$), faktor daya (PF), dan spektrum lengkap distorsi harmonisa tegangan dan arus.

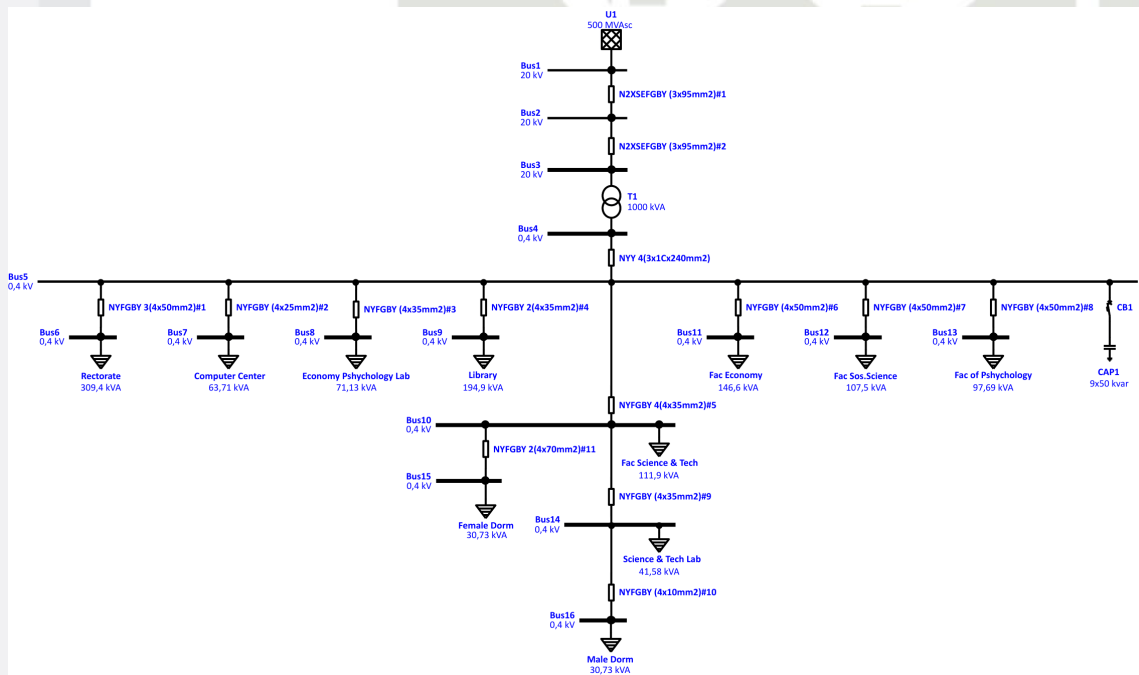
Data distribusi beban dan konfigurasi jaringan trafo

Informasi ini berupa data daya per gedung yang diperoleh dari *as built drawing* dari sistem kelistrikan gardu UIN Sultan Syarif Kasim Riau.

Tabel 3.1 Data Daya Gedung

Gedung	Daya Gedung (kVA)
Rectorate	309,4
Computer Center	63,71
Economy Pshychology	71,13
Library	194,9
Fac. Economy	110,8
Fac. Sos. Science	107,5
Fac. of Pshychology	97,69
Fac. Science & Tech	111,9
Science & Tech Lab	41,58
Male Dorm	30,73
Female Dorm	30,73

Dan *single line diagram* (SLD) yang diperoleh dari *as built drawing* dari sistem kelistrikan gardu UIN Sultan Syarif Kasim Riau.



Gambar 3.5 SLD UIN Sultan Syarif Kasim Riau

Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

(Sumber: *As Built Drawing* UIN Sultan Syarif Kasim Riau)

Data ini dibutuhkan untuk memahami topologi jaringan serta bagaimana beban-beban terdistribusi dan disuplai oleh transformator 1000 *kVA*. Informasi ini juga akan menjadi dasar dalam membangun model sistem untuk keperluan validasi dengan simulasi menggunakan perangkat lunak ETAP.

3.4.2 Penentuan Batasan Standar Distorsi Harmonisa

Tahapan ini bertujuan menetapkan ambang batas distorsi harmonisa arus dan tegangan yang diizinkan untuk trafo 1000 *kVA* di UIN Sultan Syarif Kasim Riau dengan mengacu pada standar IEEE 519-1992. Langkah-langkah penentuannya adalah sebagai berikut.

1. Batasan distorsi tegangan
Ditentukan langsung berdasarkan level tegangan operasi sistem di *PCC* sesuai dengan kriteria pada Tabel 2.1.
2. Batasan distorsi arus
Untuk menentukan kategori batasan arus yang berlaku pada Tabel 2.2, dilakukan perhitungan rasio hubung singkat (SC_{ratio}) melalui urutan rumus berikut.
 - a. Menghitung arus beban penuh trafo (I_{FL}) menggunakan Persamaan 2.8.
 - b. Menghitung arus hubung singkat maksimum di *PCC* (I_{SC}) menggunakan Persamaan 2.7.
 - c. Menghitung arus beban permintaan maksimum (I_L) menggunakan Persamaan 2.9.
 - d. Menentukan nilai SC_{ratio} dengan membagi I_{SC} terhadap I_L sesuai Persamaan 2.6.

3.4.3 Perhitungan Derating Trafo

Pada tahap ini dilakukan analisis dampak harmonisa terhadap kapasitas trafo 1000 *kVA* menggunakan data pengukuran beban tahun 2025. Penurunan kapasitas (*derating*) dihitung dan dibandingkan menggunakan dua metode utama untuk mendapatkan evaluasi yang komprehensif.

1. Metode *K-Factor*:
 - a. Langkah awal adalah menghitung nilai *K-Factor* beban berdasarkan spektrum arus harmonisa menggunakan Persamaan 2.12.

Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:

- a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
- b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.

2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

- b. Selanjutnya, menentukan nilai persentase faktor penurunan kapasitas (*derating factor*) menggunakan Persamaan 2.13.
 - c. Hasil ini digunakan untuk menentukan sisa kapasitas aman trafo standar (K1) dalam melayani beban non-linier.
2. Metode *THDF*:
- a. Menghitung nilai *THDF* dengan membandingkan nilai arus *RMS* dan arus puncak sesuai dengan Persamaan 2.14.
 - b. Menentukan kapasitas daya baru transformator ($S_{derated}$) dalam satuan *kVA* menggunakan Persamaan 2.15.

Hasil perhitungan dari kedua metode tersebut kemudian dibandingkan untuk menganalisis sisa kapasitas aman transformator.

3.4.4 Perhitungan *Losses* Trafo

Tahapan ini dilakukan untuk menghitung peningkatan rugi-rugi daya (*losses*) pada trafo 1000 *kVA* yang diakibatkan oleh pengaruh arus harmonisa. Langkah-langkah perhitungan dilakukan sebagai berikut.

1. Menentukan daya aktif satu fasa ($P_{1\phi}$)

Sebelum menghitung nilai kerugian, ditentukan terlebih dahulu nilai daya dasar aktif per fasa menggunakan Persamaan 2.18.

2. Menghitung arus harmonisa per-unit ($I_h (pu)$)

Mengonversi nilai arus harmonisa dari satuan *Ampere* ke satuan per-unit (*pu*) menggunakan Persamaan 2.17.

3. Menentukan faktor rugi arus eddy (P_{EC-R})

Menentukan nilai koefisien rugi arus eddy berdasarkan jenis transformator dan kapasitasnya mengacu pada Tabel 2.4.

4. Menghitung rugi beban harmonisa (P_{LL}):

- a. Perhitungan rugi beban dalam satuan per-unit (*pu*) dilakukan menggunakan Persamaan 2.16.

- b. Mengonversi hasil $P_{LL}(pu)$ ke satuan *kW* menggunakan Persamaan 2.19.

5. Menentukan rugi tanpa beban (P_{NL})

Mengambil nilai standar rugi inti besi untuk trafo 1000 *kVA* berdasarkan spesifikasi teknis pada Tabel 2.5.

Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:

- a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
- b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.

2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

1. Menghitung total losses trafo (P_T)
Menjumlahkan nilai rugi beban akibat harmonisa (P_{LL}) dengan rugi tanpa beban (P_{NL}) menggunakan Persamaan 2.20.

3.4.5 Perhitungan Kerugian Biaya Akibat *Losses* Trafo

Tahapan ini bertujuan untuk mengonversi kerugian daya secara teknis menjadi dampak finansial dalam Rupiah per tahun. Total kerugian biaya akibat *losses* trafo dihitung dengan langkah-langkah sebagai berikut.

1. Menentukan waktu operasional (t)
Menggunakan asumsi waktu operasional transformator secara kontinu selama satu tahun penuh, yaitu 8.760 jam.
2. Menentukan tarif dasar listrik (C_{kWh})
Mengambil data tarif tenaga listrik PT. PLN (Persero) terbaru yang berlaku untuk golongan tarif S-2/TM sesuai dengan lokasi penelitian.
3. Kalkulasi total biaya kerugian (C_{Loss})
Menghitung total biaya tahunan dengan mengalikan total *losses* trafo (P_T), waktu operasional (t), dan tarif listrik (C_{kWh}) menggunakan Persamaan 2.21.

Hasil perhitungan ini akan memberikan gambaran mengenai besarnya pemborosan biaya operasional akibat adanya distorsi harmonisa sebelum dilakukan upaya mitigasi.

3.4.6 Perancangan *Single Tuned Passive Filter*

Tahapan ini berfokus pada penentuan spesifikasi teknis komponen filter untuk mereduksi harmonisa pada orde target yang paling dominan. Perancangan dilakukan secara teoritis berdasarkan data pengukuran tahun 2025 dengan urutan sebagai berikut.

1. Menentukan kebutuhan daya reaktif kompensasi ($Q_{C1\phi}$)
Menghitung besarnya daya reaktif yang dibutuhkan untuk memperbaiki faktor daya sistem dari kondisi awal ke target tertentu menggunakan Persamaan 2.22.
2. Menghitung nilai kapasitor (C):
 - a. Menghitung reaktansi kapasitif (X_C) per fasa menggunakan Persamaan 2.23.
 - b. Menentukan nilai kapasitansi (C) dalam satuan *Farad* menggunakan Persamaan 2.24.

Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

3. Menghitung nilai induktor (L):
 - a. Menghitung reaktansi induktif (X_L) agar terjadi resonansi pada orde harmonisa yang dituning (h_n) menggunakan Persamaan 2.25.
 - b. Untuk keamanan, nilai h_n diatur sedikit lebih rendah (5%) dari orde target untuk mencegah resonansi dengan impedansi sistem.
 - c. Menentukan nilai induktansi (L) dalam satuan *Henry* menggunakan Persamaan 2.26.
4. Menghitung nilai resistor (R):
 - a. Menghitung reaktansi pada target orde harmonisa yang ditala (X_n) menggunakan Persamaan 2.27.
 - b. Menentukan nilai resistansi (R) berdasarkan faktor kualitas filter (Q) yang dipilih menggunakan Persamaan 2.28.

3.4.7 Perhitungan Batasan Operasional Komponen Filter

Tahapan ini bertujuan untuk memvalidasi apakah spesifikasi komponen filter R , L , dan C yang telah dirancang dapat beroperasi dengan aman sesuai standar teknis. Validasi dilakukan dengan menghitung beban kerja total pada komponen dan membandingkannya dengan batasan standar ANSI/IEEE 18-1992. Langkah-langkahnya adalah sebagai berikut.

1. Analisis kerja fundamental filter
 - a. Menghitung impedansi fundamental (Z_{fund}) menggunakan Persamaan 2.29.
 - b. Menghitung arus fundamental (I_{fund}) menggunakan Persamaan 2.30.
 - c. Menghitung tegangan kapasitor (V_c) menggunakan Persamaan 2.31.
 - d. Menghitung daya reaktif kapasitor fundamental (Q_{fund}) menggunakan Persamaan 2.32.
2. Analisis kerja filter pada harmonisa
 - a. Menghitung total arus harmonisa pada filter (I_h) menggunakan Persamaan 2.33.
 - b. Menghitung tegangan harmonisa kapasitor (V_{ch}) menggunakan Persamaan 2.34.
3. Perhitungan total kerja filter dan validasi
 - a. Menghitung arus *RMS* total (I_{rms}) menggunakan Persamaan 2.35.
 - b. Menghitung tegangan puncak (V_p) menggunakan Persamaan 2.36.
 - c. Menghitung tegangan *RMS* total (V_{rms}) menggunakan Persamaan 2.37.
 - d. Menghitung daya reaktif kapasitor total ($Q_{C\ Total}$) menggunakan Persamaan 2.38.

Hasil perhitungan ini kemudian dibandingkan dengan limit persentase yang tertera pada Tabel 2.6 untuk memastikan kelayakan operasional filter.

3.4.8 Perhitungan Penurunan Distorsi Harmonisa Arus Pasca di Filter

Tahapan ini bertujuan untuk menghitung secara teoretis efektivitas filter yang telah dirancang dalam mereduksi arus harmonisa pada orde target. Perhitungan ini akan menentukan nilai arus harmonisa baru ($I_{h(new)}$) yang tersisa mengalir ke trafo setelah filter dipasang. Langkah-langkah perhitungannya adalah sebagai berikut.

1. Menghitung impedansi sistem
 - a. Menghitung impedansi hubung singkat sistem (Z_{SC}) menggunakan Persamaan 2.39.
 - b. Menghitung reaktansi hubung singkat sistem (X_{SC}) menggunakan Persamaan 2.40.
 - c. Menghitung resistansi hubung singkat sistem fundamental ($R_{SC(1)}$) menggunakan Persamaan 2.41.
2. Menghitung impedansi pada orde harmonisa target (h):
 - a. Menghitung reaktansi induktif ($X_{L(h)}$) dan reaktansi kapasitif ($X_{C(h)}$) filter pada orde ke- h menggunakan Persamaan 2.42 dan Persamaan 2.43.
 - b. Menentukan resistansi sistem ($R_{SC(h)}$) dan reaktansi sistem ($X_{SC(h)}$) pada orde ke- h menggunakan Persamaan 2.44 dan Persamaan 2.45.
 - c. Menghitung impedansi total sistem pada orde ke- h ($Z_{SC(h)}$) menggunakan Persamaan 2.46.
3. Menghitung arus harmonisa baru ($I_{h(new)}$)
 - a. Menghitung jumlah arus harmonisa orde ke- h yang diredam oleh filter ($I_{f(h)}$) menggunakan Persamaan 2.47.
 - b. Menentukan nilai arus harmonisa orde ke- h yang baru pada sistem ($I_{h(new)}$) menggunakan Persamaan 2.48.

Nilai $I_{h(new)}$ yang diperoleh ini akan digunakan sebagai dasar untuk perhitungan ulang nilai IHD_i , TDD , $derating$, dan $losses$ pada tahap berikutnya.

3.4.9 Perhitungan Nilai IHD_i dan TDD Pasca di Filter

Tahapan ini bertujuan untuk mengevaluasi kembali indeks kualitas daya arus pada transformator setelah solusi mitigasi diterapkan secara teoretis. Perhitungan ini

Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:

- a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
- b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.

2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

menggunakan nilai arus harmonisa baru ($I_{h(new)}$) untuk menentukan apakah sistem telah memenuhi standar yang ditetapkan. Langkah-langkahnya adalah sebagai berikut.

1. Menghitung nilai IHD_i baru

Menghitung persentase distorsi harmonisa individu arus yang baru pada orde target (h) dengan membandingkan $I_{h(new)}$ terhadap arus fundamental (I_1) menggunakan Persamaan 2.3.

2. Menghitung total arus harmonisa ($\sum_{h>1}^{h_{max}} I_h^2$)

Sebelum menentukan nilai TDD yang baru, dilakukan pembaruan terhadap total nilai akar jumlah kuadrat arus harmonisa dengan mengganti komponen arus pada orde dominan menggunakan nilai $I_{h(new)}$.

3. Menghitung nilai TDD baru

Menghitung total distorsi permintaan arus yang baru pada sistem dengan membandingkan total arus harmonisa yang telah diperbarui terhadap arus fundamental (I_1) menggunakan Persamaan 2.5.

Hasil dari perhitungan ulang ini kemudian dibandingkan kembali dengan batasan standar IEEE 519-1992 pada Tabel 2.2 untuk memverifikasi tingkat keberhasilan reduksi harmonisa secara teoretis.

3.4.10 Perhitungan Derating Trafo Pasca Difilter

Pada tahapan ini dilakukan perhitungan ulang terhadap sisa kapasitas aman trafo $1000kVA$ setelah memperhitungkan efek redaman filter terhadap arus harmonisa orde ke-5. Perhitungan ini menggunakan nilai arus harmonisa baru ($I_{h(new)}$) yang diperoleh dari tahap sebelumnya sebagai parameter input utama. Langkah-langkah perbandingannya adalah sebagai berikut.

1. Metode K -Factor:

- a. Nilai K -Factor beban dihitung kembali menggunakan Persamaan 2.12 dengan memasukkan nilai arus harmonisa yang telah diperbarui ($I_{h(new)}$).
- b. Selanjutnya, dihitung nilai persentase faktor penurunan kapasitas (*derating factor*) yang baru menggunakan Persamaan 2.13.

2. Metode $THDF$

- a. Menghitung ulang nilai I_{rms} dan I_{peak} total sistem dengan memperbarui komponen arus pada orde dominan menggunakan nilai $I_{h(new)}$.
- b. Nilai $THDF$ baru dihitung menggunakan Persamaan 2.14.

- c. Kapasitas baru transformator setelah mitigasi ($S_{derated}$) ditentukan kembali menggunakan Persamaan 2.15.

Hasil perhitungan ini kemudian dianalisis untuk melihat seberapa besar pemulihan kapasitas kerja transformator yang berhasil dicapai dibandingkan dengan kondisi sebelum pemasangan filter.

3.4.11 Perhitungan *Losses* Penyerapan Daya Oleh Filter

Tahapan ini bertujuan untuk menghitung rugi-rugi daya tambahan yang disebabkan oleh komponen filter pasif itu sendiri, karena filter juga berfungsi sebagai beban yang menyerap daya saat terhubung ke sistem. Perhitungan losses akibat pemasangan filter ini dilakukan dengan urutan sebagai berikut.

1. Menghitung daya aktif yang diserap filter (P)
Menghitung besarnya daya nyata yang dikonsumsi oleh resistansi filter menggunakan Persamaan 2.49.
2. Menghitung daya reaktif filter (Q)
Menghitung besarnya daya reaktif pada filter berdasarkan arus fundamental dan impedansi fundamental menggunakan Persamaan 2.50.
3. Menghitung daya semu filter (S)
Menentukan nilai daya semu total pada filter menggunakan akar jumlah kuadrat daya aktif dan reaktif sesuai Persamaan 2.51.
4. Menghitung faktor daya filter ($\cos\phi$)
Menghitung nilai faktor daya internal filter dengan membandingkan daya aktif terhadap daya semu menggunakan Persamaan 2.52.
5. Menghitung nilai losses akibat pemasangan filter (P_{loss})
Kalkulasi akhir untuk menentukan rugi-rugi daya nyata (kW) yang timbul akibat integrasi filter ke dalam sistem menggunakan Persamaan 2.53.

3.4.12 Perhitungan *Losses* Trafo Pasca Dfilter

Tahapan ini bertujuan untuk menghitung total rugi-rugi daya transformator setelah solusi mitigasi diterapkan secara teoretis. Perhitungan ini mempertimbangkan pengurangan losses akibat redaman harmonisa serta penambahan losses akibat penyerapan daya oleh komponen filter itu sendiri. Langkah-langkahnya adalah sebagai berikut.

Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:

- a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
- b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.

2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

1. Menghitung ulang losses akibat harmonisa ($P_{LL(new)}$)
Rugi-rugi daya akibat harmonisa dihitung kembali menggunakan nilai arus harmonisa baru ($I_{h(new)}$) sebagai input pada Persamaan 2.16, 2.17, 2.18, dan 2.19.
2. Menentukan nilai *losses* akibat filter
Mengambil nilai daya nyata (kW) yang diserap oleh filter pasif yang telah dihitung pada tahap sebelumnya menggunakan Persamaan 2.53.
3. Menambahkan nilai losses tanpa beban (P_{NL})
Tetap menyertakan nilai rugi inti besi standar untuk trafo 1000 kVA berdasarkan data pada Tabel 2.5.
4. Menjumlahkan komponen *losses* total ($P_{T(new)}$)
Total *losses* trafo pasca difilter diperoleh dengan menjumlahkan losses tanpa beban (P_{NL}), rugi beban harmonisa baru ($P_{LL(new)}$), dan rugi-rugi penyerapan daya oleh filter menggunakan modifikasi dari Persamaan 2.20.

Hasil ini digunakan untuk mengevaluasi efisiensi teknis transformator setelah dilakukan tindakan perbaikan kualitas daya.

3.4.13 Perhitungan Kerugian Biaya Akibat *Losses* Trafo Pasca Difilter

Tahapan ini bertujuan untuk menghitung dampak finansial tahunan dari total rugi-rugi daya transformator setelah solusi filter diimplementasikan secara teoretis. Total kerugian biaya pasca difilter ($C_{Loss(new)}$) dihitung berdasarkan nilai total *losses* baru yang telah mempertimbangkan reduksi harmonisa dan konsumsi daya filter. Langkah-langkah perhitungannya adalah sebagai berikut.

1. Menentukan total losses pasca difilter ($P_{T(new)}$)
Mengambil hasil penjumlahan rugi-rugi daya terbaru yang diperoleh dari tahap 3.4.12.
2. Kalkulasi proyeksi biaya tahunan
Menghitung total biaya kerugian baru dengan memasukkan nilai *losses* total yang baru, total jam operasional transformator (t), dan tarif dasar listrik (C_{kWh}) menggunakan Persamaan 2.21.
3. Analisis potensi penghematan
Membandingkan hasil $C_{Loss(new)}$ dengan biaya kerugian awal (C_{Loss}) untuk mengetahui besarnya efisiensi biaya operasional yang dapat dicapai oleh pihak universitas.

© Hak Cipta milik UIN Suska Riau
State Islamic University of Sultan Syarif Kasim Riau

Hasil dari perhitungan ini akan menunjukkan kelayakan ekonomi dari penerapan *single tuned passive filter* dalam menekan biaya pemborosan energi listrik di UIN Sultan Syarif Kasim Riau.

3.4.14 Validasi Filter Harmonisa Dengan Simulasi ETAP

Tahapan ini bertujuan untuk memvalidasi efektivitas rancangan *single tuned passive filter* yang telah dihitung secara teoretis pada tahap 3.4.6 menggunakan perangkat lunak ETAP. Validasi ini berfungsi untuk memastikan bahwa spesifikasi komponen hasil perhitungan manual mampu memberikan performa reduksi yang diinginkan dalam lingkungan sistem yang kompleks. Langkah-langkah validasi ini adalah sebagai berikut.

1. Pemodelan sistem

Membangun model sistem kelistrikan gardu UIN Sultan Syarif Kasim Riau dalam ETAP berdasarkan data yang dikumpulkan, termasuk *Single Line Diagram (SLD)*, spesifikasi trafo, data kabel, dan data distribusi beban gedung.

2. Simulasi kondisi awal (*existing*)

Menjalankan modul *harmonic analysis* pada model ETAP tanpa filter terpasang untuk mensimulasikan kondisi saat ini dan memverifikasi kesesuaian nilai IHD_i serta TDD model dengan data pengukuran lapangan.

3. Implementasi filter dalam model

Memasukkan komponen *harmonic filter* ke dalam model ETAP dengan memasukkan nilai parameter R , L , dan C hasil perhitungan teoretis pada orde target ke-5.

4. Analisis hasil simulasi

Membandingkan nilai IHD_i dan TDD sebelum dan sesudah filter diaktifkan dalam ETAP guna memverifikasi apakah desain tersebut berhasil mereduksi distorsi sesuai target standar IEEE 519-1992.

3.4.15 Hasil Analisis

Pada bagian ini, dipaparkan secara sistematis seluruh temuan yang diperoleh dari rangkaian tahapan penelitian untuk menjawab rumusan masalah yang telah ditetapkan. Analisis dilakukan secara mendalam dengan membandingkan kondisi sebelum dan sesudah penerapan mitigasi sebagai berikut.

Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

1. Analisis kondisi awal
Menyajikan tingkat distorsi harmonisa tegangan (THD_v) dan arus (TDD) berdasarkan pengukuran tahun 2025, yang kemudian dievaluasi kesesuaiannya terhadap batasan standar IEEE 519-1992. Bagian ini juga memaparkan hasil perhitungan derating awal menggunakan metode K -Factor (Persamaan 2.12) dan $THDF$ (Persamaan 2.14), serta total *losses* daya dan kerugian biaya tahunan.
2. Analisis spesifikasi filter dan unjuk kerja
Memaparkan spesifikasi teknis komponen R , L , dan C hasil perhitungan teoretis. Dilakukan analisis unjuk kerja filter di mana beban kerja komponen divalidasi terhadap standar ANSI/IEEE 18-1992 untuk memastikan kelayakan rancangan sebelum diimplementasikan.
3. Analisis perbandingan pasca mitigasi
Menyajikan kondisi transformator setelah penerapan filter secara teoretis, mencakup nilai arus harmonisa baru ($I_{h(new)}$). Berdasarkan nilai tersebut, dilakukan evaluasi ulang terhadap nilai TDD , pemulihan kapasitas trafo (*derating*), serta efisiensi *losses* dan penghematan biaya operasional.
4. Validasi dan pembahasan menyeluruh
Menganalisis kesesuaian antara hasil perhitungan manual dengan validasi simulasi ETAP.

BAB V PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisis, perhitungan, dan simulasi yang telah dilakukan pada tugas akhir ini, maka dapat ditarik beberapa kesimpulan utama sebagai berikut:

1. Kondisi kualitas daya pada transformator 1000 *kVA* di lokasi penelitian menunjukkan tingkat harmonisa arus yang sangat tinggi, di mana nilai *TDD* pada ketiga fasa mencapai 18,45%, 24,89%, dan 22,63%. Angka ini jauh melampaui ambang batas aman sebesar 8,0% yang ditetapkan oleh standar IEEE 519-1992, dengan dominasi harmonisa pada orde ke-5.
2. Tingginya distorsi harmonisa tersebut berdampak langsung pada penurunan kapasitas kerja transformator (*derating*). Hasil analisis komparatif menunjukkan bahwa metode *THDF* memberikan penilaian sisa kapasitas yang lebih konservatif/rendah yaitu sebesar 61,70%, dibandingkan dengan metode *K-Factor* yang menunjukkan sisa kapasitas sebesar 81,07% pada fasa yang paling terbebani. Perbedaan ini menunjukkan bahwa pada sistem dengan beban non-linier dominan, metode *THDF* lebih sensitif dalam mengidentifikasi risiko kerusakan isolasi akibat distorsi bentuk gelombang arus puncak, yang secara finansial berpotensi menimbulkan kerugian akibat rugi-rugi daya mencapai Rp532.205.040,00 per tahun.
3. Desain *single tuned passive filter* orde ke-5 yang dirancang secara manual mengalami kegagalan fungsi akibat adanya interaksi negatif dengan kapasitor eksisting di sistem. Kondisi ini menyebabkan fenomena *over-compensation* dan *overvoltage* pada komponen filter yang mana tegangan puncak mencapai 127,72% dan tegangan *RMS* mencapai 120% dari limit, yang secara teknis berisiko menyebabkan kerusakan fatal atau ledakan jika dipaksakan untuk diimplementasikan.
4. Penyebab utama tingginya harmonisa orde ke-5 dan kegagalan filter awal adalah keberadaan kapasitor eksisting yang menciptakan jalur resonansi pada sistem. Hal ini dibuktikan melalui simulasi ETAP, di mana faktor daya sistem menunjukkan kondisi *leading* yang tidak normal selama kapasitor tersebut masih terhubung.

Mitigasi harmonisa arus yang efektif hanya dapat dicapai dengan melepaskan kapasitor eksisting dan menggantinya dengan desain *single tuned passive filter* yang baru. Hal ini dikarenakan keberadaan kapasitor eksisting memicu fenomena resonansi paralel yang membahayakan sistem dengan lonjakan tegangan di atas batas standar ANSI/IEEE 18-1992. Dengan meniadakan kapasitor lama, sistem berhasil mereduksi TDD menjadi 7,53% dan memenuhi standar IEEE 519-1992, menstabilkan tegangan operasional, dan mengembalikan faktor daya ke kondisi aman.

5.2 Saran

Untuk pengembangan penelitian selanjutnya serta perbaikan sistem kelistrikan di lokasi penelitian, penulis menyarankan beberapa hal berikut:

1. Pihak pengelola kelistrikan di UIN Sultan Syarif Kasim Riau disarankan untuk segera melakukan peninjauan ulang terhadap penggunaan kapasitor bank eksisting pada trafo 1000 *kVA* tersebut, mengingat fungsinya saat ini justru memperburuk harmonisa dan risiko tegangan lebih melalui resonansi.
2. Disarankan untuk melakukan pemantauan kualitas daya secara berkala menggunakan *power quality analyzer* pada titik-titik beban utama untuk mendeteksi dini peningkatan distorsi harmonisa sebelum berdampak pada kerusakan trafo.

Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:

- a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
- b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.

2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] M. A. Luthfi and K. Karim, "Analisis Dan Mitigasi Harmonisa Pada Gedung Direktorat Politeknik Negeri Samarinda Dengan Menggunakan Software ETAP," vol. 06, no. 01, pp. 12–20, 2025.
- [2] A. Melpi, "Analisis Penurunan Kapasitas Daya (Derating) Transformator Distribusi UIN SUSKA Riau Akibat Harmonisa Setelah Pemasangan Double Tuned Passive Filter," *Galang Tanjung*, no. 2504, pp. 1–9, 2018.
- [3] A. A. Melkias, I. Indriyani, and T. Hidayat, "Analisis Pengaruh Harmonisa Transformator Distribusi 2500 kVA," *J. Surya Tek.*, vol. 12, no. 1, pp. 367–374, 2025, doi: 10.37859/jst.v12i1.9533.
- [4] S. Hasan, A. Hanfiah Rambe, F. RABukit, and M. Nurfahasdi, "Pengaruh Harmonisa pada Transformator Daya," *Semnastek Uisu*, vol. 2, pp. 1–7, 2023.
- [5] P. A. Saputra, "Desain Single Passive Tuned Filter Dalam Meredam Harmonisa pada Transformator UIN SUSKA Riau," 2023.
- [6] H. B. Utomo, E. B. Putri, and K. Kunci, "Perhitungan Rugi-Rugi pada Transformator Akibat Harmonisa dan Perancangan Filter Pasif Menggunakan MATLAB," *Pros. 12th Ind. Res. Work. Natl. Semin.*, vol. 2, no. 1, pp. 1–7, 2021.
- [7] R. Sutjipto and Wijaya Kusuma, "Analisis Pengaruh Harmonisa Terhadap Losses Transformator 500kVA," *ELPOSYS J. Sist. Kelistrikan*, vol. 9, no. 2, pp. 13–18, 2022, doi: 10.33795/elposys.v9i2.134.
- [8] D. Apriliansyah and A. Gaffar, "Analisis Pengaruh Harmonisa Terhadap Rugi – Rugi Daya Pada Transformator Distribusi ULP Karebosi," *Pros. Semin. Nas. Tek. Elektro dan Inform.*, vol. 2, no. 3, pp. 178–184, 2021, [Online]. Available: <http://jurnal.poliupg.ac.id/index.php/sntei/article/view/2891%0Ahttp://jurnal.poliupg.ac.id/index.php/sntei/article/download/2891/2513>
- [9] Z. Aini and A. Mar'i, *Desain Single Passive Tuned Filter Terhadap Harmonisa Pada Transformator Distribusi*, no. 4. 2021.
- [10] H. B. Utomo and M. Rafita, "Perancangan Filter Pasif untuk Mengurangi Kandungan Arus Harmonisa pada Transformator Daya Berbasis Simulink," *Pros. 12 th Ind. Res. Work. Natl. Semin. Bandung*, pp. 314–319, 2021.
- [11] M. I. Malik, "Optimization Design of Single-Tuned Passive Filter Using Particle Swarm Optimization Algorithm in Industry," *J. Energy Electr. Eng.*, vol. 6, no. 2, pp.

Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:

- a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
- b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.

2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

- 137–144, 2025, doi: 10.37058/jeeee.v6i2.14644.
- [12] G. N. Obiora, A. S. Alayande, and O. U. Omeje, “Utilization of Filters and Other Methods for Harmonic Distortion Mitigation in Electricity Networks Tied To Renewable Energy Sources: a Review,” *Niger. J. Trop. Eng.*, vol. 19, no. 1, pp. 1–42, 2025, doi: 10.59081/njte.19.1.001.
- [13] Anang Dasa Novfowan, Mochammad Mieftah, and Dhimas Dhesah Kharisma, “Evaluasi dan Mitigasi Distorsi Harmonisa Transformator 1250 kVA Beban Motor Pompa Air,” *Elposys J. Sist. Kelistrikan*, vol. 12, no. 2, pp. 91–96, 2025, doi: 10.33795/elposys.v12i2.7330.
- [14] R. C. Dugan, *Electrical Power System Quality*. New York: McGraw-Hill, 2004.
- [15] IEEE, *IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems*. New York: IEEE Std 519-1992, IEEE, 1992.
- [16] V. K. Mehta, *Principles of Power System*. New Delhi: S. Chand, 2005.
- [17] C. Sankaran, *Power Quality*. Boca Raton: CRC Press, 2017.
- [18] “IEEE Recommended Practices For Establishing Transformer Capability When Supplying Nonsinusoidal Load Currents,” in *ANSI/IEEE Std C57.110-1986*, New York: IEEE, 1986.
- [19] M. A. Paath, “Manfaat Program Derating Suplai Daya Trafo Distribusi (Maintain the Reliability without Cost Maintenance),” *Fokus PLN*, 2014.
- [20] U.S. Department of Energy, “Doe Fundamentals Handbook Electrical Science. Vol. 3 of 4,” Washington, D.C., 1992.
- [21] P. P. (Persero), “SPLN D3.002-1 : 2007,” Jakarta Selatan, 2006.
- [22] M. D. Yudhanto, I. P. Facta, “Analisis Teknis Dan Ekonomis Dampak Harmonisa Pada Sistem Instalasi Listrik Di Departemen Teknik Elektro Universitas Diponegoro Terhadap Trafo Daya 630 KVA,” *Transient*, vol. 10, no. 3, pp. 1–8, 2021, [Online]. Available: <https://ejournal3.undip.ac.id/index.php/transient>
- [23] J. C. Das, “Passive Filter- Potentialities and Limitations,” *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 40, no. 1, pp. 234–241, 2004.
- [24] H. Prasetijo, “Analisa Perancangan Filter Pasif Untuk Meredam Harmonik Pada Instalasi 113 Beban Nonlinier,” *Techno*, vol. 13, no. 1, pp. 56–57, 2012.
- [25] Z. Ahnur, “Analisa Pengaruh Pemasangan Single Tuned Passive Terhadap Harmonisa Transformator dan Distribusi Filter Losses Fakultas Pada Teknik Universitas Riau,” UIN Suska Riau, 2016.

LAMPIRAN A

Data Pengukuran Tegangan, Arus, dan Daya Aktif Transformator

Tabel A1. Data Tegangan, Arus, dan Daya Aktif Transformator

Pukul	Tegangan (v)			Arus (I)			Daya Aktif (P)		
	v			A			kW		
	R	S	T	R	S	T	R	S	T
00:00	232,74	236,39	236,63	113,8	97,6	90,6	24,9	21,6	19
01:00	233,76	237,46	237,84	100,8	89,9	82,5	22	19,9	17,5
02:00	233,68	237,24	237,86	112,8	106,1	94,9	24,5	23,4	20,3
03:00	234,65	238,45	238,95	110,9	102,4	89,1	24,2	22,9	18,8
04:00	235,03	238,70	239,17	110,9	104,2	100,2	24,4	23	21,6
05:00	232,98	236,70	237,25	116,40	105,30	99,70	25,3	23,2	21,2
06:00	233,51	237,16	237,85	170,80	183,90	154,70	37	41,7	33,5
07:00	231,27	234,42	235,01	556,70	540,20	544,80	126,9	122,9	123,1
08:00	231,00	234,24	235,23	742,00	676,70	702,70	168,1	154	160,4
09:00	230,29	233,50	234,65	820,50	782,60	760,10	186	178,7	174
10:00	228,33	231,63	232,97	855,20	812,50	798,30	191,9	184,1	182
11:00	227,98	231,33	232,67	892,00	818,60	806,90	200,5	185,4	184
12:00	229,59	232,77	234,45	896,30	836,90	812,20	202,9	190,7	186,2
13:00	231,06	233,92	235,68	822,10	825,80	789,50	186,9	188,9	181,8
14:00	229,07	231,97	233,62	861,80	850,30	816,90	194,7	193,5	187,2
15:00	229,21	232,20	233,75	831,90	827,20	779,20	188	188,3	177,8
16:00	231,41	234,20	235,61	633,50	668,60	602,90	143,2	152,9	137,8
17:00	231,39	234,75	235,27	320,30	291,30	253,00	70,8	65,9	55,4
18:00	232,34	235,34	235,95	159,20	163,20	156,90	34,3	36,4	34,6
19:00	235,14	238,14	238,82	118,70	119,60	121,50	25,9	27,2	27,4
20:00	234,39	237,32	237,92	121,40	108,20	124,90	26,4	23,8	28
21:00	232,96	236,07	236,49	116,40	103,20	121,20	25,5	23	27
22:00	232,95	236,24	236,75	105,50	99,60	109,10	23,1	22,1	24,4
23:00	234,17	237,30	238,10	111,10	107,20	116,20	24,5	23,8	26
Rata-rata	232,04	235,31	236,19	408,38	392,55	380,33	91,78	89,10	86,21

(Sumber: Data Pengukuran Tanggal 18 November 2025)

Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.

2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

Tabel A2. Data Daya Reaktif, Daya Semu, dan Faktor Daya Transformator

Pukul	Daya Reaktif (Q)			Daya Semu (S)			Faktor Daya (PF)		
	$kVAR$			kVA			R	S	T
	R	S	T	R	S	T			
00:00	8,1	6,6	9	26,1	22,6	21	0,9512	0,9561	0,9044
01:00	7,3	6,1	7,8	23,2	20,9	19,1	0,9493	0,9557	0,9138
02:00	9	8,1	9	26,1	24,8	22,2	0,9388	0,9452	0,9141
03:00	8,6	7,3	9	25,7	24	20,9	0,9428	0,9521	0,9011
04:00	8,4	8,3	9,6	25,8	24,5	23,6	0,9453	0,9413	0,9135
05:00	8,7	8,2	9,8	26,8	24,6	23,3	0,9463	0,9431	0,9070
06:00	11,8	12,2	14,8	39,7	43,4	36,6	0,9546	0,9597	0,9145
07:00	21,4	30,1	34,7	128,7	126,5	127,9	0,9860	0,9713	0,9625
08:00	32,7	36,9	39,5	171,3	158,4	165,2	0,9816	0,9724	0,9710
09:00	32,5	37,7	38,4	188,8	182,6	178,2	0,9851	0,9784	0,9765
10:00	35,2	38,3	37,4	195,2	188,1	185,8	0,9836	0,9791	0,9796
11:00	32,9	38	36,8	203,2	189,2	187,6	0,9868	0,9797	0,9805
12:00	33,5	39,2	39,3	205,7	194,7	190,3	0,9866	0,9796	0,9784
13:00	33,3	39,7	39	189,8	193,1	185,9	0,9845	0,9787	0,9778
14:00	31,9	37,6	36,5	197,3	197,1	190,7	0,9869	0,9817	0,9816
15:00	30,9	37,2	38,6	190,6	192	182	0,9867	0,9810	0,9772
16:00	30,9	33	33,9	146,5	156,4	141,9	0,9774	0,9775	0,9710
17:00	21,5	17,7	21,4	74	68,2	59,4	0,9569	0,9657	0,9326
18:00	13	11,3	12,7	36,7	38,1	36,8	0,9350	0,9550	0,9384
19:00	9,5	7,2	8,6	27,6	28,1	28,7	0,9387	0,9665	0,9537
20:00	9,8	8,5	9	28,1	25,2	29,5	0,9370	0,9422	0,9519
21:00	8,2	6,4	8,8	26,8	23,9	28,4	0,9522	0,9633	0,9507
22:00	7,1	6,6	7,4	24,2	23,1	25,5	0,9557	0,9578	0,9570
23:00	7,7	7,6	8,6	25,6	25	27,4	0,9544	0,9531	0,9494
Rata-rata	18,91	20,41	21,65	93,90	91,44	89,08	0,9626	0,9640	0,9483

(Sumber: Data Pengukuran Tanggal 18 November 2025)

Hak Cipta Diindungi Undang-Undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.

2. Dilarang mengumpukan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

Tabel A3. Data Daya Reaktif, Daya Semu, dan Faktor Daya Transformator 3 Fasa

Pukul	Daya Aktif (P)	Daya Reaktif (Q)	Daya Semu (S)	PF
	kW	$kVAR$	kVA	
00:00	65,5	23,7	69,7	0,9406
01:00	59,4	21,2	63,1	0,9419
02:00	68,2	26,1	73	0,9341
03:00	65,9	25	70,5	0,9352
04:00	69	26,3	73,8	0,9345
05:00	69,7	26,6	74,6	0,9340
06:00	113,1	38,9	119,6	0,9457
07:00	372,9	86,2	382,7	0,9743
08:00	482,5	109,1	494,7	0,9754
09:00	538,7	108,6	549,6	0,9803
10:00	558,1	110,8	569	0,9808
11:00	569,9	107,7	580	0,9826
12:00	579,8	112	590,5	0,9819
13:00	557,6	112	568,8	0,9804
14:00	575,4	105,9	585	0,9835
15:00	554,2	106,8	564,4	0,9819
16:00	433,9	97,9	444,8	0,9755
17:00	192,2	60,6	201,5	0,9537
18:00	105,3	37	111,6	0,9433
19:00	80,4	25,4	84,3	0,9538
20:00	78,2	27,3	82,8	0,9441
21:00	75,5	23,4	79,1	0,9552
22:00	69,6	21,1	72,7	0,9568
23:00	74,3	23,8	78	0,9523
Rata-rata	267,10	60,98	274,33	0,9592

(Sumber: Data Pengukuran Tanggal 18 November 2025)

Hak Cipta Diindungi Undang-Undang

State Islamic University of Sultan Syarif Kasim Riau

UIN SUSKA RIAU

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

LAMPIRAN B

Data Nilai Perhitungan *K-Factor* dan *THDF* Per Fasa Sebelum dan Sesudah di Filter

Table B1. Data Nilai Perhitungan *K-Factor* Fasa R Sebelum di Filter

Orde	h^2	i_h	i_h^2	$h^2 \times i_h^2$
1	1	98,60	9721,96	9721,96
2	4	0,70	0,49	1,96
3	9	11,40	129,96	1169,64
4	16	0,40	0,16	2,56
5	25	11,40	129,96	3249
6	36	0,30	0,09	3,24
7	49	5,60	31,36	1536,64
8	64	0,20	0,04	2,56
9	81	3,00	9	729
10	100	0,20	0,04	4
11	121	4,20	17,64	2134,44
12	144	0,20	0,04	5,76
13	169	2,30	5,29	894,01
14	196	0,20	0,04	7,84
15	225	1,10	1,21	272,25
16	256	0,10	0,01	2,56
17	289	2,00	4	1156
18	324	0,10	0,01	3,24
19	361	0,30	0,09	32,49
20	400	0,20	0,04	16
21	441	0,60	0,36	158,76
22	484	0,10	0,01	4,84
23	529	1,00	1	529
24	576	0,10	0,01	5,76
25	625	0,90	0,81	506,25
26	676	0,10	0,01	6,76
27	729	0,40	0,16	116,64
28	784	0,00	0	0
29	841	0,30	0,09	75,69
30	900	0,10	0,01	9
31	961	0,10	0,01	9,61
32	1024	0,00	0	0
33	1089	0,20	0,04	43,56
34	1156	0,10	0,01	11,56
35	1225	0,10	0,01	12,25
36	1296	0,00	0	0
37	1369	0,20	0,04	54,76
38	1444	0,00	0	0
39	1521	0,10	0,01	15,21
40	1600	0,00	0	0
	$\sum_{h>1}^{h=\infty}$		10054,01	22504,8

- Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
 2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

Tabel B2. Data Nilai Perhitungan *K-Factor* Fasa S Sebelum di Filter

Orde	h^2	i_h	i_h^2	$h^2 \times i_h^2$
1	1	75,70	5730,49	5730,49
2	4	1,30	1,69	6,76
3	9	10,70	114,49	1030,41
4	16	0,30	0,09	1,44
5	25	12,80	163,84	4096
6	36	0,50	0,25	9
7	49	7,10	50,41	2470,09
8	64	0,20	0,04	2,56
9	81	2,70	7,29	590,49
10	100	0,10	0,01	1
11	121	3,10	9,61	1162,81
12	144	0,20	0,04	5,76
13	169	1,70	2,89	488,41
14	196	0,10	0,01	1,96
15	225	0,90	0,81	182,25
16	256	0,10	0,01	2,56
17	289	0,80	0,64	184,96
18	324	0,10	0,01	3,24
19	361	0,40	0,16	57,76
20	400	0,10	0,01	4
21	441	0,30	0,09	39,69
22	484	0,10	0,01	4,84
23	529	0,50	0,25	132,25
24	576	0,10	0,01	5,76
25	625	0,60	0,36	225
26	676	0,10	0,01	6,76
27	729	0,50	0,25	182,25
28	784	0,10	0,01	7,84
29	841	0,20	0,04	33,64
30	900	0,10	0,01	9
31	961	0,10	0,01	9,61
32	1024	0,10	0,01	10,24
33	1089	0,30	0,09	98,01
34	1156	0,10	0,01	11,56
35	1225	0,20	0,04	49
36	1296	0,10	0,01	12,96
37	1369	0,10	0,01	13,69
38	1444	0,00	0	0
39	1521	0,20	0,04	60,84
40	1600	0,00	0	0
$\sum_{h=1}^{h=\infty}$			6084,05	16944,89

Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

©

Ha cipta mi ik UIN Suska Riau

State Islamic University of Sultan Syarif Kasim Riau

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

Tabel B3. Data Nilai Perhitungan *K-Factor* Fasa T Sebelum di Filter

Orde	h^2	i_h	i_h^2	$h^2 \times i_h^2$
1	1	79,40	6304,36	6304,36
2	4	0,60	0,36	1,44
3	9	8,00	64	576
4	16	0,30	0,09	1,44
5	25	13,70	187,69	4692,25
6	36	0,20	0,04	1,44
7	49	7,60	57,76	2830,24
8	64	0,10	0,01	0,64
9	81	2,40	5,76	466,56
10	100	0,10	0,01	1
11	121	1,90	3,61	436,81
12	144	0,20	0,04	5,76
13	169	1,10	1,21	204,49
14	196	0,10	0,01	1,96
15	225	0,50	0,25	56,25
16	256	0,10	0,01	2,56
17	289	1,60	2,56	739,84
18	324	0,00	0	0
19	361	0,30	0,09	32,49
20	400	0,10	0,01	4
21	441	0,10	0,01	4,41
22	484	0,10	0,01	4,84
23	529	0,50	0,25	132,25
24	576	0,10	0,01	5,76
25	625	0,50	0,25	156,25
26	676	0,10	0,01	6,76
27	729	0,10	0,01	7,29
28	784	0,10	0,01	7,84
29	841	0,20	0,04	33,64
30	900	0,10	0,01	9
31	961	0,10	0,01	9,61
32	1024	0,10	0,01	10,24
33	1089	0,10	0,01	10,89
34	1156	0,00	0	0
35	1225	0,30	0,09	110,25
36	1296	0,00	0	0
37	1369	0,20	0,04	54,76
38	1444	0,10	0,01	14,44
39	1521	0,10	0,01	15,21
40	1600	0,00	0	0
$\sum_{h=1}^{h=\infty}$			6628,66	16952,97

Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

© Ha cipta mi ik UIN Suska Riau State Islamic University of Sultan Syarif Kasim Riau

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

© Hak Cipta milik UIN Suska Riau
Tabel B4. Data Nilai Perhitungan THDF Fasa R Sebelum di Filter

Orde	Arus RMS	Arus Puncak
1	98,60	139,4204
2	0,70	0,9898
3	11,40	16,1196
4	0,40	0,5656
5	11,40	16,1196
6	0,30	0,4242
7	5,60	7,9184
8	0,20	0,2828
9	3,00	4,242
10	0,20	0,2828
11	4,20	5,9388
12	0,20	0,2828
13	2,30	3,2522
14	0,20	0,2828
15	1,10	1,5554
16	0,10	0,1414
17	2,00	2,828
18	0,10	0,1414
19	0,30	0,4242
20	0,20	0,2828
21	0,60	0,8484
22	0,10	0,1414
23	1,00	1,414
24	0,10	0,1414
25	0,90	1,2726
26	0,10	0,1414
27	0,40	0,5656
28	0,00	0
29	0,30	0,4242
30	0,10	0,1414
31	0,10	0,1414
32	0,00	0
33	0,20	0,2828
34	0,10	0,1414
35	0,10	0,1414
36	0,00	0
37	0,20	0,2828
38	0,00	0
39	0,10	0,1414
40	0,00	0
$\sum_{h=1}^{h=\infty}$	146,90	207,7166

Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:

- Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
- Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.

2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

© Hak Cipta milik UIN Suska Riau
Tabel B5. Data Nilai Perhitungan THDF Fasa S Sebelum di Filter

Orde	Arus RMS	Arus Puncak
1	75,70	107,0398
2	1,30	1,8382
3	10,70	15,1298
4	0,30	0,4242
5	12,80	18,0992
6	0,50	0,707
7	7,10	10,0394
8	0,20	0,2828
9	2,70	3,8178
10	0,10	0,1414
11	3,10	4,3834
12	0,20	0,2828
13	1,70	2,4038
14	0,10	0,1414
15	0,90	1,2726
16	0,10	0,1414
17	0,80	1,1312
18	0,10	0,1414
19	0,40	0,5656
20	0,10	0,1414
21	0,30	0,4242
22	0,10	0,1414
23	0,50	0,707
24	0,10	0,1414
25	0,60	0,8484
26	0,10	0,1414
27	0,50	0,707
28	0,10	0,1414
29	0,20	0,2828
30	0,10	0,1414
31	0,10	0,1414
32	0,10	0,1414
33	0,30	0,4242
34	0,10	0,1414
35	0,20	0,2828
36	0,10	0,1414
37	0,10	0,1414
38	0,00	0
39	0,20	0,2828
40	0,00	0
$\sum_{h>1}^{h=\infty}$	122,70	173,50

Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:

- Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
- Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.

2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

© Hak Cipta milik UIN Suska Riau
Tabel B6. Data Nilai Perhitungan THDF Fasa T Sebelum di Filter

Orde	Arus RMS	Arus Puncak
1	79,40	112,2716
2	0,60	0,8484
3	8,00	11,312
4	0,30	0,4242
5	13,70	19,3718
6	0,20	0,2828
7	7,60	10,7464
8	0,10	0,1414
9	2,40	3,3936
10	0,10	0,1414
11	1,90	2,6866
12	0,20	0,2828
13	1,10	1,5554
14	0,10	0,1414
15	0,50	0,707
16	0,10	0,1414
17	1,60	2,2624
18	0,00	0
19	0,30	0,4242
20	0,10	0,1414
21	0,10	0,1414
22	0,10	0,1414
23	0,50	0,707
24	0,10	0,1414
25	0,50	0,707
26	0,10	0,1414
27	0,10	0,1414
28	0,10	0,1414
29	0,20	0,2828
30	0,10	0,1414
31	0,10	0,1414
32	0,10	0,1414
33	0,10	0,1414
34	0,00	0
35	0,30	0,4242
36	0,00	0
37	0,20	0,2828
38	0,10	0,1414
39	0,10	0,1414
40	0,00	0
$\sum_{h>1}^{h=\infty}$	121,20	171,38

Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

Tabel B7. Data Nilai Perhitungan *K-Factor* Fasa R Setelah di Filter

Orde	h^2	i_h	i_h^2	$h^2 \times i_h^2$
1	1	98,60	9721,96	9721,96
2	4	0,70	0,49	1,96
3	9	11,40	129,96	1169,64
4	16	0,40	0,16	2,56
5	25	10,29	105,8841	2647,1025
6	36	0,30	0,09	3,24
7	49	5,60	31,36	1536,64
8	64	0,20	0,04	2,56
9	81	3,00	9	729
10	100	0,20	0,04	4
11	121	4,20	17,64	2134,44
12	144	0,20	0,04	5,76
13	169	2,30	5,29	894,01
14	196	0,20	0,04	7,84
15	225	1,10	1,21	272,25
16	256	0,10	0,01	2,56
17	289	2,00	4	1156
18	324	0,10	0,01	3,24
19	361	0,30	0,09	32,49
20	400	0,20	0,04	16
21	441	0,60	0,36	158,76
22	484	0,10	0,01	4,84
23	529	1,00	1	529
24	576	0,10	0,01	5,76
25	625	0,90	0,81	506,25
26	676	0,10	0,01	6,76
27	729	0,40	0,16	116,64
28	784	0,00	0	0
29	841	0,30	0,09	75,69
30	900	0,10	0,01	9
31	961	0,10	0,01	9,61
32	1024	0,00	0	0
33	1089	0,20	0,04	43,56
34	1156	0,10	0,01	11,56
35	1225	0,10	0,01	12,25
36	1296	0,00	0	0
37	1369	0,20	0,04	54,76
38	1444	0,00	0	0
39	1521	0,10	0,01	15,21
40	1600	0,00	0	0
$\sum_{h=1}^{h=\infty}$			10029,934	21902,903

© Hak Cipta Diindungi Undang-Undang
 Himpunan Cipta miik UIN Suska Riau
 State Islamic University of Sultan Syarif Kasim Riau

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

Tabel B8. Data Nilai Perhitungan *K-Factor* Fasa S Setelah di Filter

Orde	h^2	i_h	i_h^2	$h^2 \times i_h^2$
1	1	75,70	5730,49	5730,49
2	4	1,30	1,69	6,76
3	9	10,70	114,49	1030,41
4	16	0,30	0,09	1,44
5	25	11,61	134,7921	3369,8025
6	36	0,50	0,25	9
7	49	7,10	50,41	2470,09
8	64	0,20	0,04	2,56
9	81	2,70	7,29	590,49
10	100	0,10	0,01	1
11	121	3,10	9,61	1162,81
12	144	0,20	0,04	5,76
13	169	1,70	2,89	488,41
14	196	0,10	0,01	1,96
15	225	0,90	0,81	182,25
16	256	0,10	0,01	2,56
17	289	0,80	0,64	184,96
18	324	0,10	0,01	3,24
19	361	0,40	0,16	57,76
20	400	0,10	0,01	4
21	441	0,30	0,09	39,69
22	484	0,10	0,01	4,84
23	529	0,50	0,25	132,25
24	576	0,10	0,01	5,76
25	625	0,60	0,36	225
26	676	0,10	0,01	6,76
27	729	0,50	0,25	182,25
28	784	0,10	0,01	7,84
29	841	0,20	0,04	33,64
30	900	0,10	0,01	9
31	961	0,10	0,01	9,61
32	1024	0,10	0,01	10,24
33	1089	0,30	0,09	98,01
34	1156	0,10	0,01	11,56
35	1225	0,20	0,04	49
36	1296	0,10	0,01	12,96
37	1369	0,10	0,01	13,69
38	1444	0,00	0	0
39	1521	0,20	0,04	60,84
40	1600	0,00	0	0
$\sum_{h=1}^{h=\infty}$			6055,0021	16218,693

Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

©

Ha cipta mi ik UIN Suska Riau

State Islamic University of Sultan Syarif Kasim Riau

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

Tabel B9. Data Nilai Perhitungan *K-Factor* Fasa T Setelah di Filter

Orde	h^2	i_h	i_h^2	$h^2 \times i_h^2$
1	1	79,40	6304,36	6304,36
2	4	0,60	0,36	1,44
3	9	8,00	64	576
4	16	0,30	0,09	1,44
5	25	12,23	149,5729	3739,3225
6	36	0,20	0,04	1,44
7	49	7,60	57,76	2830,24
8	64	0,10	0,01	0,64
9	81	2,40	5,76	466,56
10	100	0,10	0,01	1
11	121	1,90	3,61	436,81
12	144	0,20	0,04	5,76
13	169	1,10	1,21	204,49
14	196	0,10	0,01	1,96
15	225	0,50	0,25	56,25
16	256	0,10	0,01	2,56
17	289	1,60	2,56	739,84
18	324	0,00	0	0
19	361	0,30	0,09	32,49
20	400	0,10	0,01	4
21	441	0,10	0,01	4,41
22	484	0,10	0,01	4,84
23	529	0,50	0,25	132,25
24	576	0,10	0,01	5,76
25	625	0,50	0,25	156,25
26	676	0,10	0,01	6,76
27	729	0,10	0,01	7,29
28	784	0,10	0,01	7,84
29	841	0,20	0,04	33,64
30	900	0,10	0,01	9
31	961	0,10	0,01	9,61
32	1024	0,10	0,01	10,24
33	1089	0,10	0,01	10,89
34	1156	0,00	0	0
35	1225	0,30	0,09	110,25
36	1296	0,00	0	0
37	1369	0,20	0,04	54,76
38	1444	0,10	0,01	14,44
39	1521	0,10	0,01	15,21
40	1600	0,00	0	0
$\sum_{h=1}^{h=\infty}$			6590,5429	16000,043

Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

© Ha cipta mi ik UIN Suska Riau State Islamic University of Sultan Syarif Kasim Riau

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

© Hak Cipta milik UIN Suska Riau
Tabel B10. Data Nilai Perhitungan THDF Fasa R Setelah di Filter

Orde	Arus RMS	Arus Puncak
1	98,60	139,4204
2	0,70	0,9898
3	11,40	16,1196
4	0,40	0,5656
5	10,29	14,55006
6	0,30	0,4242
7	5,60	7,9184
8	0,20	0,2828
9	3,00	4,242
10	0,20	0,2828
11	4,20	5,9388
12	0,20	0,2828
13	2,30	3,2522
14	0,20	0,2828
15	1,10	1,5554
16	0,10	0,1414
17	2,00	2,828
18	0,10	0,1414
19	0,30	0,4242
20	0,20	0,2828
21	0,60	0,8484
22	0,10	0,1414
23	1,00	1,414
24	0,10	0,1414
25	0,90	1,2726
26	0,10	0,1414
27	0,40	0,5656
28	0,00	0
29	0,30	0,4242
30	0,10	0,1414
31	0,10	0,1414
32	0,00	0
33	0,20	0,2828
34	0,10	0,1414
35	0,10	0,1414
36	0,00	0
37	0,20	0,2828
38	0,00	0
39	0,10	0,1414
40	0,00	0
$\sum_{h=1}^{h=\infty}$	145,79	206,14706

Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:

- Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
- Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.

2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

© Hak Cipta milik UIN Suska Riau
Tabel B11. Data Nilai Perhitungan THDF Fasa S Setelah di Filter

Orde	Arus RMS	Arus Puncak
1	75,70	107,0398
2	1,30	1,8382
3	10,70	15,1298
4	0,30	0,4242
5	11,61	16,41654
6	0,50	0,707
7	7,10	10,0394
8	0,20	0,2828
9	2,70	3,8178
10	0,10	0,1414
11	3,10	4,3834
12	0,20	0,2828
13	1,70	2,4038
14	0,10	0,1414
15	0,90	1,2726
16	0,10	0,1414
17	0,80	1,1312
18	0,10	0,1414
19	0,40	0,5656
20	0,10	0,1414
21	0,30	0,4242
22	0,10	0,1414
23	0,50	0,707
24	0,10	0,1414
25	0,60	0,8484
26	0,10	0,1414
27	0,50	0,707
28	0,10	0,1414
29	0,20	0,2828
30	0,10	0,1414
31	0,10	0,1414
32	0,10	0,1414
33	0,30	0,4242
34	0,10	0,1414
35	0,20	0,2828
36	0,10	0,1414
37	0,10	0,1414
38	0,00	0
39	0,20	0,2828
40	0,00	0
$\sum_{h=1}^{h=\infty}$	121,51	171,82

Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:

- Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
- Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.

2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

© Hak Cipta milik UIN Suska Riau
Tabel B12. Data Nilai Perhitungan THDF Fasa T Setelah di Filter

Orde	Arus RMS	Arus Puncak
1	79,40	112,2716
2	0,60	0,8484
3	8,00	11,312
4	0,30	0,4242
5	12,23	17,29322
6	0,20	0,2828
7	7,60	10,7464
8	0,10	0,1414
9	2,40	3,3936
10	0,10	0,1414
11	1,90	2,6866
12	0,20	0,2828
13	1,10	1,5554
14	0,10	0,1414
15	0,50	0,707
16	0,10	0,1414
17	1,60	2,2624
18	0,00	0
19	0,30	0,4242
20	0,10	0,1414
21	0,10	0,1414
22	0,10	0,1414
23	0,50	0,707
24	0,10	0,1414
25	0,50	0,707
26	0,10	0,1414
27	0,10	0,1414
28	0,10	0,1414
29	0,20	0,2828
30	0,10	0,1414
31	0,10	0,1414
32	0,10	0,1414
33	0,10	0,1414
34	0,00	0
35	0,30	0,4242
36	0,00	0
37	0,20	0,2828
38	0,10	0,1414
39	0,10	0,1414
40	0,00	0
$\sum_{h>1}^{h=\infty}$	119,73	169,30

Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:

- Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
- Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.

2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

LAMPIRAN C

Data Nilai Perhitungan *Losses* Trafo Sebelum dan Sesudah di Filter

Tabel C1. Data Nilai *Losses* Fasa R Sebelum di Filter

Orde	Arus RMS	$i_h(pu)$	$i_h^2(pu)$	$i_h^2 \times h^2(pu)$
1	98,60	1	1	1
2	0,70	0,007099391	0,000050	0,000201605
3	11,40	0,115618661	0,013368	0,120309073
4	0,40	0,004056795	0,000016	0,000263321
5	11,40	0,115618661	0,013368	0,334191871
6	0,30	0,003042596	0,000009	0,000333266
7	5,60	0,056795132	0,003226	0,158058663
8	0,20	0,002028398	0,000004	0,000263321
9	3,00	0,030425963	0,000926	0,07498488
10	0,20	0,002028398	0,000004	0,00041144
11	4,20	0,042596349	0,001814	0,219548322
12	0,20	0,002028398	0,000004	0,000592473
13	2,30	0,023326572	0,000544	0,091957795
14	0,20	0,002028398	0,000004	0,000806422
15	1,10	0,011156187	0,000124	0,028003612
16	0,10	0,001014199	0,000001	0,000263321
17	2,00	0,020283976	0,000411	0,118906064
18	0,10	0,001014199	0,000001	0,000333266
19	0,30	0,003042596	0,000009	0,003341919
20	0,20	0,002028398	0,000004	0,001645759
21	0,60	0,006085193	0,000037	0,01633004
22	0,10	0,001014199	0,000001	0,000497842
23	1,00	0,010141988	0,000103	0,054412896
24	0,10	0,001014199	0,000001	0,000592473
25	0,90	0,009127789	0,000083	0,052072833
26	0,10	0,001014199	0,000001	0,000695333
27	0,40	0,004056795	0,000016	0,011997581
28	0,00	0,000000000	0,000000	0
29	0,30	0,003042596	0,000009	0,007785467
30	0,10	0,001014199	0,000001	0,000925739
31	0,10	0,001014199	0,000001	0,000988484
32	0,00	0,000000000	0,000000	0
33	0,20	0,002028398	0,000004	0,004480578
34	0,10	0,001014199	0,000001	0,001189061
35	0,10	0,001014199	0,000001	0,001260034
36	0,00	0,000000000	0,000000	0
37	0,20	0,002028398	0,000004	0,005632609
38	0,00	0,000000000	0,000000	0
39	0,10	0,001014199	0,000001	0,001564499
40	0,00	0,000000000	0,000000	0
$\sum_{h=1}^{h=\infty}$		0,489858012	0,034155	1,314841863

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

Tabel C2. Data Nilai *Losses* Fasa S Sebelum di Filter

Orde	Arus <i>RMS</i>	$i_h(pu)$	$i_h^2(pu)$	$i_h^2 \times h^2(pu)$
1	75,70	1	1	1
2	1,30	0,017173052	0,000295	0,001179655
3	10,70	0,141347424	0,019979	0,179811849
4	0,30	0,003963012	0,000016	0,000251287
5	12,80	0,169088507	0,028591	0,714773082
6	0,50	0,00660502	0,000044	0,001570546
7	7,10	0,093791281	0,008797	0,431043419
8	0,20	0,002642008	0,000007	0,000446733
9	2,70	0,035667107	0,001272	0,103043544
10	0,10	0,001321004	0,000002	0,000174505
11	3,10	0,040951123	0,001677	0,20291633
12	0,20	0,002642008	0,000007	0,00100515
13	1,70	0,022457067	0,000504	0,085230059
14	0,10	0,001321004	0,000002	0,00034203
15	0,90	0,011889036	0,000141	0,031803563
16	0,10	0,001321004	0,000002	0,000446733
17	0,80	0,010568032	0,000112	0,032276472
18	0,10	0,001321004	0,000002	0,000565397
19	0,40	0,005284016	0,000028	0,010079417
20	0,10	0,001321004	0,000002	0,000698021
21	0,30	0,003963012	0,000016	0,006926109
22	0,10	0,001321004	0,000002	0,000844605
23	0,50	0,00660502	0,000044	0,023078306
24	0,10	0,001321004	0,000002	0,00100515
25	0,60	0,007926024	0,000063	0,039263658
26	0,10	0,001321004	0,000002	0,001179655
27	0,50	0,00660502	0,000044	0,031803563
28	0,10	0,001321004	0,000002	0,00136812
29	0,20	0,002642008	0,000007	0,005870353
30	0,10	0,001321004	0,000002	0,001570546
31	0,10	0,001321004	0,000002	0,001676994
32	0,10	0,001321004	0,000002	0,001786933
33	0,30	0,003963012	0,000016	0,017103249
34	0,10	0,001321004	0,000002	0,002017279
35	0,20	0,002642008	0,000007	0,008550752
36	0,10	0,001321004	0,000002	0,002261587
37	0,10	0,001321004	0,000002	0,002388975
38	0,00	0	0,000000	0
39	0,20	0,002642008	0,000007	0,010616893
40	0,00	0	0,000000	0
$\sum_{h=1}^{h=\infty}$		0,620871863	0,061698	1,956970521

- Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
 2. Dilarang mengumpukan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

© Hak Cipta milik UIN Suska Riau
Tabel C3. Data Nilai Losses Fasa T Sebelum di Filter

Orde	Arus <i>RMS</i>	$i_h(pu)$	$i_h^2(pu)$	$i_h^2 \times h^2(pu)$
1	79,40	1	1	1
2	0,60	0,007556675	0,000057	0,000228413
3	8,00	0,100755668	0,010152	0,091365341
4	0,30	0,003778338	0,000014	0,000228413
5	13,70	0,172544081	0,029771	0,744286494
6	0,20	0,002518892	0,000006	0,000228413
7	7,60	0,095717884	0,009162	0,448933754
8	0,10	0,001259446	0,000002	0,000101517
9	2,40	0,0302267	0,000914	0,074005926
10	0,10	0,001259446	0,000002	0,00015862
11	1,90	0,023929471	0,000573	0,06928697
12	0,20	0,002518892	0,000006	0,000913653
13	1,10	0,013853904	0,000192	0,032436282
14	0,10	0,001259446	0,000002	0,000310896
15	0,50	0,006297229	0,000040	0,008922397
16	0,10	0,001259446	0,000002	0,000406068
17	1,60	0,020151134	0,000406	0,117353704
18	0,00	0	0,000000	0
19	0,30	0,003778338	0,000014	0,005153576
20	0,10	0,001259446	0,000002	0,000634482
21	0,10	0,001259446	0,000002	0,000699516
22	0,10	0,001259446	0,000002	0,000767723
23	0,50	0,006297229	0,000040	0,020977546
24	0,10	0,001259446	0,000002	0,000913653
25	0,50	0,006297229	0,000040	0,024784435
26	0,10	0,001259446	0,000002	0,001072274
27	0,10	0,001259446	0,000002	0,001156343
28	0,10	0,001259446	0,000002	0,001243584
29	0,20	0,002518892	0,000006	0,00533599
30	0,10	0,001259446	0,000002	0,001427583
31	0,10	0,001259446	0,000002	0,001524342
32	0,10	0,001259446	0,000002	0,001624273
33	0,10	0,001259446	0,000002	0,001727376
34	0,00	0	0,000000	0
35	0,30	0,003778338	0,000014	0,017487897
36	0,00	0	0,000000	0
37	0,20	0,002518892	0,000006	0,008686052
38	0,10	0,001259446	0,000002	0,002290478
39	0,10	0,001259446	0,000002	0,002412616
40	0,00	0	0,000000	0
$\sum_{h>1}^{h=\infty}$		0,526448363	0,051441	1,6890866

- Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
 2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

Tabel C4. Data Nilai *Losses* Fasa R Setelah di Filter

Orde	Arus <i>RMS</i>	$i_h(pu)$	$i_h^2(pu)$	$i_h^2 \times h^2(pu)$
1	98,60	1	1	1
2	0,70	0,007099391	0,000050	0,000201605
3	11,40	0,115618661	0,013368	0,120309073
4	0,40	0,004056795	0,000016	0,000263321
5	10,29	0,104361055	0,010891	0,272280744
6	0,30	0,003042596	0,000009	0,000333266
7	5,60	0,056795132	0,003226	0,158058663
8	0,20	0,002028398	0,000004	0,000263321
9	3,00	0,030425963	0,000926	0,07498488
10	0,20	0,002028398	0,000004	0,00041144
11	4,20	0,042596349	0,001814	0,219548322
12	0,20	0,002028398	0,000004	0,000592473
13	2,30	0,023326572	0,000544	0,091957795
14	0,20	0,002028398	0,000004	0,000806422
15	1,10	0,011156187	0,000124	0,028003612
16	0,10	0,001014199	0,000001	0,000263321
17	2,00	0,020283976	0,000411	0,118906064
18	0,10	0,001014199	0,000001	0,000333266
19	0,30	0,003042596	0,000009	0,003341919
20	0,20	0,002028398	0,000004	0,001645759
21	0,60	0,006085193	0,000037	0,01633004
22	0,10	0,001014199	0,000001	0,000497842
23	1,00	0,010141988	0,000103	0,054412896
24	0,10	0,001014199	0,000001	0,000592473
25	0,90	0,009127789	0,000083	0,052072833
26	0,10	0,001014199	0,000001	0,000695333
27	0,40	0,004056795	0,000016	0,011997581
28	0,00	0,000000000	0,000000	0
29	0,30	0,003042596	0,000009	0,007785467
30	0,10	0,001014199	0,000001	0,000925739
31	0,10	0,001014199	0,000001	0,000988484
32	0,00	0,000000000	0,000000	0
33	0,20	0,002028398	0,000004	0,004480578
34	0,10	0,001014199	0,000001	0,001189061
35	0,10	0,001014199	0,000001	0,001260034
36	0,00	0,000000000	0,000000	0
37	0,20	0,002028398	0,000004	0,005632609
38	0,00	0,000000000	0,000000	0
39	0,10	0,001014199	0,000001	0,001564499
40	0,00	0,000000000	0,000000	0
$\sum_{h=1}^{h=\infty}$		0,478600406	0,031678	1,252930736

Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

© Ha cipta mi ik UIN Suska Riau State Islamic University of Sultan Syarif Kasim Riau

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

© Hak Cipta milik UIN Suska Riau
Tabel C5. Data Nilai Losses Fasa S Setelah di Filter

Orde	Arus <i>RMS</i>	$i_h(pu)$	$i_h^2(pu)$	$i_h^2 \times h^2(pu)$
1	75,70	1	1	1
2	1,30	0,017173052	0,000295	0,001179655
3	10,70	0,141347424	0,019979	0,179811849
4	0,30	0,003963012	0,000016	0,000251287
5	11,61	0,15336856	0,023522	0,588047881
6	0,50	0,00660502	0,000044	0,001570546
7	7,10	0,093791281	0,008797	0,431043419
8	0,20	0,002642008	0,000007	0,000446733
9	2,70	0,035667107	0,001272	0,103043544
10	0,10	0,001321004	0,000002	0,000174505
11	3,10	0,040951123	0,001677	0,20291633
12	0,20	0,002642008	0,000007	0,00100515
13	1,70	0,022457067	0,000504	0,085230059
14	0,10	0,001321004	0,000002	0,00034203
15	0,90	0,011889036	0,000141	0,031803563
16	0,10	0,001321004	0,000002	0,000446733
17	0,80	0,010568032	0,000112	0,032276472
18	0,10	0,001321004	0,000002	0,000565397
19	0,40	0,005284016	0,000028	0,010079417
20	0,10	0,001321004	0,000002	0,000698021
21	0,30	0,003963012	0,000016	0,006926109
22	0,10	0,001321004	0,000002	0,000844605
23	0,50	0,00660502	0,000044	0,023078306
24	0,10	0,001321004	0,000002	0,00100515
25	0,60	0,007926024	0,000063	0,039263658
26	0,10	0,001321004	0,000002	0,001179655
27	0,50	0,00660502	0,000044	0,031803563
28	0,10	0,001321004	0,000002	0,00136812
29	0,20	0,002642008	0,000007	0,005870353
30	0,10	0,001321004	0,000002	0,001570546
31	0,10	0,001321004	0,000002	0,001676994
32	0,10	0,001321004	0,000002	0,001786933
33	0,30	0,003963012	0,000016	0,017103249
34	0,10	0,001321004	0,000002	0,002017279
35	0,20	0,002642008	0,000007	0,008550752
36	0,10	0,001321004	0,000002	0,002261587
37	0,10	0,001321004	0,000002	0,002388975
38	0,00	0	0,000000	0
39	0,20	0,002642008	0,000007	0,010616893
40	0,00	0	0,000000	0
$\sum_{h=1}^{h=\infty}$		0,605151915	0,056629	1,830245319

- Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
 2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

Tabel C6. Data Nilai *Losses* Fasa T Setelah di Filter

Orde	Arus <i>RMS</i>	$i_h(pu)$	$i_h^2(pu)$	$i_h^2 \times h^2(pu)$
1	79,40	1	1	1
2	0,60	0,007556675	0,000057	0,000228413
3	8,00	0,100755668	0,010152	0,091365341
4	0,30	0,003778338	0,000014	0,000228413
5	12,23	0,154030227	0,023725	0,593132768
6	0,20	0,002518892	0,000006	0,000228413
7	7,60	0,095717884	0,009162	0,448933754
8	0,10	0,001259446	0,000002	0,000101517
9	2,40	0,0302267	0,000914	0,074005926
10	0,10	0,001259446	0,000002	0,00015862
11	1,90	0,023929471	0,000573	0,06928697
12	0,20	0,002518892	0,000006	0,000913653
13	1,10	0,013853904	0,000192	0,032436282
14	0,10	0,001259446	0,000002	0,000310896
15	0,50	0,006297229	0,000040	0,008922397
16	0,10	0,001259446	0,000002	0,000406068
17	1,60	0,020151134	0,000406	0,117353704
18	0,00	0	0,000000	0
19	0,30	0,003778338	0,000014	0,005153576
20	0,10	0,001259446	0,000002	0,000634482
21	0,10	0,001259446	0,000002	0,000699516
22	0,10	0,001259446	0,000002	0,000767723
23	0,50	0,006297229	0,000040	0,020977546
24	0,10	0,001259446	0,000002	0,000913653
25	0,50	0,006297229	0,000040	0,024784435
26	0,10	0,001259446	0,000002	0,001072274
27	0,10	0,001259446	0,000002	0,001156343
28	0,10	0,001259446	0,000002	0,001243584
29	0,20	0,002518892	0,000006	0,00533599
30	0,10	0,001259446	0,000002	0,001427583
31	0,10	0,001259446	0,000002	0,001524342
32	0,10	0,001259446	0,000002	0,001624273
33	0,10	0,001259446	0,000002	0,001727376
34	0,00	0	0,000000	0
35	0,30	0,003778338	0,000014	0,017487897
36	0,00	0	0,000000	0
37	0,20	0,002518892	0,000006	0,008686052
38	0,10	0,001259446	0,000002	0,002290478
39	0,10	0,001259446	0,000002	0,002412616
40	0,00	0	0,000000	0
$\sum_{h>1}^{h=\infty}$		0,507934509	0,045394	1,537932875

Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

© Ha cipta mi ik UIN Suska Riau State Islamic University of Sultan Syarif Kasim Riau

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

DAFTAR RIWAYAT HIDUP



Herly Syahputra lahir di Batam pada 9 Agustus 2003 sebagai putra tunggal dari Bapak Zainal Abidin dan Ibu Yumin. Saat ini, ia berdomisili di Tanjung Teritip Blok B No. 43, RT 02 RW 11, Kelurahan Tanjung Uma, Kecamatan Lubuk Baja, Kota Batam.

Perjalanan pendidikannya dimulai di TK Restu Ibu (2009–2010), kemudian menempuh pendidikan dasar di SD Restu Ibu (2010–2011) sebelum akhirnya berpindah ke MI Al-Muttaqin hingga lulus pada 2016. Ia melanjutkan studi ke MTsN 1 Batam (2016–2019) dan MAN 1 Batam (2019–2022).

Pendidikan tingginya diselesaikan di Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Sains dan Teknologi, UIN Sultan Syarif Kasim Riau. Ia berhasil lulus pada tahun 2026 dengan predikat *cum laude*. Dalam tugas akhirnya, Herly menyusun penelitian berjudul “Analisis dan Perancangan *Single Tuned Passive Filter* Untuk Mitigasi Distorsi Harmonisa Pada Transformator Distribusi”.

No HP : 0815 3744 5187

Email : herlysyahputra090803@gmail.com

© Hak c

Suska Riau

State Islamic University of Sultan Syarif Kasim Riau

Hak Cipta Diindungi Undang-Undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.