

TUGAS AKHIR - EE 184801

**PENGARUH JENIS BEBAN TERHADAP FAKTOR-K PADA
TRANSFORMATOR BERBASIS ANALISA HARMONISA DI
PLN ULP RUNGKUT**

Agus Prawira Kusuma
NRP 0711154000025

Dosen Pembimbing
Danar Fahmi, ST., MT.
I Gusti Ngurah Satriyadi Hernanda, ST., MT.

DEPATERMEN TEKNIK ELEKTRO
Fakultas Teknologi Elektro dan Informatika Cerdas
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2020



TUGAS AKHIR - EE 184801

**PENGARUH JENIS BEBAN TERHADAP FAKTOR-K PADA
TRANSFORMATOR BERBASIS ANALISA HARMONISA DI
PLN ULP RUNGKUT**

Agus Prawira Kusuma
NRP 0711154000025

Dosen Pembimbing
Danar Fahmi, ST., MT.
I Gusti Ngurah Satriyadi Hernanda, ST., MT.

DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO
Fakultas Teknologi Elektro dan Informatika Cerdas
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2020



FINAL PROJECT - EE 184801

***INFLUENCE OF LOAD TYPE TO K FACTORS OF
TRANSFORMER BASED ON HARMONIC ANALISYS AT
PLN ULP RUNGKUT***

Agus Prawira Kusuma
NRP 0711154000025

Supervisor(s)
Danar Fahmi, ST., MT.
I Gusti Ngurah Satriyadi Hernanda, ST., MT.

ELECTRICAL ENGINEERING DEPARTMENT
Faculty of Intelligent Electrical and Informatics Technology
Sepuluh Nopember Institute of Technology
Surabaya 2020

PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR

Dengan ini saya menyatakan bahwa isi sebagian maupun keseluruhan Tugas Akhir saya dengan judul "**Pengaruh Jenis Beban Terhadap Faktor-k pada Transformator Berbasis Analisa Harmonisa di PLN ULP Rungkut**" adalah benar-benar hasil karya intelektual mandiri, diselesaikan tanpa menggunakan bahan-bahan yang tidak diijinkan dan bukan merupakan karya pihak lain yang saya akui sebagai karya sendiri.

Semua referensi yang dikutip maupun dirujuk telah ditulis secara lengkap pada daftar pustaka. Apabila ternyata pernyataan ini tidak benar, saya bersedia menerima sanksi sesuai peraturan yang berlaku.

Surabaya, Januari 2020



Agus Prawira Kusuma
NRP. 0711 15 4000 0025

PENGARUH JENIS BEBAN TERHADAP FAKTOR-K PADA TRANSFORMATOR BERBASIS ANALISA HARMONISA DI PLN ULP RUNGKUT

TUGAS AKHIR

Diajukan Guna Memenuhi Sebagian Persyaratan
Untuk Memperoleh Gelar Sarjana Teknik

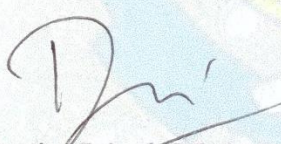
Pada

Bidang Studi Teknik Sistem Tenaga
Departemen Teknik Elektro
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Menyetujui:

Dosen Pembimbing I

Dosen Pembimbing II


Daniar Fahmi, ST., MT.

NIP. 19890925 201404 1002


IGN Satriyadi Hernanda, ST., MT.

NIP. 19730123 200212 1001



PENGARUH JENIS BEBAN TERHADAP FAKTOR-K PADA TRANSFORMATOR BERBASIS ANALISA HARMONISA DI PLN ULP RUNGKUT

Nama : Agus Prawira Kusuma
NRP : 0711154000025
Pembimbing I : Daniar Fahmi, ST., MT.
Pembimbing II : IGN Satriyadi Hernanda, ST., MT.

ABSTRAK

Faktor-k adalah salah satu akibat dari adanya arus harmonisa yang menyebabkan panas yang berlebih pada transformator. Transformator khusus dirancang untuk digunakan pada beban non-linier dengan standar *K-factor rating* tertentu. Ketika faktor-k melebihi standar, *K-rated transformer* atau *derate a standard transformer* menjadi perlu untuk digunakan. Berdasarkan IEEE C57.100-1986.

Tetapi dalam pelaksanaannya, pemasangan transformator distribusi di PLN ULP Rungkut tidak memperhitungkan nilai dari *derating factors* yang dapat mempengaruhi kualitas atau umur dari transformator tersebut. Oleh karena itu, Pada tugas akhir ini dilakukan analisis pada transformator dengan tiga jenis beban yaitu rumah tangga, bisnis, dan industri yang memberikan hasil seberapa besar pengaruh perbedaan jenis beban terhadap harmonisa dan nilai faktor-k pada transformator distribusi. Karakteristik pengukuran THD Arus dan tegangan pada waktu beban puncak (WBP) juga akan dibandingkan dengan standar IEEE.

Hasil Pengukuran dan analisis THD arus dan tegangan di waktu beban puncak (WBP) pada setiap jenis beban sesuai dengan standar IEEE 519 “*IEEE Recommended Practices and Requirement for harmonic Control in electric in Electrical Power System*“, kecuali pada Transformator BE 554 Fasa S tidak sesuai standar dengan nilai THD arus 16,83%.

Nilai Faktor-k yang telah dihitung untuk ketiga fasa menunjukkan bahwa jenis pelanggan rumah tangga dan bisnis memiliki

tren data faktor-k yang tertinggi. Hal tersebut menyebabkan, jenis pelanggan rumah tangga, bisnis, dan industri sangat mempengaruhi nilai faktor-k. Dari hasil perhitungan *derating factor* (D), kapasitas transformator distribusi yang terpasang sudah sesuai karena pembebanan transformator tidak melebihi pembebanan yang dianjurkan. Hal ini menunjukkan transformator tersebut masih aman digunakan sehingga *uprating* transformator tidak diperlukan. Namun data tersebut bisa dijadikan acuan apabila terjadi pertumbuhan jumlah beban dikemudian hari.

Kata kunci: Faktor-k, THD, Transformator, *Derating factor*, Kapasitas

INFLUENCE OF LOAD TYPE TO K FACTORS OF TRANSFORMER BASED ON HARMONIC ANALISYS AT PLN ULP RUNGKUT

Name : Agus Prawira Kusuma
NRP : 0711154000025
Supervisor I : Daniar Fahmi, ST., MT.
Supervisor II : IGN Satriyadi Hernanda, ST., MT.

ABSTRACT

The k-factor is one of the cause of harmonic currents that emerge overheating in the transformer. A Special transformer is designed to be used at non-linear loads with certain K-factor rating standards. When the k-factor exceeds the standard, a K-rated transformer or a derated standard transformer becomes necessary to use. Based on IEEE C57.100-1986.

However, in its implementation, the installation of the distribution transformer at PLN ULP Rungkut has not determined the value of the derating factor that can affect the quality or life of the transformer. Therefore, in this Final Project, an analysis is carried out on the transformer with three types of load which are household, business, and industry which give significant results regarding to the different types of load on harmonics and the k-factor value of the distribution transformer. THD in voltage and current measurement characteristics at peak load time (PLT) will also be compared with IEEE standards.

Measurement results and analysis of THD of current and voltage for each type of load at peak load times (PLT) are still in accordance with the IEEE standard 519 "IEEE Practical Recommendations and requirements for harmonic control in electricity in the Electric Power System ", except for the BE 554 Phase S Transformer, it is not in accordance with the standard THD current value of 16.83%.

The k-factor value which has been calculated for three phases shows that the type of household and business load has the highest k-factor data trend. This causes, the type of household, business, and industry customer greatly determines the k-factor value. From the calculation of the derating factor (D), the distribution transformer capacity installed is compatible with the loading of the transformer and

not exceeding the recommended on-load capacity. This shows that the transformer is on safe condition to use so the uprating transformer is unnecessary. However, this data can be aimed for expenses that occur today.

Keywords: K-factor, THD, Transformer, Derating factor, Capacity

KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan kepada Tuhan Yang Maha Esa karena atas berkat-Nya, penelitian dan penulisan tugas akhir dengan judul **“PENGARUH JENIS BEBAN TERHADAP FAKTOR-K PADA TRANSFORMATOR BERBASIS ANALISA HARMONISA DI PLN ULP RUNGKUT”** ini dapat diselesaikan dengan baik. Selama melaksanakan tugas akhir ini baik saat melakukan Pengukuran beban dan Harmonisa di PHBTR, pengolahan data maupun penyusunan buku tugas akhir ini banyak kendala, hambatan, dan rintangan yang penulis alami. Akan tetapi banyak pihak yang telah membantu penulis untuk menghadapi semua rintangan tersebut. Tanpa dukungan mereka, sangat sulit bagi penulis untuk menyelesaikan laporan tugas akhir ini. Dan kesempatan kali ini, penulis ingin menyampaikan ucapan terima kasih, diantaranya:

1. Kepada kedua Orang tua tercinta, Mas teja, dan Dek Tri selaku saudara kandung kandung serta seluruh anggota keluarga yang selalu memberikan dukungan, semangat, dan do'a kepada penulis.
2. Bapak Daniar Fahmi, ST., MT., dan IGN Satriyadi Hernanda, ST., MT. selaku dosen pembimbing I dan II, yang telah memberikan banyak ilmu, arahan, dan motivasi dalam pengerjaan tugas akhir ini.
3. Seluruh dosen-dosen Departemen Teknik Elektro, terkhusus untuk Bapak Dr.Eng I Made Yulistya Negara, S.T., M.Sc. dan Bapak Dimas Anton Asfani, S.T., M.T., Ph.D. Selaku Kepala dan Dosen di Laboratorium Tegangan Tinggi yang telah memberikan ilmu dan bantuan kepada penulis.
4. Bapak Donna Chandra W W, selaku manager PT PLN ULP Rungkut yang telah banyak membantu dalam perizinan dan fasilitas selama pengambilan data.
5. Kepada Mas Rahmat, Mas Bayu, Mas Andre selaku supervisor TE, PP, dan Teknik serta Kepada Seluruh Karyawan PLN ULP Rungkut yang tidak bisa saya sebutkan satu persatu.

6. Seluruh Karyawan dan Tim YANTEK PLN ULP Rungkut yaitu Pak Kholis, Pak Herman, Mas Sugi, Mas Samid yang telah membantu melakukan pengambilan data.
7. Seluruh Adik-adik angkatan saya Selaku asisten Laboratorium Tegangan Tinggi yang telah banyak membantu penulis untuk mengerjakan seluruh tugas akhir.
8. Seluruh sobat ‘Sakinah Squad’ yang selalu menyemangati penulis (Ekal, shani, kosar, Molana, Fajri, Bayak, Arief, Miku, Ocha, Ferdy).
9. Sahabat-Sahabat dari SMP (Apis, Ayed, Fara, Putri) dan SMA (Fatan, Insanul, Kadet, Suri, Putroe, Dhea, Uje, Farli) saya yang selalu mengingatkan untuk jangan lalai dan selalu fokus untuk menyelesaikan tugas akhir ini.

Penulis sadar bahwa tugas akhir ini masih belum sempurna dan masih banyak hal yang harus diperbaiki. Saran, kritik dan masukan baik dari seluruh pihak sangatlah membantu penulis terutama untuk berbagai kemungkinan pengembangan lebih lanjut, terima kasih.

Surabaya, Januari 2020

Penulis

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	
PERNYATAAN KEASLIAN	
HALAMAN PENGESAHAN	
ABSTRAK	i
ABSTRACT	iii
KATA PENGANTAR	v
DAFTAR ISI	vii
DAFTAR GAMBAR	xi
DAFTAR TABEL	xiii
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	2
1.3 Tujuan Penelitian.....	2
1.4 Batasan Masalah.....	2
1.5 Metodologi Penelitian.....	3
1.6 Sistematika Penulisan	4
1.7 Relevansi.....	5
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	7
2.1 Transformator.....	7
2.1.1 Bagian – Bagian Trnsformator.....	7
2.1.2 Prinsip Kerja Transformator	9
2.1.3 Jenis – jenis Transformator.....	10
2.2 Transformator Distribusi.....	10
2.3 Pembebanan Transformator	14
2.3.1 Klasifikasi Pembebanan Transformator	14
2.3.2 Kondisi Pembebanan Transformator.....	15
2.3.3 Karakteristik Beban Transformator.....	16
2.4 Rugi – Rugi (Susut) Pada Transformator	18
2.5 Harmonisa	18
2.5.1 Total Harmonic Distortion (THD)	20
2.5.2 Faktor-K.....	21
2.5.2 Perhitungan <i>Derating Factor</i> (D).....	21
2.6 Perhitungan arus hubung singkat pada penyulang	22
2.6.1 Perhitungan Arus Hubung Singkat (Isc) 3 fasa.....	22

2.6.2	Perhitungan Arus Hubung Singkat (Isc) 1 fasa ke tanah .	24
2.7	Rangkaian Ekvivalen <i>Thevenin</i>	24
2.7.1	Menentukan Impedansi Sumber	26
2.7.2	Menentukan Impedansi Transformator	27
2.7.3	Menentukan Impedansi Penyulang	28
2.7.4	Menentukan Impedansi Ekvivalen Penyulang	28
BAB III	RANCANGAN PENELITIAN	29
3.1	Waktu Dan Lokasi Penelitian	29
3.2	Alur Penelitian	29
3.2.1	Pengumpulan Data	29
3.2.2	Survey Lapangan dan Pencocokan data Transformator distribusi	31
3.2.3	Pengukuran Beban Harian dan Harmonisa	31
3.2.4	Analisis Karakteristik harmonisa pada setiap Jenis Beban	31
3.2.5	Perhitungan nilai Faktor-K dan Derating Faktor	34
3.2.6	Analisis Hasil Perhitungan <i>Derating factor</i> (D) dan Evaluasi Kapasitas Transformator yang Terpasang	35
3.2.7	Pembuatan Laporan	35
BAB IV	HASIL DAN ANALISIS DATA	36
4.1	Hasil Pengukuran Beban Harian dan Harmonisa	37
4.1.1	Hasil Pengukuran Beban dan Harmonisa Rumah Tangga	37
4.1.1.1	Pengukuran Beban harian	37
4.1.1.2	Pengukuran Harmonisa Tegangan dan Arus	43
4.1.2	Hasil Pengukuran Beban dan Harmonisa Beban Bisnis	46
4.1.2.1	Pengukuran Beban Harian	46
4.1.2.2	Hasil Pengukuran Harmonisa Tegangan dan Arus	52
4.1.3	Hasil Pengukuran Beban dan Harmonisa Industri	56
4.1.3.1	Pengukuran Beban harian	56
4.1.3.2	Hasil Pengukuran Harmonisa Tegangan dan Arus	62
4.2	Hasil Analisis Pungukuran Harmonisa	66
4.2.1	Perhitungan Arus Hubung Singkat (Isc) pada penyulang	66

4.2.1.1 Perhitungan Arus Hubung Singkat Penyulang Pondok Chandra	66
4.2.1.1.1 Perhitungan Impedansi Setiap Trafo	66
4.2.1.1.2 Perhitungan Arus Hubung Singkat Setiap Trafo di Penyulang Pondok Chandra.....	68
4.2.1.2 Perhitungan Arus Hubung Singkat Penyulang Zamhuri	69
4.2.1.2.1 Perhitungan Impedansi Setiap Trafo	69
4.2.1.2.2 Perhitungan Arus Hubung Singkat Setiap Trafo di Penyulang Zamhuri	70
4.2.1.3 Perhitungan Arus Hubung Singkat Penyulang SUIK71	
4.2.1.3.1 Perhitungan Impedansi Setiap Trafo	71
4.2.1.3.2 Perhitungan Arus Hubung Singkat Setiap Trafo di Penyulang SUIK	72
4.2.2 Hasil Analisis Pengukuran THD Arus	73
4.2.3 Hasil Analisis Pengukuran THD Tegangan.....	75
4.3 Analisis Hasil Perhitungan Nilai Faktor K	76
4.4 Analisis Evaluasi Kapasitas Transformator yang Terpasang 79	
4.4.1 Perhitungan <i>Derating Factor</i> (D).....	80
4.4.2 Analisis Hasil Evaluasi Transformator Yang Terpasang	81
BAB V PENUTUP	85
5.1 Kesimpulan	85
5.2 Saran	86
DAFTAR PUSTAKA	87
LAMPIRAN	89
BIOGRAFI PENULIS	93

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Bagian – Bagian Transformator	7
Gambar 2.2	Inti Besi Transformator	8
Gambar 2.3	Belitan Transformator	9
Gambar 2.4	Gardu Cantol.....	11
Gambar 2.5	Gardu Portal.....	12
Gambar 2.6	Gardu Beton.....	13
Gambar 2.7	PHB-TM.....	13
Gambar 2.8	PHB-TR.....	14
Gambar 2.9	Kurva Beban dan Rugi Transformator	16
Gambar 2.10	Kurva Beban Transformator Distribusi	17
Gambar 2.11	Rangkaian Ekuivalen Transformator	18
Gambar 2.12	Arus yang Terdistorsi Karena Beban Non linier[8]	19
Gambar 2.13	Gelombang Fundamental yang Terdistorsi Harmonisa Orde ke-3	20
Gambar 2.14	Sumber dan Impedansi 3 Fasa Seimbang.....	23
Gambar 2.15	Gangguan Saluran Ke Netral Pada Fasa.....	24
Gambar 2.16	Model Rangkaian Ekuivalen Thevenin	25
Gambar 2.17	Ilustrasi Penyulang Tegangan Menengah	26
Gambar 3.1	Alur Penelitian	30
Gambar 3.2	SLD Penyulang Pondok Chandra	32
Gambar 3.3	SLD Penyulang Zamhuri.....	33
Gambar 3.4	SLD Penyulang Sumber SUIK	34
Gambar 3.5	Fluke 430-II <i>power quality analyzer</i>	35
Gambar 4.1	Karakteristik Pembebanan harian Gardu Distribusi BE 376.....	39
Gambar 4.2	Karakteristik Pembebanan harian Gardu Distribusi BE 554.....	41
Gambar 4.3	Karakteristik Pembebanan harian Gardu Distribusi BE 549.....	42
Gambar 4.4	Karakteristik Pembebanan harian Gardu Distribusi BE 1107.....	48
Gambar 4.5	Karakteristik Pembebanan harian Gardu Distribusi BE 807.....	50
Gambar 4.6	Karakteristik Pembebanan harian Gardu Distribusi BE 1846.....	52
Gambar 4.7	Karakteristik Pembebanan harian Gardu Distribusi BE	39.

Gambar 4.8	Karakteristik Pembebanan harian Gardu Distribusi BE 47	58
Gambar 4.9	Karakteristik Pembebanan harian Gardu Distribusi BE 50	60
Gambar 4.10	Nilai Faktor-k Fasa R Setiap Transformator	78
Gambar 4.11	Nilai Faktor-k Fasa S Setiap Transformator	78
Gambar 4.12	Grafik Nilai Faktor-k Fasa T Setiap Transformator	79
Gambar 4.13	Nilai Perhitungan <i>Derating Factor</i> Pada Setiap Jenis Beban	81

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1	Standar Harmonisa Arus IEEE 519	20
Tabel 2.2	Standar Harmonisa Tegangan IEEE 519.....	21
Tabel 4.1	Hasil Pengukuran Beban Harian Gardu Distribusi BE 376	37
Tabel 4.2	Hasil Pengukuran Beban Harian Gardu BE 554	39
Tabel 4.3	Hasil Pengukuran Beban Harian Gardu BE 549	41
Tabel 4.4	Hasil Pengukuran Harmonisa Transformator Gardu BE 376.	43
Tabel 4.5	Hasil Pengukuran Harmonisa Transformator Gardu BE 554.	44
Tabel 4.6	Hasil Pengukuran Harmonisa Transformator Gardu BE 549.	45
Tabel 4.7	Hasil Pengukuran Beban Harian Transformator Gardu BE 1107.....	47
Tabel 4.8	Hasil Pengukuran Beban Harian Transformator Gardu BE 807	49
Tabel 4.9	Hasil Pengukuran Beban Harian Gardu BE 1846	51
Tabel 4.10	Hasil Pengukuran Harmonisa Transformator Gardu BE 1107.....	53
Tabel 4.11	Hasil Pengukuran Harmonisa Transformator Gardu BE 807.	54
Tabel 4.12	Hasil Pengukuran Harmonisa Transformator Gardu BE 1846.....	55
Tabel 4.13	Hasil Pengukuran Beban Harian Gardu BE 39	56
Tabel 4.14	Hasil Pengukuran Beban Harian Gardu BE 47	58
Tabel 4.15	Hasil Pengukuran Beban Harian Gardu BE 50	60
Tabel 4.16	Hasil Pengukuran Harmonisa Transformator Gardu BE 39...	63
Tabel 4.17	Hasil Pengukuran Harmonisa Transformator Gardu BE 47...	64
Tabel 4.18	Hasil Pengukuran Harmonisa Transformator Gardu BE 50..	65
Tabel 4.19	Impedansi Total Setiap Trafo Pada Penyulang Pondok Chandra	68
Tabel 4.20	Arus Gangguan Tiga Fasa Pada Setiap Trafo Beban Rumah Tangga.....	68
Tabel 4.21	Impedansi Total Setiap Trafo Pada Penyulang Zamhuri....	70

Tabel 4.22	Arus Gangguan Tiga Fasa Pada Setiap Trafo Beban Bisnis ..	70
Tabel 4.23	Impedansi Total Setiap Trafo Pada Penyulang SUIK	72
Tabel 4.24	Arus Gangguan Tiga Fasa Pada Setiap Trafo Beban Industri	72
Tabel 4.25	Perbandingan Nilai Isc dan Ii Pada Setiap Jenis Beban	73
Tabel 4.26	Analisa THD Arus Pada Setiap Jenis Beban	74
Tabel 4.27	Analisa THD Tegangan Pada Setiap Jenis Beban	75
Tabel 4.28	Hasil Perhitungan Nilai Faktor-k Setiap Jenis Beban	76
Tabel 4.29	Hasil Perhitungan Nilai <i>Derating Factor</i> (D) Transformator	80
Tabel 4.30	Analisis Hasil Evaluasi Transforamtor Yang Terpasang	82

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Pemakaian peralatan listrik seperti komputer, mesin las, motor listrik, mesin foto kopi, dan beban lain yang tergolong sebagai beban non-linier merupakan sumber harmonisa. Jenis beban atau konsumen listrik seperti rumah tangga, industri, dan bisnis menggunakan peralatan listrik sumber beban non-linier yang berbeda-beda. Dampak yang ditimbulkan dari beban non-linier yaitu munculnya distorsi arus (Harmonisa) dapat mempengaruhi kinerja dari peralatan distribusi yang dilaluinya seperti kabel, *circuit breaker*, dan transformator distribusi[1]. Ketika transformator disuplai oleh beban non-linier, penurunan kapasitas transformator diperlukan untuk mengurangi panas berlebih yang berujung pada kegagalan isolasi dan penurunan umur transformator.

Faktor-k adalah salah satu akibat dari adanya arus harmonisa yang menyebabkan panas yang berlebih pada transformator. Semakin besar nilai faktor-k, semakin besar pula pemanasan yang terjadi akibat harmonisa[2]. Transformator khusus dirancang untuk digunakan pada beban non-linier dengan standar *K-factor rating* tertentu. Ketika faktor-k melebihi standar, *K-rated transformer* atau *derate a standard transformer* menjadi perlu untuk digunakan. Berdasarkan IEEE C57.100-1986, derating untuk standar *non-harmonic transformer* dapat dihitung dengan menggunakan metode dari IEEE C57.100-1986. Tetapi dalam pelaksanaannya, pemasangan transformator distribusi di PLN ULP rungkut tidak memperhitungkan nilai dari *derating factors* yang dapat mempengaruhi kualitas atau umur dari transformator tersebut.

Oleh karena itu, diperlukan analisis yang memberikan hasil seberapa besar pengaruh perbedaan jenis beban terhadap harmonisa dan nilai faktor-k pada transformator distribusi. Pada penelitian ini, akan dilakukan perhitungan nilai *derating factors* untuk menentukan rating transformator yang sesuai di PLN ULP Rungkut. Jenis beban atau konsumen yang akan diteliti adalah beban rumah tangga, industri, dan bisnis.

1.2 Rumusan Masalah

Penelitian tugas akhir ini menjawab perumusan masalah sebagai berikut:

1. Bagaimana mendapatkan nilai dan menganalisa *Total Harmonic Distortion* (THD) arus dan tegangan melalui pengukuran pada transformator?
2. Bagaimanana pengaruh jenis beban terhadap nilai faktor-k (K) transformator?
3. Bagaimana menentukan pembebanan transformator yang optimal dari hasil perhitungan *derating factor* berdasarkan jenis beban di PLN ULP Rungkut?

1.3 Tujuan Penelitian

Penelitian tugas akhir ini bertujuan untuk:

1. Mendapatkan nilai dan hasil analisa *Total Harmonic Distortion* (THD) arus dan tegangan melalui pengukuran pada transformator.
2. Mengetahui pengaruh jenis beban terhadap nilai faktor-k (K) transformator distribusi.
3. Mendapatkan perhitungan *derating factor* berdasarkan berdasarkan jenis beban untuk menentukan pembebanan transformator yang optimal di PLN ULP Rungkut.

1.4 Batasan Masalah

Batasan masalah dari tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Pengukuran *Total Harmonic Distortion* (THD) dilakukan menggunakan *power quality analyzer*, yaitu data tertinggi dari hasil pengukuran selama 24 jam.
2. Perhitungan Faktor-K dan *Derating factor* dilakukan menggunakan persamaan pada IEEE *Standard C57.110-1998*
3. Pengukuran dilakukan pada transformator distribusi 160 kVA di daerah operasi PT PLN (Persero) ULP Rungkut.
4. Jenis beban yang akan diukur adalah transformator yang membenani daerah rumah tangga, komersial/bisnis, dan industri

1.5 Metodologi Penelitian

Langkah-langkah yang dikerjakan pada tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Studi literatur

Studi literatur ini bertujuan sebagai penguasaan materi dalam Tugas Akhir ini. Pada tahap ini penulis mempelajari tentang harmonisa yang terjadi pada transformator distribusi, mulai dari penyebab timbulnya harmisa serta perhitungan faktor-k dan derating faktor pada transformator. Sumber yang digunakan berasal dari paper, jurnal, buku serta standard yang berlaku di PT PLN.

2. Menentukan Transformator yang akan Dianalisis

PT. PLN (Persero) ULP (Unit Layanan Pelanggan) Rungkut Merupakan salah satu daerah dengan penyulang terbanyak di distribusi jawa timur. Per agustus 2019, ULP rungkut memiliki 57 penyulang dengan ribuan transformator distribusi. Penentuan transformator distribusi dipilih menggunakan data pembebanan setiap semester di ULP dengan memperhatikan jenis beban yang disuplai oleh transformator tersebut yaitu rumah tangga, komersial/bisnis, dan industry. Selanjutnya dipilih transformator distribusi sebanyak 9 unit, yaitu terdiri dari 3 unit pada setiap jenis beban.

3. Pengukuran THD Transformator

Penulis melakukan pengukuran beban dan THD (orde 1 sampai orde 17) secara aktual menggunakan *power quality analyzer*. Pada tahap ini penulis melakukan pengukuran setiap 1 jam dalam periode waktu satu hari. Dari pengukuran tersebut didapatkan kurva pembebanan transformator dan karakteristik THD transformator tiap ordenya. Hasil dari pengukuran THD ini digunakan dalam perhitungan Faktor-K dan *derating factor*. THD arus dan tangan juga dibandingkan dengan standar harmonisa menurut IEEE.

4. Perhitungan Faktor-K dan *derating factor* Transformator

Penulis melakukan perhitungan susut Faktor-K dan *derating factor* pada transformator sesuai yang telah dipelajari pada studi literatur. Hasil perhitungan menunjukkan penurunan kapasitas dari transformator distribusi.

5. Analisis Data dan Kesimpulan

Hasil dari pengukuran dibandingkan dan dianalisis. Nilai THD

pada tiap jenis beban (rumah tangga, bisnis, industri) dibandingkan sehingga didapatkan karakteristik harmonisanya masing-masing. Nilai harmonisa dianalisa menggunakan standar dari IEEE. Hasil dari Perhitungan faktor-K dan *derating factor*, yaitu penurunan nilai rating pada transformator dibandingkan dengan hasil pengukuran waktu beban puncak. Dari hasil tersebut dapat ditarik kesimpulan yang menggambarkan karakteristik harmonisa transformator pada setiap jenis beban. Hasil dari penelitian ini juga digunakan sebagai bahan pertimbangan untuk menentukan kapasitas transformator pada gardu distribusi di PT. PLN (Persero) ULP Rungkut.

6. **Penyusunan Laporan Tugas Akhir**

Pada tahapan terakhir, penulis menyusun laporan tugas akhir berdasarkan progres yang telah dilaksanakan dan hasil perhitungan serta simulasi yang telah dilakukan.

1.6 Sistematika Penulisan

Dalam buku tugas akhir ini, pembahasan mengenai sistem yang dibuat terbagi menjadi 5 Bab dengan sistematika sebagai berikut:

- Bab I : Pendahuluan
Bab ini Meliputi penjelasan Latar belakang, rumusan masalah, batasan masalah, tujuan, metodologi, sistematika penulisan, dan relevansi
- Bab II : Tinjauan Pustaka
Bab ini menjelaskan tentang teori penunjang yang berkaitan dengan topic Tugas Akhir, serta penelitian sebelumnya yang terkait dengan topik Tugas Akhir. Teori Penunjang meliputi Transformator, Harmonisa, Efisiensi Transformator, Faktor-K dan lain-lain.
- Bab III : Rancangan Penelitian
Bab ini menjelaskan tentang langkah-langkah penelitian serta metode yang digunakan pada penelitian.
- Bab IV : Hasil dan Analisis Data
Bab ini menjelaskan tentang hasil dan analisis data dari hasil pengukuran harmonisa serta perhitungan *derating factor*.
- Bab V : Penutup
Bab ini berisi tentang kesimpulan yang diperoleh dari perhitungan dan simulasi yang telah dilaksanakan serta saran

untuk pengembangan lebih lanjut.

1.7 Relevansi

Dengan adanya penelitian pada Tugas Akhir ini, diharapkan dapat memberikan manfaat, yaitu:

1. Dapat digunakan sebagai referensi dalam melakukan pemasangan transformator di PT. PLN ULP RUNGKUT.
2. Dapat dijadikan referensi penelitian harmonisa transformator pada jaringan distribusi PT PLN.
3. Dapat digunakan untuk mengevaluasi pemasangan transformator yang telah dilakukan di PT. PLN ULP RUNGKUT.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

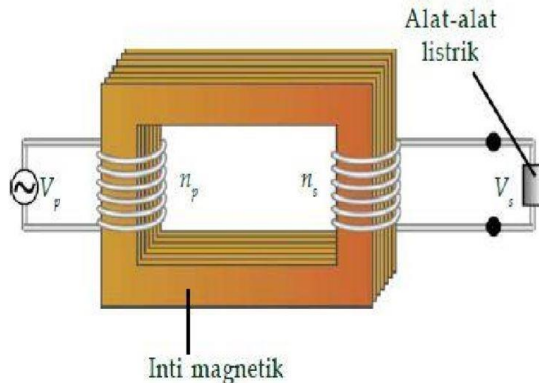
2.1 Transformator

Transformator merupakan suatu alat yang berfungsi untuk menurunkan atau menaikkan tegangan listrik pada frekuensi yang sama[3]. Naik atau turunnya tegangan pada sisi sekunder transformator tergantung pada perbandingan jumlah belitan primer dan sekundernya.

Saat ini transformator digunakan secara luas baik dalam bidang tenaga listrik maupun elektronika. Pada sistem tenaga listrik, penggunaan transformator memungkinkan terjadinya penyesuaian nilai tegangan dengan nilai tegangan yang dibutuhkan beban. Dalam *sistem distribusi* tenaga listrik, transformator distribusi umumnya digunakan untuk menurunkan tegangan dari tegangan menengah ke tegangan rendah.

2.1.1 Bagian – Bagian Trnsformator

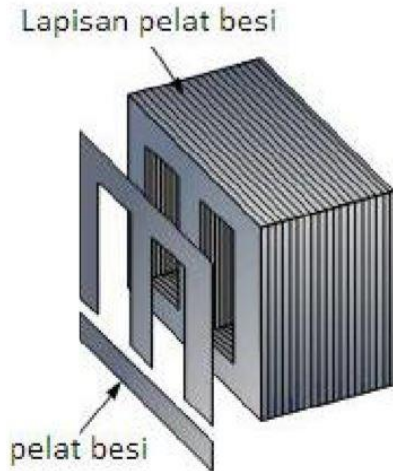
Sebuah transformator terdiri dari tiga komponen utama yaitu belitan primer, belitan sekunder dan inti besi, Seperti yang terlihat pada Gambar 2.1. Belitan primer sebuah transformator terhubung dengan sumber daya listrik dan belitan sekunder terhubung dengan beban transformator.



Gambar 2.1 Bagian – Bagian Transformator

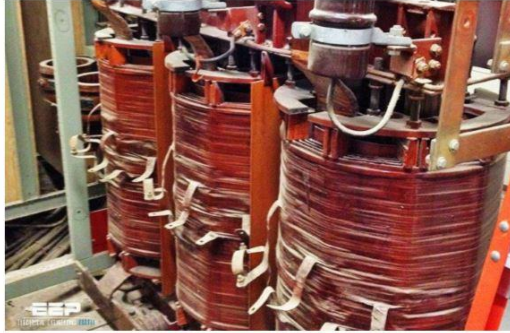
- Inti Besi, merupakan komponen yang berfungsi sebagai jalur mengalirnya fluks yang ditimbulkan oleh mengalirnya arus listrik

pada kumparan. Inti besi merupakan gabungan dari lempengan besi tipis yang berisolasi yang disusun dengan berlapis – lapis, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.2. Tujuan dari lapisan – lapisan ini adalah untuk mengurangi timbulnya susut pada inti besi yang disebabkan oleh arus eddy.



Gambar 2.2 Inti Besi Transformator

- b. Belitan transformator, merupakan komponen berupa kawat berisolasi yang disusun dengan pola tertentu hingga membentuk belitan, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.3. Isolasi pada belitan transformator digunakan untuk mengisolasi belitan terhadap inti besi maupun belitan lainnya. Isolasi yang digunakan umumnya berupa isolasi padat seperti karton, pertinax dan lai-lain. Pada transformator terdapat dua belitan yaitu belitan primer dan belitan sekunder. Belitan primer merupakan belitan yang terhubung dengan sumber tegangan dan belitan sekunder merupakan belitan yang terhubung dengan beban.



Gambar 2.3 Belitan Transformator

2.1.2 Prinsip Kerja Transformator

Transformator bekerja dengan mengacu pada prinsip induksi elektromagnetik. Ketika belitan primer dihubungkan dengan sumber tegangan bolak-balik (AC) maka akan muncul fluks bolak – balik, karena belitan tersebut membentuk jaringan tertutup maka mengalir arus bolak-balik (I_1) pada belitan primer. Fluks magnetik tersebut menimbulkan GGL induksi (self induction) pada belitan primer. Besar GGL induksi pada belitan primer adalah:

$$e_p = -N_p \frac{d\phi}{dt} \quad (2.1)$$

Fluks tersebut mengalir melalui inti besi ke sisi sekunder, dan terinduksi pada belitan sekunder transformator, sehingga timbul GGL induksi (mutual induction) pada belitan sekunder transformator [5]. Besar GGL induksi pada belitan sekunder adalah:

$$e_s = -N_s \frac{d\phi}{dt} \quad (2.2)$$

Dimana:

e_p = GGL Induksi pada belitan primer (volt)

e_s = GGL Induksi pada belitan sekunder (volt)

N_p = Jumlah belitan primer

N_s = Jumlah belitan sekunder

$d\phi$ = Perubahan fluks magnetik (weber)

$d t$ = Perubahan waktu (detik)

2.1.3 Jenis – jenis Transformator

Dalam sistem tenaga listrik, berdasarkan penggunaannya transformator dapat dikelompokkan menjadi tiga jenis, yaitu:

- a. Transformator Daya, merupakan transformator yang umumnya digunakan pada pembangkit tenaga listrik dan saluran transmisi tenaga listrik. Transformator disebut juga dengan transformator step-up karena digunakan untuk menaikkan tegangan pembangkit menjadi tegangan transmisi.
- b. Transformator Distribusi, merupakan transformator yang digunakan untuk menurunkan tegangan transmisi ke tegangan distribusi.
- c. Transformator pengukuran, merupakan transformator yang digunakan untuk mengubah level arus dan level tegangan. Transformator ini berfungsi untuk menurunkan tegangan dan arus pada belitan primer agar dapat digunakan dengan aman pada sisi sekunder.

2.2 Transformator Distribusi

Dalam sistem distribusi PT PLN, transformator distribusi merupakan peralatan yang berfungsi untuk menurunkan tegangan dari jaringan tegangan menengah (20 KV) ke jaringan tegangan rendah (380V/220V). Tegangan pada jaringan tegangan rendah kemudian dihubungkan dengan beban (konsumen).

Sesuai dengan standard NEMA (National Electrical Manufactoris Association), rating transformator distribusi dapat diklasifikasikan menjadi:

- Transformator distribusi 1 θ : rating 3 KVA s/d 500 KVA
- Transformator distribusi 3 θ : rating 9 KVA s/d 1600 KVA

Rating transformator disesuaikan dengan jumlah daya beban yang terhubung pada transformator. Pada penggunaannya, transformator distribusi ditempatkan pada sebuah gardu distribusi. Berikut ini merupakan jenis-jenis gardu distribusi yang digunakan pada sistem distribusi PT PLN:

- a. Gardu Cantol (*single pole mounted distribution substation*), merupakan konstruksi gardu distribusi yang menggunakan satu tiang, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.4. Transformator

dipasangkan secara langsung dengan menggunakan bantuan *travers* menggunakan suatu pola melintang. Rating transformator yang dapat digunakan pada gardu cantol adalah maksimal 100 KVA[4].



Gambar 2.4 Gardu Cantol

- b. Gardu Portal, merupakan gardu listrik tipe terbuka (*out-door*) yang menggunakan dua tiang atau lebih, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.5. Pada sistem distribusi PT PLN, gardu portal merupakan gardu yang paling umum digunakan. Kapasitas maksimal transformator yang digunakan pada gardu ini adalah 400 KVA[4].



Gambar 2.5 Gardu Portal

- c. Gardu Beton, Merupakan gardu listrik tipe tertutup (in-door) seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.6. Berbeda dengan gardu portal dan gardu control, transformator pada gardu beton tidak dipasang diatas tiang, tetapi dipasang pada ruangan tertutup. Berdasarkan nilai estetika, gardu beton lebih baik daripada gardu tipe lainnya, karena pemasangan transformatornya berada didalam ruangan sehingga tidak mengganggu pemandangan. Gardu beton sangat cocok digunakan pada daerah perkotaan, pusat perdangan, tempat hiburan dan sarana rekreasi[4].



Gambar 2.6 Gardu Beton

Gardu distribusi PLN juga dilengkapi dengan Perlengkapan Hubung Bagi (panel) yaitu untuk Tegangan Rendah (TR) dan Tegangan Menengah (TM) Seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.7 dan 2.8.



Gambar 2.7 PHB-TM



Gambar 2.8 PHB-TR

2.3 Pembebanan Transformator

2.3.1 Klasifikasi Pembebanan Transformator

Pada umumnya, beban pada transformator dapat diklasifikasikan dalam beberapa jenis. Berikut ini jenis - jenis beban pada transformator:

a. Beban Perumahan

Beban perumahan merupakan beban yang dilayani oleh sebuah transformator distribusi dimana seluruh atau sebagian besar dari beban tersebut merupakan tempat tinggal atau rumah pemnduduk. Beban perumahan biasanya terdiri dari peralatan – peralatan listrik seperti kipas angin, lampu, lemari es, peralatan elektronik, pendingin udara (AC), kompor listrik dan lain sebagainya.

Nilai pembebanan pada suatu interval waktu tertentu sangat beragam dan selalu berubah pada setiap waktu. Hal tersebut disebabkan kebiasaan dan kebutuhan konsumen energi listrik yang bervariasi serta kondisi lingkungan konsumen. Kondisi tersebut menyebabkan kurva beban pada gardu distribusi menunjukkan beban yang selalu berubah. Terkadang beban akan lebih kecil dari rating transformator. Sebaliknya, terkadang beban lebih besar dari kapasitas transformator distribusi yang melayani.

Pada umumnya kurva beban harian pada transformator dengan beban perumahan memiliki dua buah puncak, yaitu pada siang hari dan malam hari. Dari kurva beban tersebut dapat diketahui nilai kebutuhan daya listrik yang harus dilayani oleh sebuah transformator.

b. Beban bisnis (komersial)

Beban komersial merupakan jenis beban yang dilayani oleh sebuah transformator distribusi. Beban ini terdiri dari suatu kelompok pertokoan / perdagangan yang umumnya terletak pada daerah perkotaan ataupun pusat perbelanjaan (pasar). Untuk beban komersial jenis – jenis peralatan yang menjadi sumber utama beban adalah lampu penerangan, mesin – mesin kecil, pendingin udara dan lain sebagainya. Beban Puncak pada beban komersial umumnya terjadi pada jam kerja yaitu pada siang/malam hari.

c. Beban Industri

Beban industri merupakan kelompok beban transformator yang terdiri dari industri – industri ataupun perusahaan tertentu. Beban industri pada umumnya terletak pada daerah yang terpisah dari lingkungan beban perumahan dan komersial. Beban industri juga disuplai dari penyulang yang berbeda dari beban perumahan dan beban komersial. Hal ini bertujuan untuk menjaga keandalan dan kualitas daya listrik yang disalurkan pada beban industri. Pada daerah perindustrian, penyedia jasa layanan listrik (PLN) dituntut untuk menyediakan listrik dengan keandalan dan kualitas daya yang baik. Hal ini disebabkan oleh banyaknya motor – motor listrik tiga fasa pada beban industri dan waktu operasi suatu beban industri yang hampir mencapai 24 jam dalam sehari.

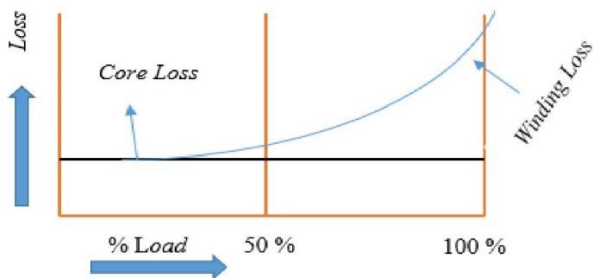
2.3.2 Kondisi Pembebanan Transformator

Pada sistem distribusi PLN, terdapat beberapa kondisi pembebanan pada transformator, yaitu [5]:

- Over load, merupakan kondisi pembebanan lebih dari 80% dari kapasitas transformator.
- Under load, merupakan kondisi pembebanan kurang dari 40% dari kapasitas transformator.
- Normal load, merupakan kondisi pembebanan antara 40% sampai dengan 80% dari kapasitas transformator.

Kondisi pembebanan transformator sangat berpengaruh terhadap susut daya dan efisiensi transformator. Untuk mencapai efisiensi tertinggi,

suatu transformator harus dibebani antara 50 % sampai dengan 60 %. Transformator yang berada pada kondisi over load dan under load akan memiliki efisiensi yang rendah. Hubungan antara pembebanan dan rugi-rugi transformator dapat dilihat pada Gambar 2.9 [6].



Gambar 2.9 Kurva Beban dan Rugi Transformator[6]

2.3.3 Karakteristik Beban Transformator

Karakteristik beban adalah kecenderungan perubahan beban yang terjadi pada sistem tenaga listrik dalam rentan waktu tertentu. Berdasarkan jenis pelanggan, karakteristik beban pada sistem distribusi dapat diklasifikasikan menjadi beberapa sektor, yaitu : rumah tangga, industri, komersial, dan usaha[7].

Mengetahui karakteristik beban pada suatu transformator sangat penting, karena karakteristik beban transformator dapat dijadikan acuan dalam mengevaluasi pembebanan dan untuk merencanakan pembangunan gardu distribusi yang baru. Karakteristik beban juga dapat digunakan sebagai acuan dalam memilih kapasitas transformator serta dijadikan sebagai acuan untuk menentukan rating peralatan proteksi transformator[7].

Berikut ini merupakan besaran-besaran yang berkaitan dengan karakteristik beban, yaitu[7]:

a. *Demand*

Demand (D) merupakan besar pembebanan sesaat pada waktu tertentu atau besar beban rata-rata pada suatu interval waktu tertentu. Demand dapat dinyatakan dalam satuan KVA, KW, KVAR dan satuan beban lainnya.

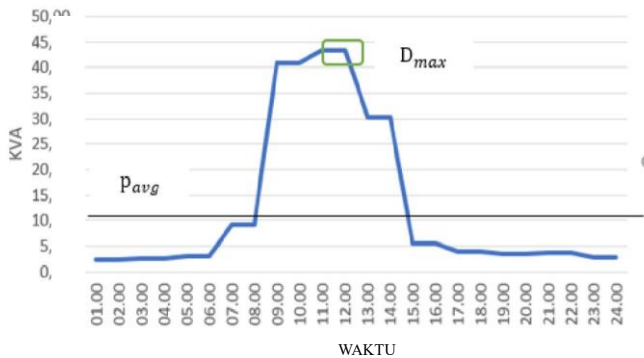
b. *Maximum Demand*

Maximum demand (*D_{m a x}*) merupakan kondisi pembebanan rata-rata terbesar yang terjadi dalam selang waktu tertentu.

Maximum demand juga dinyatakan dalam satuan kW, kVA dan KVAR.

c. Beban Puncak (*Peak Load*)

Beban Puncak (P_{max}) merupakan nilai pembebanan sesaat pada suatu interval demand tertentu. Penjelasan mengenai Demand (D), *Maximum Demand* (D_{max}), dan Beban Puncak (P_{max}) dapat dilihat pada gambar 2.10.



Gambar 2.10 Kurva Beban Transformator Distribusi[7]

d. Faktor Daya (*Power Factor*)

Power factor dapat didefinisikan sebagai perbandingan antara daya aktif dan daya semu. Dalam sistem distribusi tenaga listrik, power factor sangat dipengaruhi oleh beban. Oleh sebab itu, jika beban pada sebuah sistem selalu berubah ubah dan terdapat perbedaan yang besar antara beban puncak dan beban minimum, maka nilai power factor harus dinyatakan untuk setiap keadaan beban. Nilai power factor dapat dinyatakan dalam persamaan berikut ini:

$$\cos\varphi = \frac{P}{S} \tag{2.3}$$

Dimana:

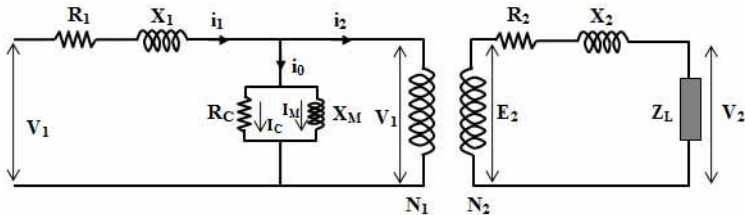
$\cos\varphi$ = Power factor

P = Daya aktif (kW)

S = Daya Semu (kVA)

2.4 Rugi – Rugi (Susut) Pada Transformator

Dalam keadaan ideal, perbandingan antara belitan primer dan belitan sekunder sama dengan perbandingan tegangan primer dan tegangan sekunder. Namun, keadaan ideal pada sebuah transformator tidak mungkin terjadi. Pada transformator selalu terdapat susut yang mempengaruhi keadaan ideal tersebut.



Gambar 2.11 Rangkaian Ekuivalen Transformator[3]

Terdapat dua jenis susut pada transfor, yaitu susut belitan dan susut inti besi. Susut tersebut ditimbulkan oleh adanya resistansi belitan, fluks bocor, arus eddy dan histerisis pada transformator. Dari rangkaian ekuivalen transformator pada Gambar 2.11 di atas, dapat dilihat penyebab terjadinya susut. Susut belitan ditunjukkan dengan R_1 dan R_2 , susut inti terjadi di R_c , serta fluks bocor terjadi di X_1 dan X_2 .

Secara umum, rugi-rugi pada transformator dibagi menjadi dua, *no-load* dan *load loss*, keduanya dapat dihubungkan seperti dalam persamaan 2.4 dibawah:

$$P_T = P_{NL} + P_{LL} \quad (2.4)$$

P_T = Rugi Total

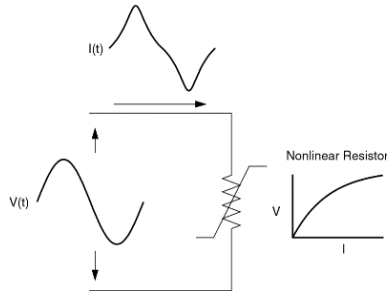
P_{NL} = Rugi Tanpa Beban

P_{LL} = Rugi Berbeban

2.5 Harmonisa

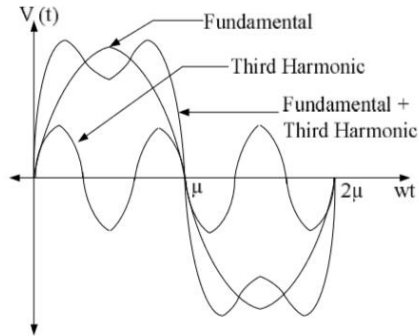
Harmonisa bukan fenomena baru yang terjadi pada sistem kelistrikan. Perkembangan teknologi terus digali untuk mengatasi masalah tersebut. Dari sekian banyak literature ketanagalistrikan yang diterbitkan antara tahun 1930 sampai dengan 1940, banyak diantaranya membahas tentang harmonisa. Harmonisa disebabkan oleh beban non-linier yang terdapan pada sistem kelistrikan. Beban non-linier adalah

beban yang arusnya tidak sebanding dengan teggangan yang diberikan. Apabila sumber tegangan yang diberikan merupakan sinusoidal murni sementara terdapat beban non-linier yang memiliki arus dan teggan yang bervariasi, maka arus yang dihasilkan akan terdistorsi[8]. Seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.12.



Gambar 2.12 Arus yang Terdistorsi Karena Beban Non linier[8]

Harmonisa didefinisikan sebagai gelombang sinus yang memiliki frekuensi kelipatan integer (bilangan bulat) dari frekuensi fundamentalnya. Misalnya di Indonesia, frekuensi yang dipakai adalah 50 Hz. Apabila sistem tersebut mengalami gangguan harmonisa, akan timbul dsitorsi pada gelombang. Hal tersebut disebabkan oleh kelipatan frekuensi yang muncul dari frekuensi fundamentalnya (f), misalnya kelipatan atau harmonik kedua ($2f$) sebesar 100 Hz dan kelipatan ketiga ($3f$) sebesar 150 Hz, dan kelipatan ke- n memiliki ferkuensi sebesar nf . Gelombang-gelombang tersebut akan menumpang pada gelombang frekuensi fundamental sehingga akan menimbulkan gelombang cacat yang merupakan perjumlahan antara gelombang murni dan gelombang-gelombang kelipatannya[9]. Seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.13.



Gambar 2.13 Gelombang Fundamental yang Terdistorsi Harmonisa Orde ke-3[9]

2.5.1 Total Harmonic Distortion (THD)

THD adalah ukuran nilai efektif komponen harmonik dari bentuk gelombang yang terdistorsi. Level distorsi saat ini dapat dicirikan dengan nilai THD (%). Standar harmonisa yang digunakan adalah standar IEEE 519 “*IEEE Recommended Practices and Requirement for harmonic Control in electric in Electrical Power System* “. Terdapat dua kriteria yang digunakan untuk mengevaluasi distorsi harmonisa yaitu: batasan untuk harmonisa arus (%THDi) dan batasan untuk harmonisa tegangan (%THDv), sebagaimana yang ditunjukkan pada Tabel 2.1 dan 2.2 sebagai berikut[10]:

Tabel 2.1 Standar Harmonisa Arus IEEE 519

I_{sc}/I_1	Harmonic Order					THD
	$n < 11$	$11 < n < 17$	$17 < n < 23$	$23 < n < 35$	> 35	
<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	4,5	4,0	1,5	0,7	12,0
100-1000	12	5,5	5,0	2,0	1,0	15,0
>1000	15	7,0	6,0	2,5	1,4	20,0

Tabel 2.2 Standar Harmonisa Tegangan IEEE 519

<i>Maximum Distortion</i> (%)	<i>System Voltage</i>		
	Below 69 kV	69-161 kV	>161 kV
<i>Individual Harmonic</i>	3,0	1,5	1,0
<i>Total Harmonic</i>	5,0	2,5	1,5

Dimana:

I_{sc} = arus hubung singkat

I_l = arus beban nominal

2.5.2 Faktor-K

Faktor-K bisa didapatkan dari hasil perhitungan numerik berdasarkan perjumlahan arus harmonisa yang dihasilkan oleh beban non linier. Semakin tinggi nilai faktor-K menunjukkan konten harmonisa yang ada semakin signifikan. Berdasarkan Persamaan 2.4 di bawah, Faktor-k sama dengan jumlah kuadrat dari arus frekuensi harmonisa dikalikan dengan kuadrat dari angka frekuensi harmonik yang dinyatakan sebagai perbandingan dari total arus rms[9].

$$K = \sum_1^{\infty} h^2 \left(\frac{I_h}{I_{rms}} \right)^2 \quad (2.4)$$

Dimana:

K = Nilai Faktor-k

I_h = Arus Harmonisa

I_{rms} = Arus Total rms

h = Orde harmonisa

2.5.2 Perhitungan *Derating Factor* (D)

Perhitungan derating faktor dilakukan untuk mengetahui kapasitas transformator apabila terdapat beban harmonic pada transformator. Berdasarkan IEEE std. c57.100-1998, Perhitungan *derating factor* dapat dilakukan dengan persamaan 2.5 di bawah ini[11].

$$D = \sqrt{\frac{1 + P_{EC-R}}{1 + F_{HL} \times P_{EC-R}}} \quad (2.5)$$

Dimana:

D = *Derating factor*

F_{HL} = Faktor Harmonisa pada rugi arus eddy belitan

P_{EC-R} = Rugi arus eddy belitan dibawah kondisi rating (pu)

F_{HL} didapatkan dengan membandingkan nilai faktor-k dengan kuadrat perjumlahan arus harmonisa yang telah dibandingkan dengan arus rms. Seperti persamaan 2.6 di bawah ini[11]:

$$F_{HL} = \frac{K}{\sum_1^{\infty} \left(\frac{I_h}{I_{rms}}\right)^2} \quad (2.6)$$

Dimana;

K = Faktor-k

I_h = Arus Harmonik orde ke-h

I_{rms} = Arus RMS

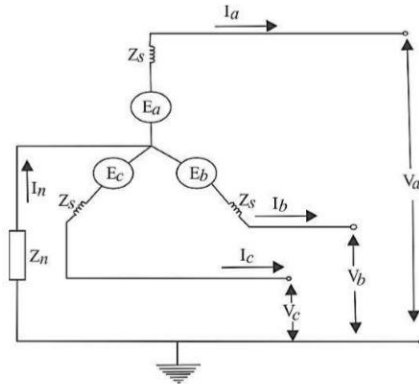
2.6 Perhitungan arus hubung singkat pada penyulang

Perhitungan hubung singkat adalah analisis suatu sistem tenaga listrik pada keadaan gangguan hubung singkat, dimana dengan cara ini diperoleh nilai besaran-besaran listrik yang dihasilkan sebagai akibat gangguan hubung singkat tersebut. Gangguan hubung singkat dapat didefinisikan sebagai gangguan yang terjadi akibat adanya penurunan kekuatan dasar isolasi antara sesama kawat fasa dengan tanah yang menyebabkan kenaikan arus secara berlebihan. Analisis gangguan hubung singkat diperlukan untuk mempelajari sistem tenaga listrik baik waktu perencanaan maupun setelah beroperasi.

Dalam penelitian ini, untuk menentukan standar harmonisa yang digunakan, maka perlu dilakukan perhitungan arus hubung singkat (I_{sc}) 3 fasa apabila gangguan terjadi pada sisi tegangan rendah transformator distribusi.

2.6.1 Perhitungan Arus Hubung Singkat (I_{sc}) 3 fasa

Tipe gangguan ini didefinisikan sebagai gangguan hubung singkat tiga fasa, dimana gangguan itu jarang terjadi, tetapi merupakan tipe gangguan yang palih parah karena pada setiap saluran arus gangguan sama besarnya. Gambar 2.14 menunjukkan generator sinkron tiga fasa dengan netral diketanahkan melalui impedansi Z_n Generator menyuplai beban tiga fasa seimbang[12].



Gambar 2.14 Sumber dan Impedansi 3 Fasa Seimbang[12]

Mesin sinkron membangkitkan tegangan internal tiga fasa dan direpresentasikan sebagai kelompok fasor urutan positif berikut:

$$E_{abc} = \begin{vmatrix} 1 \\ a^2 \\ a \end{vmatrix} E_a \quad (2.7)$$

$$a = 1 \angle 120^\circ = e^{j120^\circ}, a^2 = 1 \angle 240^\circ = e^{j240^\circ}$$

Mesin menyuplai beban seimbang tiga fasa. Penerapan hukum Kirchoff untuk tegangan pada setiap fasa menghasilkan:

$$\begin{aligned} V_a &= E_a - Z_s I_a - Z_n I_n \\ V_b &= E_b - Z_s I_b - Z_n I_n \\ V_c &= E_c - Z_s I_c - Z_n I_n \end{aligned} \quad (2.8)$$

Substitusi untuk $I_n = I_a + I_b + I_c$ dan penulisan persamaan (2.8) dalam bentuk matriks adalah:

$$\begin{vmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} E_a \\ E_b \\ E_c \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} Z_s + Z_n & Z_n & Z_n \\ Z_n & Z_s + Z_n & Z_n \\ Z_n & Z_n & Z_s + Z_n \end{vmatrix} \begin{vmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{vmatrix} \quad (2.9)$$

$$V_{a0} = 0 - Z_0 I_{a0}$$

$$V_{a1} = E_a - Z_1 I_{a1}$$

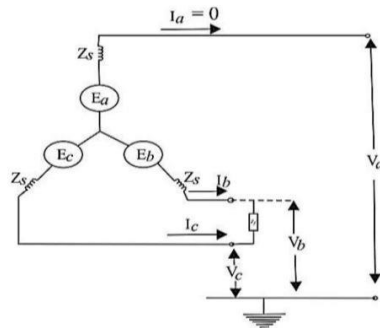
$$V_{a2} = 0 - Z_2 I_{a2}$$

Maka Arus gangguan adalah:

$$I_a = \frac{E_a}{Z_n} \text{ pu} \quad (2.10)$$

2.6.2 Perhitungan Arus Hubung Singkat (Isc) 1 fasa ke tanah

Gambar 2.15, mengilustrasikan generator tiga fasa dengan netral diketanahkan melalui impedansi Z_n [12].



Gambar 2.15 Gangguan Saluran Ke Netral Pada Fasa[12]

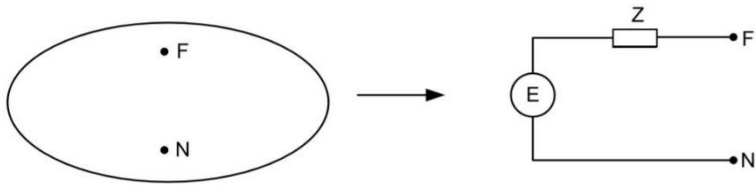
Gangguan fasa ke netral terjadi pada fasa melalui impedansi Z_f . Dengan menganggap mula – mula generator tanpa beban, Arus Gangguan satu fasa ke tanah adalah:

$$I_a = \frac{3E_a}{Z_1 + Z_2 + Z_0 + 3Z_f} \text{ pu} \quad (2.11)$$

2.7 Rangkaian Ekvivalen *Thevenin*

Metode *Thevenin* merupakan salah satu dari sekian metode untuk menghitung arus listrik pada salah satu cabang dari rangkaian listrik yang terdiri dari banyak cabang atau banyak *loop* (rangkaiian tertutup) atau dengan kata lain sistem tenaga listrik yang banyak bus[13]. Penerapan

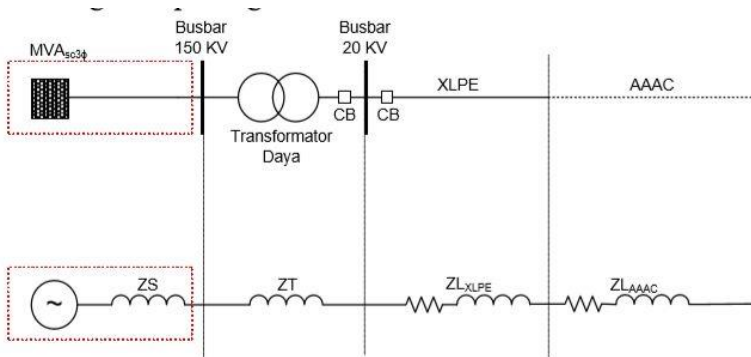
metode Thevenin dari suatu rangkaian atau jaringan yang rumit yang terdiri dari banyak sumber tegangan dan impedansi impedansi peralatan, pada prinsipnya adalah menyederhanakan rangkaian yang rumit tersebut menjadi suatu model rangkaian ekivalen Thevenin, yang hanya terdiri dari satu sumber tegangan Thevenin yang dihubungkan seri dengan sebuah impedansi Thevenin. Model rangkaian ekivalen Thevenin ditunjukkan pada Gambar 2.16 dibawah ini[13]:



Gambar 2.16 Model Rangkaian Ekivalen Thevenin[13]

Gambar 2.16 menunjukkan sebuah lingkaran yang berisi jaringan satu fasa terdiri dari generator, impedansi generator, impedansi transmisi dan impedansi transformator terhubung satu sama lain yang menunjukkan model satu fasa dari sistem tenaga listrik. Kemudian dari model ini ditentukan titik F dan N dimana lokasi arus hubung singkat dihitung. Titik N adalah menunjukkan netral atau titik tegangan nol (zero voltage) dan besar tegangan antara titik F dan N adalah E yaitu besar tegangan pada lokasi yang ditinjau dalam hal ini lokasi gangguan.

Maka model rangkaian ekivalen Thevenin dari rangkaian yang rumit tadi direduksi menjadi satu sumber tegangan E yang terhubung seri dengan satu impedansi Z. Sebelum melakukan perhitungan arus hubung singkat, maka kita harus memulai perhitungan pada rel daya tegangan primer di gardu induk untuk berbagai jenis gangguan, kemudian menghitung pada titik – titik lainnya yang letaknya semakin jauh dari gardu induk tersebut. Untuk itu diperlukan pengetahuan mengenai dasar impedansi urutan rel daya tegangan tinggi atau bisa juga disebut sebagai impedansi sumber, impedansi transformator, dan impedansi penyulang. Ilustrasi penyulang tegangan menengah dapat dilihat pada Gambar 2.17 di bawah.



Gambar 2.17 Ilustrasi Penyulang Tegangan Menengah

MVA_{sc} = MVA hubung singkat tiga fasa (MVA)
 KV_s = Tegangan dasar sisi sekunder (kV)
 KV_p = Tegangan dasar sisi primer (kV)

2.7.1 Menentukan Impedansi Sumber

Untuk menghitung impedansi sumber di sisi Busbar 20 kV, maka harus dihitung dulu impedansi sumber di Busbar 150 kV. Dengan menggunakan MVA hubung singkat tiga fasa, impedansi ekuivalen sistem urutan positif dalam ohm ditentukan [14], seperti yang ditunjukkan pada persamaan 2.7:

$$Z_S = \frac{KV^2}{MVA_{sc3\phi}} \text{ Ohm} \quad (2.12)$$

Karena resistansi pada sumber diabaikan sehingga:

$$Z_S = 0 + jXS \text{ Ohm} \quad (2.13)$$

$$XS = \frac{KV^2}{MVA_{sc3\phi}} \text{ Ohm} \quad (2.14)$$

Diasumsikan impedansi dasar:

$$Z_{base} = \frac{KV_{base}^2}{MVA_{base}} \text{ Ohm} \quad (2.15)$$

Diasumsikan tegangan dasar KV_{base} sama dengan tegangan sumber, dan resistansi sumber diabaikan sehingga impedansi ekivalen sumber urutan positif dalam pu menjadi:

$$ZS = j \frac{MVA_{base}}{MVA_{sc3\phi}} \text{ pu} \quad (2.16)$$

Dimana:

- ZS = Impedansi sumber (pu)
- MVA_{base} = Daya dasar (MVA)
- $MVA_{sc3\phi}$ = MVA hubung singkat tiga fasa (MVA)
- KV_{base} = Tegangan dasar (kV)

2.7.2 Menentukan Impedansi Transformator

Pada perhitungan impedansi suatu transformator yang diambil adalah harga reaktansinya, sedangkan tahanannya diabaikan karena harganya kecil. Untuk mencari nilai reaktansi transformator dalam Ohm dihitung dengan persamaan 2.17 sebagai berikut:

$$ZT = \frac{KVT^2}{MVAT} \text{ Ohm} \quad (2.17)$$

Dimana:

- ZT = Impedansi transformator (Ohm)
- KVT = Tegangan sisi sekunder transformator (KV)
- $MVAT$ = Kapasitas transformator (MVA)

Pada transformator daya pada umumnya informasi nilai reaktansi menggunakan nilai persentase. Reaktansi transformator daya dengan daya dasar baru:

$$ZT_{new} = ZT_{old} \frac{MVA_{new}}{MVA_{old}} \times \frac{KV_{old}^2}{KV_{new}^2} \text{ pu} \quad (2.18)$$

- ZT_{new} = Impedansi transformator baru (pu)
- ZT_{old} = Impedansi transformator lama (pu)
- MVA_{new} = Daya dasar baru (MVA)
- MVA_{old} = Daya dasar lama (MVA)
- KV_{old}^2 = Tegangan dasar baru (kV)
- KV_{new}^2 = Tegangan dasar lama (kV)

2.7.3 Menentukan Impedansi Penyulang

Impedansi penyulang adalah:

$$ZL = \frac{Z_{penyulang}}{Z_{base}} \text{ pu} \quad (2.19)$$

- Z_{base} = Impedansi dasar (ohm)
- $Z_{penyulang}$ = Impedansi penyulang (ohm)
- ZL = Impedansi penyulang (pu)

2.7.4 Menentukan Impedansi Ekuivalen Penyulang

Perhitungan yang dilakukan adalah perhitungan besarnya nilai impedansi ekuivalen urutan positif. Karena dari sejak sumber ke titik gangguan impedansi yang terbentuk adalah tersambung seri maka perhitungan impedansi ekuivalen urutan positif (Z_1) dapat langsung dengan cara menjumlahkan impedansi tersebut. Sehingga untuk impedansi ekuivalen penyulang dapat dihitung dengan menggunakan rumus:

$$Z_1 = ZS_1 + ZT_1 + ZL_1 \text{ pu} \quad (2.20)$$

- Z_1 = Impedansi ekuivalen urutan positif (pu)
- ZS_1 = Impedansi sumber urutan positif sisi sekunder (pu)
- ZT_1 = Impedansi transformator urutan positif (pu)
- ZL_1 = Impedansi penyulang urutan positif (pu)

BAB III

RANCANGAN PENELITIAN

3.1 Waktu Dan Lokasi Penelitian

Pada tugas akhir ini, penelitian yang dilakukan merupakan penelitian secara langsung dilapangan. Penelitian ini dilakukan pada tanggal 1 Maret 2019 sampai dengan 31 Oktober 2019, dengan lokasi penelitian di PT. PLN (Persero) UP3 (Unit Pelaksana Pelayanan Peanggan) Surabaya Selatan, ULP (Unit Layanan Pelanggan) Rungkut.

ULP Rungkut merupakan salah satu dari 5 ULP yang beroperasi di UP3 Surabaya Selatan. Kantor ULP Rungkut beralamat di Jalan Rungkut Industri VIII Nomor 27, Rungkut Kidul, Kec. Rungkut, Kota Surabaya, Jawa Timur. Saat ini ULP Rungkut memiliki 57 penyulang/*feeder* yang di suplai oleh empat Gardu induk, yaitu GI Rungkut, Sukolilo, Wonokromo, dan Wonorejo.

Penelitian tugas akhir ini, secara spesifik dilakukan pada penyulang pondok Chandra untuk beban rumah tangga, Penyulang Zamhuri untuk beban bisnis, dan Penyulang SUIK untuk beban Industri.

3.2 Alur Penelitian

Alur dalam penelitian tugas akhir ini dapat dilihat pada Gambar 3.1.

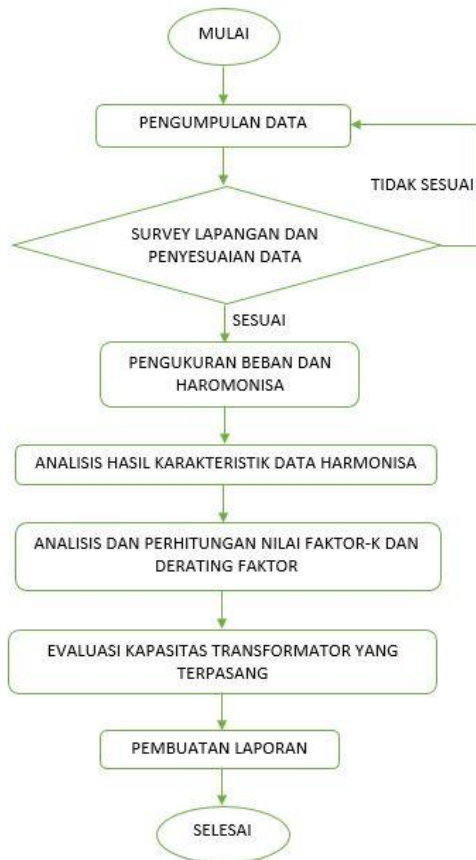
3.2.1 Pengumpulan Data

Pada tahap ini, dilakukan pengumpulan data untuk menentukan transformator pada gardu distribusi yang cocok sesuai dengan kriteria penelitian, yaitu transformator yang berkapasitas 160 kVA. Gardu yang dibutuhkan adalah 9 unit Gardu Distribusi dengan rincian 3 gardu untuk masing-masing jenis beban. Berikut data nomor gardu yang diukur:

- Beban Rumah Tangga (Penyulang Pondok Chandra)
 - BE 376
 - BE 554
 - BE 549
- Beban Bisnis (Penyulang Zamhuri)
 - BE 1107
 - BE 807
 - BE 1846
- Beban Industri (Penyulang SUIK)

- BE 39
- BE 47
- BE 50

Data pengukuran beban yang sebelumnya juga perlu dikumpulkan untuk menentukan gardu distribusi yang diukur. Spesifikasi Penyulang seperti jenis penghantar, kapasitas transformator daya di GI dan nilai MVA_{SC} juga dikumpulkan untuk keperluan analisa terhadap harmonisa.



Gambar 3.1 Alur Penelitian

3.2.2 Survey Lapangan dan Pencocokan data Transformator distribusi

Setelah menentukan Gardu distribusi yang diukur, Peneliti melakukan survey lapangan dan melakukan pencocokan data yang ada dengan kondisi dilapangan. Hal yang paling utama adalah pengecekan kapasitas Transformator, kondisi lingkungan (aksebilitas), dan perizinan di tempat terkait. Dalam melakukan survey, SLD (*Single Line Diagram*) penyulang diikut sertakan sebagai pedoman, seperti yang dapat dilihat pada Gambar 3.2, 3.3 dan 3.4.

3.2.3 Pengukuran Beban Harian dan Harmonisa

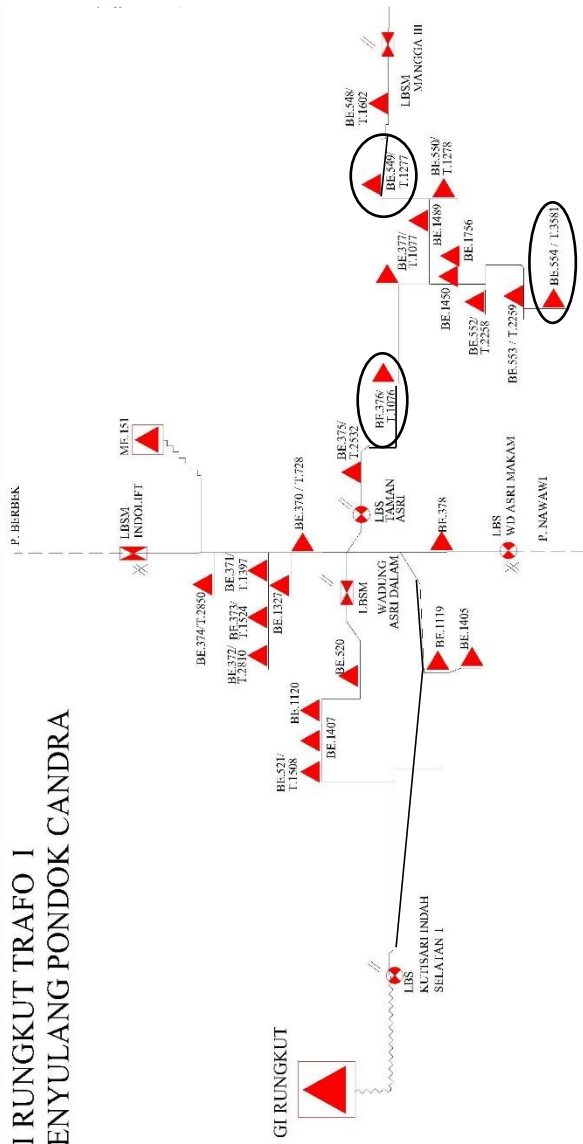
Pada tahap ini, pengukuran beban transformator dilakukan secara periodik, dengan interval waktu pengukuran dilakukan setiap satu jam. Pengukuran ini berlangsung selama 24 jam. Pengukuran ini bertujuan untuk memperoleh pembebanan aktual dan karakteristik beban dan harmonisa transformator. Data dengan nilai tertinggi dipilih untuk selanjutnya dianalisis.

Pengukuran beban dilakukan pada Perlengkapan Hubung Bagi Tegangan Rendah (PHB-TR) dengan Fluke 430-II *power quality analyzer*, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.5. Hasil yang diperoleh dari pengukuran ini adalah arus beban (Ampere), Tegangan Fasa-Netral (V), Daya Nyata (Watt), faktor daya, dan harmonisa arus dan tegangan tiap ordenya. Hasil pengukuran harmonisa tersebut digunakan dala perhitungan sehingga mengperoleh nilai faktor-K dan *derating factor* sehingga evaluasi terhadap kapasitas transformator yang terpasang dapat dilakukan.

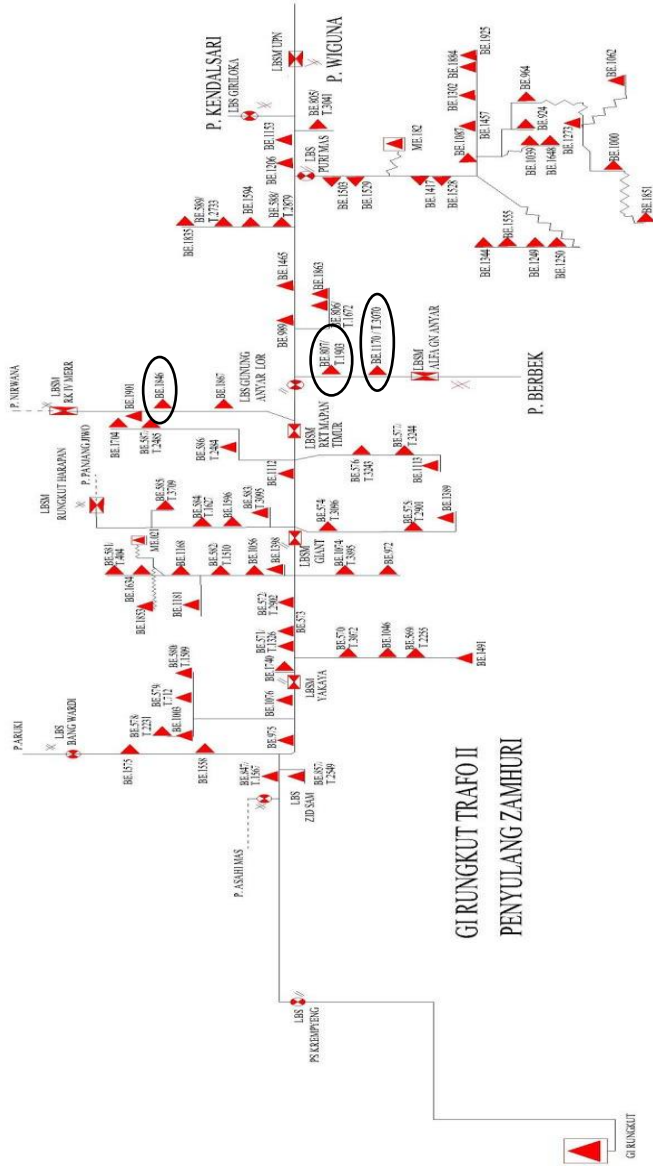
3.2.4 Analisis Karakteristik harmonisa pada setiap Jenis Beban

Setelah mendapatkan data pembebanan dan harmonisa pada pengukuran selama 24 jam, Dilakukan penginputan data ke dalam *software* Microsoft Excel dan dibuatkan grafik yang menggambarkan kondisi beban dan harmonisa. Selanjutnya, data dengan nilai harmonisa tertinggi dipilih untuk dianalisa karakteristiknya sesuai dengan jenis bebannya masing-masing. Perhitungan nilai arus hubung singkat (I_{sc}) pada transformator juga dilakukan agar nilai THD arus dan tegangan dapat dibandingkan dengan standar yang mengacu pada IEEE.

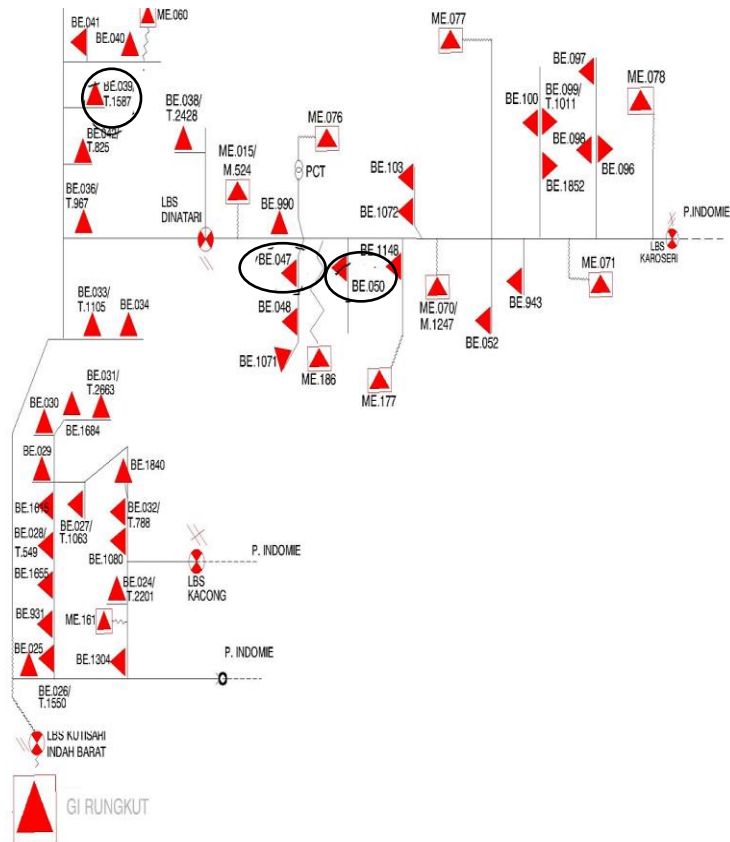
GI RUNGKUT TRAF0 I PENYULANG PONDOK CANDRA



Gambar 3.2 SLD Penyulang Pondok Chandra



Gambar 3.3 SLD Penyulang Zamhuri



Gambar 3.4 SLD Penyulang Sumber SUIK

3.2.5 Perhitungan nilai Faktor-K dan Derating Faktor

Dari hasil pengukuran THD yang terbesar, perhitungan faktor-K dilakukan dengan menggunakan persamaan 2.4, arus harmonisa tiap ordenya didapat dari hasil pengukuran menggunakan *power quality analyzer*. Setelah perhitungan nilai faktor-K, Penulis melakukan perhitungan nilai *derating factor* (D) menggunakan persamaan 2.5 dari masing-masing transformator. Nilai P_{EC} (*eddy current losses*) diperoleh dari spesifikasi transformator yang dikeluarkan oleh produsen, yaitu transformator dengan merek B&D kapasitas 160 kVA.



Gambar 3.5 Fluke 430-II power quality analyzer

3.2.6 Analisis Hasil Perhitungan *Derating factor* (D) dan Evaluasi Kapasitas Transformator yang Terpasang

Setelah nilai *derating factor* diperoleh, penulis melakukan analisis penurunan kapasitas yang dialami transformator akibat dari efek beban harmonisa. Nilai tersebut juga dibandingkan dengan pembenanan pada saat waktu beban puncak (WPB) berdasarkan hasil pengukuran yang telah dilakukan sehingga evaluasi kapasitas transformator yang terpasang dapat dilakukan.

3.2.7 Pembuatan Laporan

Setelah semua tahapan dilakukan, Penulis melaksanakan penyusunan laporan tugas akhir dari penelitian yang telah dilakukan.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB IV

HASIL DAN ANALISIS DATA

4.1 Hasil Pengukuran Beban Harian dan Harmonisa

Pengukuran beban dilakukan setiap 1 jam dengan durasi selama 24 jam, Adapun jenis beban yang diukur adalah transformator yang mensuplai rumah tangga, bisnis, dan industri. Subbab membahas hasil dari pengukuran beban harian dan harmonisa. Nilai harmonisa pada waktu WBP yang dipilih untuk dianalisis. Sementara itu, pengukuran beban harian menjadi acuan perbandingan nilai waktu beban puncak (WBP) tiap transformator pada Gardu distribusi.

4.1.1 Hasil Pengukuran Beban dan Harmonisa Rumah Tangga

4.1.1.1 Pengukuran Beban harian

Pengukuran Beban Rumah dilakukan pada 3 Gardu distribusi Penyulang Pondok Chandra dengan nomor gardu sebagai berikut:

- BE 376
- BE 554
- BE 549.

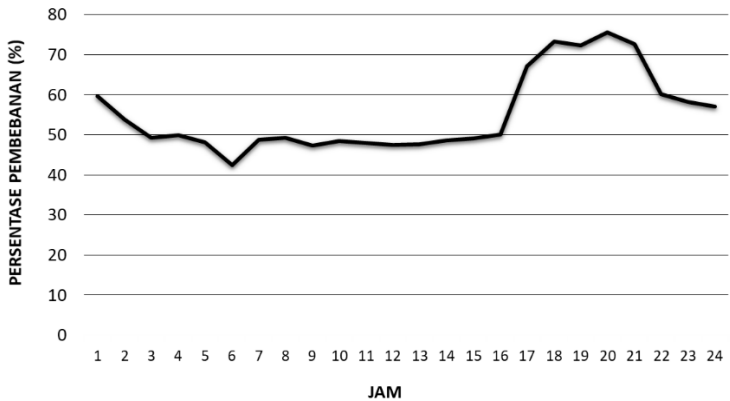
Tabel 4.1 Hasil Pengukuran Beban Harian Gardu Distribusi BE 376

Jam	Hasil Pengukuran Daya (kVA)	Kapasitas (kVA)	Persentase Pembebanan (%)
1	95,55	160	59,71
2	86,22	160	53,88
3	78,72	160	49,20
4	79,86	160	49,91
5	77,01	160	48,13
6	68	160	42,50
7	78,18	160	48,86
8	78,78	160	49,23

Tabel 4.2 Hasil Pengukuran Beban Harian Gardu Distribusi BE 376

Jam	Hasil Pengukuran Daya (kVA)	Kapasitas (kVA)	Persentase Pembebanan (%)
9	75,84	160	47,40
10	77,52	160	48,45
11	76,89	160	48,05
12	76,05	160	47,53
13	76,3	160	47,68
14	77,8	160	48,62
15	78,6	160	49,12
16	80,25	160	50,15
17	107,49	160	67,18
18	117,27	160	73,29
19	115,77	160	72,35
20	120,87	160	75,54
21	116,28	160	72,67
22	96,15	160	60,09
23	93,12	160	58,20
24	91,41	160	57,13

Data pada Tabel 4.1 di atas menunjukkan hasil pengukuran pada transformator dengan nomor gardu BE 376. Data pada tabel di atas dapat dilihat dalam bentuk grafik seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.1 dibawah. Data Pada tabel dan garfik menunjukkan bahwa waktu beban puncak (WBP) pada Gardu distribusi BE 376 terjadi pada pukul 20.00 WIB yaitu sebesar 120,87 kVA atau sebesar 75,54 % dari kapasitas transformator tersebut.



Gambar 4.1 Karakteristik Pembebanan harian Gardu Distribusi BE 376

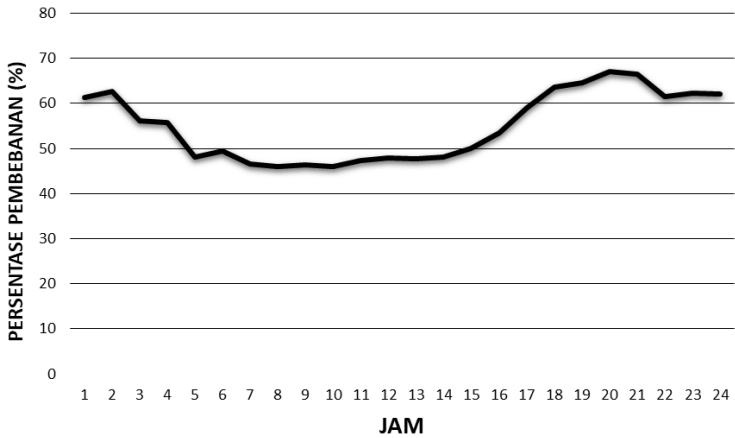
Tabel 4.3 Hasil Pengukuran Beban Harian Gardu BE 554

Jam	Hasil Pengukuran Daya (kVA)	Kapasitas (kVA)	Persentase Pembebanan (%)
1	98,04	160	61,27
2	100,38	160	62,73
3	89,76	160	56,10
4	89,28	160	55,80
5	77,01	160	48,13
6	79,14	160	49,46
7	74,55	160	46,59
8	73,68	160	46,05
9	74,13	160	46,33
10	73,71	160	46,06
11	75,9	160	47,43

Tabel 4.4 Hasil Pengukuran Beban Harian Gardu BE 554

Jam	Hasil Pengukuran Daya (kVA)	Kapasitas (kVA)	Persentase Pembebanan (%)
12	76,64	160	47,90
13	76,5	160	47,81
14	77	160	48,12
15	80	160	50,00
16	85,5	160	53,43
17	94,38	160	58,98
18	101,79	160	63,61
19	103,38	160	64,61
20	107,37	160	67,10
21	106,26	160	66,41
22	98,34	160	61,46
23	99,63	160	62,26
24	99,36	160	62,10

Data pada Tabel 4.2 di atas menunjukkan hasil pengukuran pada transformator dengan nomor gardu BE 554. Data pada tabel di atas dapat dilihat dalam bentuk grafik seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.2 di bawah. Data pada tabel dan grafik menunjukkan bahwa waktu beban puncak (WBP) pada Gardu distribusi BE 554 terjadi pada pukul 20.00 WIB yaitu sebesar 107,37 kVA atau sebesar 67,10% dari kapasitas transformator tersebut.



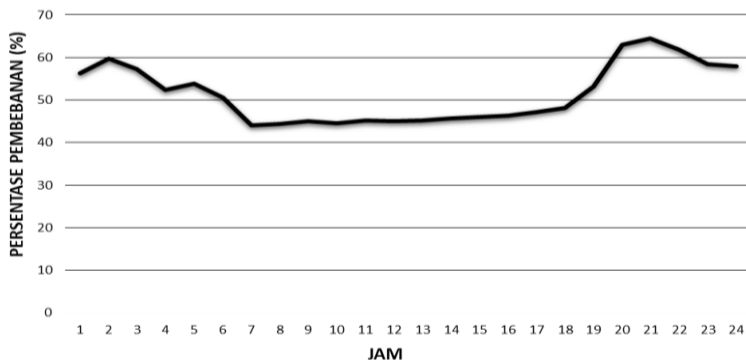
Gambar 4.2 Karakteristik Pembebanan harian Gardu Distribusi BE 554

Tabel 4.5 Hasil Pengukuran Beban Harian Gardu BE 549

Jam	Hasil Pengukuran Daya (kVA)	Kapasitas (kVA)	Persentase Pembebanan (%)
1	89,94	160	56,21
2	95,52	160	59,70
3	91,56	160	57,22
4	83,7	160	52,31
5	86,13	160	53,83
6	81	160	50,64
7	70,44	160	44,02
8	70,92	160	44,32
9	72,06	160	45,03
10	71,25	160	44,53
11	72,36	160	45,22
12	72	160	45,00

Tabel 4.6 Hasil Pengukuran Beban Harian Gardu BE 549

Jam	Hasil Pengukuran Daya (kVA)	Kapasitas (kVA)	Persentase Pembebanan (%)
13	72,4	160	45,25
14	73	160	45,62
15	73,6	160	46,00
16	74,22	160	46,38
17	75,39	160	47,11
18	77	160	48,12
19	85	160	53,12
20	100,77	160	62,98
21	102,99	160	64,36
22	98,9	160	61,81
23	93,33	160	58,33
24	92,58	160	57,86



Gambar 4.3 Karakteristik Pembebanan harian Gardu Distribusi BE 549

Data pada Tabel 4.3 di atas menunjukkan hasil pengukuran pada transformator dengan nomor gardu BE 549. Data pada tabel di atas dapat dilihat dalam bentuk grafik seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.2 di bawah. Data Pada tabel di ditunjukkan pada Gambar 4.3. Data Pada tabel dan garfik menunjukkan bahwa waktu beban puncak (WBP) pada Gardu distribusi BE 376 terjadi pada pukul 21.00 WIB yaitu sebesar 102,99 kVA atau sebesar 64,36 % dari kapasitas transformator tersebut.

4.1.1.2 Pengukuran Harmonisa Tegangan dan Arus

Saat melakukan pengukuran beban harian selama 24 jam, Pengukuran *Total Harmonic Distortioin* (THD) arus dan tegangan juga dilakukan sampai orde ke-15 harmonisa. Hasil pengukuran menunjukkan nilai yang beragam, namun data THD pada saat waktu beban puncak (WBP) akan dianalisis. Hasil pengukuran yang dilakukan pada ketiga gardu distribusi rumah tangga pada waktu beban puncak adalah sebagai berikut:

- a. Transformator gardu BE 376: Pukul 20.00 WIB

Tabel 4.7 Hasil Pengukuran Harmonisa Transformator Gardu BE 376

Fasa	THD Tegangan (%)	THD Arus (%)	Orde Harmonik	Arus Harmonik (A)
R	1,41	9,21	1	171,4
			3	14,6
			5	3,479
			7	2,01
			9	3,411
			11	1,56
			13	0,788
			15	1,046
S	1,48	6,12	1	141,6
			3	7,633
			5	1,23

Tabel 4.8 Hasil Pengukuran Harmonisa Transformator Gardu BE 376

Fasa	THD Tegangan (%)	THD Arus (%)	Orde Harmonik	Arus Harmonik (A)
S	1,48	6,12	7	0,58
			9	2,237
			11	0,747
			13	0,368
			15	0,91
T	1,46	10,13	1	206,2
			3	19,65
			5	4,06
			7	2,554
			9	3,708
			11	2,433
			13	0,371
			15	1,42

b. Transformator gardu BE 554: Pukul 20.00 WIB

Tabel 4.9 Hasil Pengukuran Harmonisa Transformator Gardu BE 554

Fasa	THD Tegangan (%)	THD Arus (%)	Orde Harmonik	Arus Harmonik (A)
R	2,03	9,70	1	180,8
			3	16,635
			5	3,446
			7	1,005
			9	3,144
			11	1,96
			13	0,921
			15	1,548

Tabel 4.10 Hasil Pengukuran Harmonisa Transformator Gardu BE 554

Fasa	THD Tegangan (%)	THD Arus (%)	Orde Harmonik	Arus Harmonik (A)
S	1,53	16,83	1	69
			3	10,31
			5	3,202
			7	0,476
			9	1,78
			11	1,886
			13	0,304
			15	1,029
T	1,74	9,82	1	180,6
			3	16,6
			5	3,522
			7	1,34
			9	2,98
			11	1,49
			13	0,47
			15	1,029

c. Transformator gardu BE 549: Pukul 21.00 WIB

Tabel 4.11 Hasil Pengukuran Harmonisa Transformator Gardu BE 549

Fasa	THD Tegangan (%)	THD Arus (%)	Orde Harmonik	Arus Harmonik (A)
R	1,37	9,95	1	151,4
			3	14,031
			5	2,839
			7	0,207
			9	3,215

Tabel 4.12 Hasil Pengukuran Harmonisa Transformator Gardu BE 549

Fasa	THD Tegangan (%)	THD Arus (%)	Orde Harmonik	Arus Harmonik (A)
			11	2,06
			13	0,563
			15	1,014
S	1,51	11,19	1	177,8
			3	18,567
			5	3,463
			7	2,895
			9	4,407
			11	1,427
			13	0,727
			15	0,887
T	1,39	12,85	1	108,6
			3	11,963
			5	4,053
			7	0,73
			9	2,834
			11	1,566
			13	0,607
			15	0,796

4.1.2 Hasil Pengukuran Beban dan Harmonisa Beban Bisnis

4.1.2.1 Pengukuran Beban Harian

Pengukuran Beban bisnis (komersial) dilakukan pada 3 Gardu distribusi pada Penyulang Zamhuri dengan nomor gardu sebagai berikut:

- BE 1107
- BE 807
- BE 1846

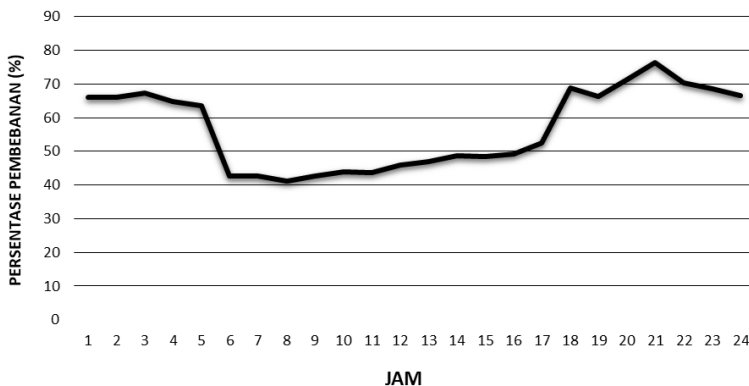
Tabel 4.13 Hasil Pengukuran Beban Harian Transformator Gardu BE 1107

Jam	Hasil Pengukuran Daya (kVA)	Kapasitas Transformator (kVA)	Persentase Pembebanan (%)
1	105,75	160	66,09
2	105,69	160	66,05
3	107,7	160	67,31
4	103,44	160	64,65
5	101,58	160	63,48
6	68,31	160	42,69
7	68,25	160	42,65
8	65,73	160	41,08
9	68,25	160	42,65
10	70,41	160	44,00
11	69,72	160	43,57
12	73,62	160	46,01
13	75,21	160	47,01
14	77,82	160	48,63
15	77,64	160	48,52
16	78,69	160	49,18
17	83,91	160	52,44
18	110,07	160	68,79
19	105,93	160	66,20
20	114,2	160	71,37

Tabel 4.14 Hasil Pengukuran Beban Harian Transformator Gardu BE 1107

Jam	Hasil Pengukuran Daya (kVA)	Kapasitas Transformator (kVA)	Persentase Pembebanan (%)
21	122,22	160	76,38
22	112,5	160	70,31
23	109,56	160	68,47
24	106,59	160	66,61

Data pada Tabel 4.7 di atas menunjukkan hasil pengukuran pada transformator dengan nomor gardu BE 1107. Data pada Tabel dapat dilihat dalam bentuk grafik seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.4 di bawah. Data Pada tabel dan garfik menunjukkan bahwa waktu beban puncak (WBP) pada Gardu distribusi BE 1107 terjadi pada pukul 21.00 WIB yaitu sebesar 122,22 kVA atau sebesar 76,38% dari kapasitas transformator tersebut.



Gambar 4.4 Karakteristik Pembebanan harian Gardu Distribusi BE 1107

Data pada Tabel 4.8 di bawah menunjukkan hasil pengukuran pada transformator dengan nomor gardu BE 807. Data pada tabel tersebut dapat dilihat dalam bentuk grafik seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.5. Data pada tabel dan grafik menunjukkan bahwa waktu beban puncak

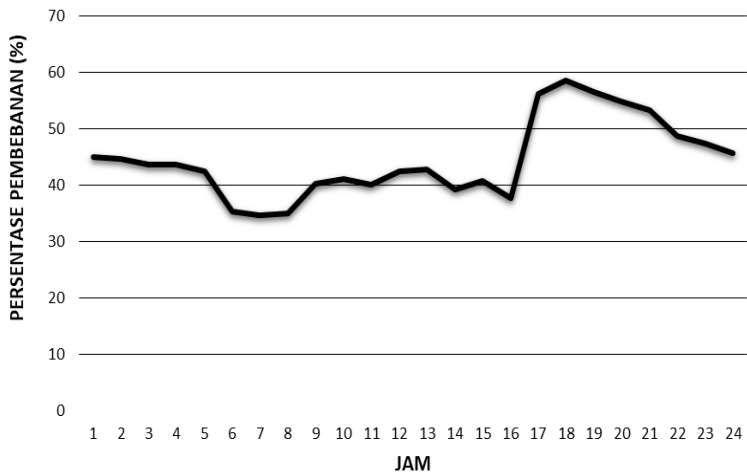
(WBP) pada Gardu distribusi BE 807 terjadi pada pukul 18.00 WIB yaitu sebesar 93,6 kVA atau sebesar 58,50% dari kapasitas transformator tersebut.

Tabel 4.15 Hasil Pengukuran Beban Harian Transformator Gardu BE 807

Jam	Hasil Pengukuran Daya (kVA)	Kapasitas Transformator (kVA)	Persentase Pembebanan (%)
1	71,88	160	44,92
2	71,34	160	44,58
3	69,69	160	43,55
4	69,69	160	43,55
5	67,95	160	42,46
6	56,46	160	35,28
7	55,5	160	34,68
8	55,86	160	34,91
9	64,38	160	40,23
10	65,76	160	41,10
11	64,17	160	40,10
12	68,01	160	42,50
13	68,52	160	42,82
14	62,82	160	39,26
15	65,04	160	40,65
16	60,24	160	37,65
17	89,73	160	56,08
18	93,6	160	58,50

Tabel 4.16 Hasil Pengukuran Beban Harian Transformator Gardu BE 807

Jam	Hasil Pengukuran Daya (kVA)	Kapasitas Transformator (kVA)	Persentase Pembebanan (%)
19	90,3	160	56,43
20	87,78	160	54,86
21	85,32	160	53,32
22	78,03	160	48,76
23	75,81	160	47,38
24	73,08	160	45,67



Gambar 4.5 Karakteristik Pembebanan harian Gardu Distribusi BE 807

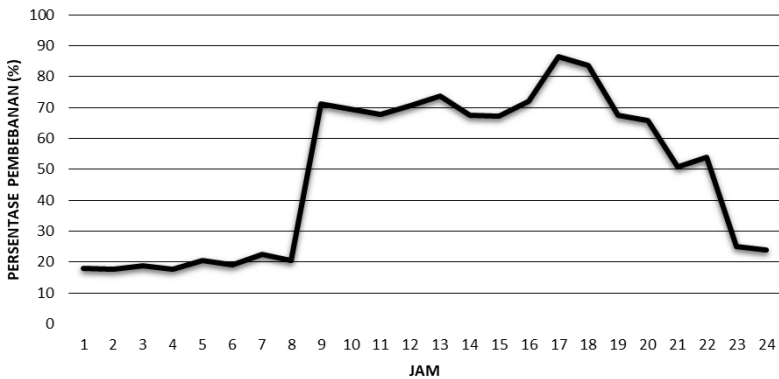
Tabel 4.17 Hasil Pengukuran Beban Harian Gardu BE 1846

Jam	Hasil Pengukuran Daya (kVA)	Kapasitas Transformator (kVA)	Persentase Pembebanan (%)
1	28,53	160	17,83
2	28,23	160	17,64
3	30,21	160	18,88
4	28,23	160	17,64
5	32,61	160	20,38
6	30,63	160	19,14
7	35,82	160	22,38
8	33	160	20,62
9	113,82	160	71,13
10	110,97	160	69,35
11	108,51	160	67,81
12	112,98	160	70,61
13	117,75	160	73,59
14	107,76	160	67,35
15	107,43	160	67,14
16	115,44	160	72,15
17	138,45	160	86,53
18	133,8	160	83,62
19	108,15	160	67,59
20	105,27	160	65,79

Tabel 4.18 Hasil Pengukuran Beban Harian Gardu BE 1846

Jam	Hasil Pengukuran Daya (kVA)	Kapasitas Transformator (kVA)	Persentase Pembebanan (%)
21	81,45	160	50,90
22	86,13	160	53,83
23	40,05	160	25,03
24	38,37	160	23,98

Data pada Tabel 4.9 di atas menunjukkan hasil pengukuran pada transformator dengan nomor gardu BE 1846. Data pada di atas dapat dilihat dalam bentuk grafik seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.6 di bawah ini. Data pada tabel dan garfik menunjukkan bahwa waktu beban puncak (WBP) terjadi pada pukul 17.00 WIB yaitu sebesar 138,45 kVA atau sebesar 86,53 % dari kapasitas transformator tersebut.



Gambar 4.6 Karakteristik Pembebanan harian Gardu Distribusi BE 1846

4.1.1.2 Hasil Pengukuran Harmonisa Tegangan dan Arus

Ketika melakukan pengukuran beban harian selama 24 jam, Penulis juga melakukan pengukuran *Total Harmonic Distortioin* (THD) arus dan tegangan hingga orde harmonik ke-15. Hasil pengukuran menunjukkan nilai yang beragam, namun data THD pada saat waktu

beban puncak (WBP) yang dianalisis. Hasil pengukuran yang dilakukan pada ketiga gardu distribusi rumah tangga menunjukkan nilai WBP sebagai berikut:

- a. Transformatorn gardu BE 1107: Pukul 21.00 WIB

Tabel 4.19 Hasil Pengukuran Harmonisa Transformator Gardu BE 1107

Fasa	THD Tegangan (%)	THD Arus (%)	Orde Harmonik	Arus Harmonik (A)
R	1,79	12,34	1	100
			3	11,076
			5	3,611
			7	1,49
			9	1,946
			11	0,319
			13	0,859
			15	0,62
S	1,96	14,06	1	155
			3	20,361
			5	4,386
			7	3,509
			9	4,483
			11	1,217
			13	1,451
			15	0,832
T	1,86	9,94	1	244,2
			3	22,955
			5	3,223
			7	5,193

Tabel 4.20 Hasil Pengukuran Harmonisa Transformator Gardu BE 1107

Fasa	THD Tegangan (%)	THD Arus (%)	Orde Harmonik	Arus Harmonik (A)
			9	4,128
			11	0,316
			13	1,636
			15	0,684

b. Transformator gardu BE 807: Pukul 18.00 WIB

Tabel 4.21 Hasil Pengukuran Harmonisa Transformator Gardu BE 807

Fasa	THD Tegangan (%)	THD Arus (%)	Orde Harmonik	Arus Harmonik (A)
R	2,17	13,57	1	128,6
			3	16,088
			5	3,042
			7	2,598
			9	3,961
			11	1,7
			13	0,768
			15	0,933
S	2,22	10,66	1	170,4
			3	17,227
			5	1,095
			7	4,042
			9	2,948
			11	0,831
			13	0,933
			15	0,623

Tabel 4.22 Hasil Pengukuran Harmonisa Transformator Gardu BE 807

Fasa	THD Tegangan (%)	THD Arus (%)	Orde Harmonik	Arus Harmonik (A)
T	1,83	12,35	1	104,8
			3	12,136
			5	1,569
			7	2,211
			9	2,554
			11	0,609
			13	0,772
			15	0,433

c. BE 1180: Pukul 17.00 WIB

Tabel 4.23 Hasil Pengukuran Harmonisa Transformator Gardu BE 1846

Fasa	THD Tegangan (%)	THD Arus (%)	Orde Harmonik	Arus Harmonik (A)
R	1,65	9,95	1	181,4
			3	15,798
			5	2,063
			7	3,385
			9	1,215
			11	1,288
			13	0,889
			15	0,526
S	1,57	8,22	1	205,6
			3	15,231
			5	2,109
			7	1,207
			9	2,278
			11	1,911

Tabel 4.24 Hasil Pengukuran Harmonisa Transformator Gardu BE 1846

Fasa	THD Tegangan	THD Arus	Orde Harmonik	Arus Harmonik (A)
			13	0,583
			15	0,466
T	1,50	5,29	1	208,8
			3	8,486
			5	2,547
			7	1,942
			9	1,972
			11	1,474
			13	0,322
			15	0,501

4.1.3 Hasil Pengukuran Beban dan Harmonisa Industri

4.1.3.1 Pengukuran Beban harian

Pengukuran Beban Rumah dilakukan pada 3 Gardu distribusi Penyulang SUIK dengan nomor gardu sebagai berikut:

- BE 39
- BE 47
- BE 50

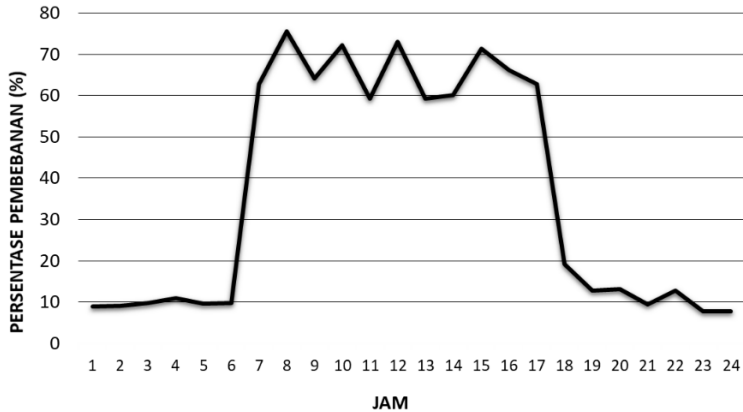
Tabel 4.25 Hasil Pengukuran Beban Harian Gardu BE 39

Jam	Hasil Pengukuran Daya (kVA)	Kapasitas (kVA)	Persentase Pembebanan (%)
1	14,3	160	8,93
2	14,6	160	9,12
3	15,7	160	9,81
4	17,5	160	10,93

Tabel 4.26 Hasil Pengukuran Beban Harian Gardu BE 39

Jam	Hasil Pengukuran Daya (kVA)	Kapasitas (kVA)	Persentase Pembebanan (%)
5	15,5	160	9,68
6	15,7	160	9,81
7	100,6	160	62,80
8	120,87	160	75,54
9	102,75	160	64,21
10	115,47	160	72,16
11	94,95	160	59,34
12	116,97	160	73,10
13	94,74	160	59,21
14	96,18	160	60,11
15	114,06	160	71,28
16	105,9	160	66,18
17	100,5	160	62,81
18	30,6	160	19,12
19	20,6	160	12,87
20	21,09	160	13,18
21	15,06	160	9,41
22	20,5	160	12,81
23	12,4	160	7,75
24	12,5	160	7,81

Data pada Tabel 4.13 di atas menunjukkan hasil pengukuran pada transformator dengan nomor gardu BE 39. Data pada tabel di atas dapat dilihat dalam bentuk grafik seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.7 dibawah ini.



Gambar 4.7 Karakteristik Pembebanan harian Gardu Distribusi BE 39

Data Tabel 4.13 dan grafik pada gambar 4.7 di atas menunjukkan bahwa waktu beban Puncak (WBP) pada Gardu distribusi BE 39 terjadi pada pukul 08.00 WIB yaitu sebesar 120,87 kVA atau 75,54 % dari kapasitas transformator tersebut.

Tabel 4.27 Hasil Pengukuran Beban Harian Gardu BE 47

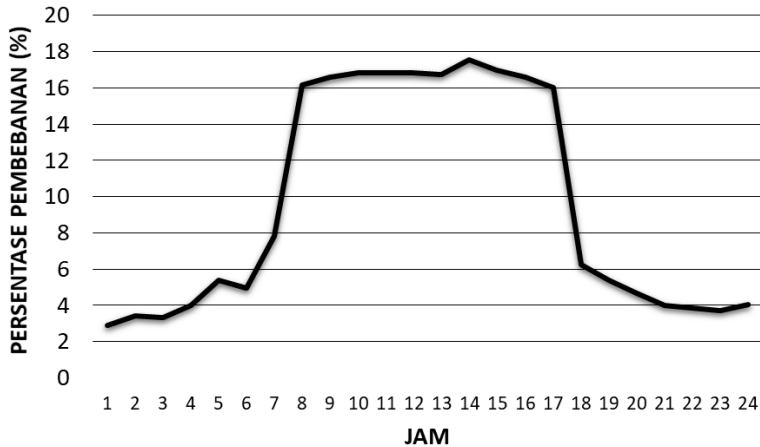
Jam	Hasil Pengukuran Daya (kVA)	Kapasitas (kVA)	Persentase Pembebanan (%)
1	4,6	160	2,87
2	5,5	160	3,43
3	5,3	160	3,31
4	6,4	160	4,00
5	8,6	160	5,37

Tabel 4.28 Hasil Pengukuran Beban Harian Gardu BE 47

Jam	Hasil Pengukuran Daya (kVA)	Kapasitas (kVA)	Persentase Pembebanan (%)
6	7,9	160	4,93
7	12,5	160	7,81
8	25,88	160	16,17
9	26,55	160	16,59
10	26,91	160	16,81
11	26,94	160	16,83
12	26,97	160	16,85
13	26,79	160	16,74
14	28,08	160	17,55
15	27,15	160	16,96
16	26,52	160	16,57
17	25,6	160	16,00
18	10	160	6,25
19	8,6	160	5,37
20	7,5	160	4,68
21	6,4	160	4,00
22	6,2	160	3,87
23	5,9	160	3,68
24	6,5	160	4,06

Data pada Tabel 4.14 di atas menunjukkan hasil pengukuran pada transformator dengan nomor gardu BE 47. Data pada tabel di atas dapat

dilihat dalam bentuk grafik seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.7 dibawah ini.



Gambar 4.8 Karakteristik Pembebanan harian Gardu Distribusi BE 47

Data Tabel 4.14 dan grafik pada Gambar 4.8 di atas menunjukkan bahwa waktu beban Puncak (WBP) pada Gardu distribusi BE 47 terjadi pada pukul 15.00 WIB yaitu sebesar 27,15 kVA atau 16,97% dari kapasitas transformator tersebut.

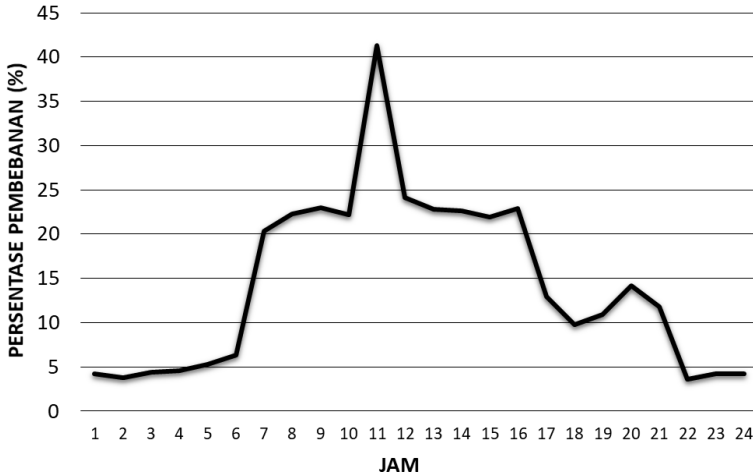
Tabel 4.29 Hasil Pengukuran Beban Harian Gardu BE 50

Jam	Hasil Pengukuran Daya (kVA)	Kapasitas (kVA)	Persentase Pembebanan (%)
1	6,8	160	4,25
2	6,09	160	3,80
3	6,98	160	4,36
4	7,3	160	4,56
5	8,5	160	5,31

Tabel 4.30 Hasil Pengukuran Beban Harian Gardu BE 50

Jam	Hasil Pengukuran Daya (kVA)	Kapasitas (kVA)	Persentase Pembebanan (%)
6	10,07	160	6,29
7	32,6	160	20,37
8	35,58	160	22,23
9	36,81	160	23,01
10	35,52	160	22,20
11	66,06	160	41,29
12	38,67	160	24,16
13	36,45	160	22,78
14	36,27	160	22,66
15	35,07	160	21,91
16	36,63	160	22,89
17	20,7	160	12,93
18	15,6	160	9,75
19	17,4	160	10,87
20	22,68	160	14,17
21	18,9	160	11,81
22	5,7	160	3,56
23	6,8	160	4,25
24	6,78	160	4,23

Data pada Tabel 4.15 di atas menunjukkan hasil pengukuran pada transformator dengan nomor gardu BE 50. Data pada tabel di atas dapat dilihat dalam bentuk grafik seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.7 dibawah ini.



Gambar 4.9 Karakteristik Pembebanan harian Gardu Distribusi BE 50

Data Tabel 4.15 dan grafik pada Gambar 4.9 di atas menunjukkan bahwa waktu beban Puncak (WBP) pada Gardu distribusi BE 50 terjadi pada pukul 11.00 WIB yaitu sebesar 66,06 kVA atau 41,29% dari kapasitas transformator tersebut.

4.1.3.2 Hasil Pengukuran Harmonisa Tegangan dan Arus

Selama pengukuran beban harian selama 24 jam dilakukan, Penulis juga melakukan pengukuran *Total Harmonic Distortioin* (THD) arus dan tegangan hingga orde harmonik ke-15. Hasil pengukuran menunjukkan nilai yang beragam, namun data THD pada saat waktu beban puncak (WBP) akan dianalisis. Hasil pengukuran THD pada s yang dilakukan pada ketiga gardu distribusi rumah tangga saat WBP sebagai berikut:

a. Transformator gardu BE 39 : Pukul 08.00 WIB

Tabel 4.31 Hasil Pengukuran Harmonisa Transformator Gardu BE 39

Fasa	THD Tegangan (%)	THD Arus (%)	Orde Harmonik	Arus Harmonik (A)
R	1,1	2,17%	1	148,2
			3	1,378
			5	2,806
			7	0,958
			9	0,193
			11	0,398
			13	0,356
			15	0,171
S	1,18	4,40%	1	144,6
			3	3,285
			5	3,926
			7	2,146
			9	0,543
			11	0,391
			13	0,39
			15	0,111
T	1,06	2,46%	1	150,2
			3	1,824
			5	2,292
			7	1,288
			9	0,775
			11	0,706
			13	0,811
			15	0,345

b. Transformator gardu BE 47 : Pukul 15.00 WIB

Tabel 4.32 Hasil Pengukuran Harmonisa Transformator Gardu BE 47

Fasa	THD Tegangan (%)	THD Arus (%)	Orde Harmonik	Arus Harmonik (A)
R	1,49	9,59%	1	41,2
			3	2,591
			5	1,821
			7	1,43
			9	0,676
			11	0,639
			13	0,4
			15	0,119
S	1,54	10,32%	1	34,6
			3	1,799
			5	1,441
			7	1,135
			9	0,256
			11	0,554
			13	0,408
			15	0,149
T	1,82	9,13%	1	41,4
			3	2,461
			5	2,085
			7	1,443
			9	0,885
			11	0,796
			13	0,406
			15	0,091

c. Transformator gardu BE 50 : Pukul 11.00 WIB

Tabel 4.33 Hasil Pengukuran Harmonisa Transformator Gardu BE 50

Fasa	THD Tegangan (%)	THD Arus (%)	Orde Harmonik	Arus Harmonik (A)
R	1,08	7,49%	1	42,2
			3	1,948
			5	0,95
			7	0,494
			9	0,57
			11	0,4
			13	0,218
			15	0,076
S	1,19	4,36%	1	69,8
			3	1,096
			5	0,6
			7	0,112
			9	0,51
			11	0,468
			13	0,366
			15	0,084
T	1,33	10,46%	1	69,4
			3	5,329
			5	1,999
			7	1,235
			9	0,894
			11	0,081
			13	0,141
			15	0,187

4.2 Hasil Analisis Pungukuran Harmonisa

Analisis hasil pengukuran harmonisa menggunakan standar yang berlaku pada IEEE std.519-2004 tentang “*IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems*” seperti yang ditunjukkan pada Tabel 2.1 dan Tabel 2.2 pada Bab 2. Dalam menentukan standar mana yang digunakan, penulis menghitung nilai perbandingan arus hubung singkat (*Isc*) dan arus beban nominal (*I*)

4.2.1 Perhitungan Arus Hubung Singkat (*Isc*) pada penyulang

Pada subbab ini proses perhitungan pada penyulang Pondok Chandra, Zamhuri, dan SUIK. Ketiga penyulang tersebut besumber pada GI yang sama, yaitu GI Rungkut. Untuk memudahkan proses perhitungan, impedansi sumber pada GI rungkut diperoleh dari PT. PLN pada perhitungsan semester 1 tahun 2018. MVA hubung singkat tiga fasa dan impedansi sumber pada GI Rungkut yaitu:

$$\begin{aligned} \text{MVA hubung singkat} &= 8877,1 \text{ MVA} \\ \text{Impedansi urutan positif } (Z_{S1}) &= 0,0011 + j 0,0123 \text{ pu} \\ \text{Impedansi urutan negatif } (Z_{S2}) &= 0,0010 + j 0,0122 \text{ pu} \\ \text{Impedansi urutan nol } (Z_{S0}) &= 0,0033 + j 0,0147 \text{ pu} \\ \text{MVA}_{\text{base}} &= 100 \text{ MVA} \end{aligned}$$

Ketiga penyulang tersebut disuplai oleh trafo dengan kapasitas 60 MVA yang memiliki nilai reaktansi 12,48%. Sehingga nilai impedansi trafo dalam pu dapat dihitung menggunakan persamaan di bawah:

$$\begin{aligned} ZT_{\text{new}} &= ZT_{\text{old}} \frac{MVA_{\text{base}}}{MVA_T} \text{ pu} \\ ZT_{\text{new}} &= 12,48\% \frac{100 \text{ MVA}}{60 \text{ MVA}} \text{ pu} \\ ZT_{\text{new}} &= 0.208 \text{ pu} \end{aligned}$$

Untuk ketiga penyulang, nilai impedansi tersebut dapat digunakan.

4.2.1.1 Perhitungan Arus Hubung Singkat Penyulang Pondok Chandra

4.2.1.1.1 Perhitungan Impedansi Setiap Trafo

Data teknis penghantar penyulang Pondok Chandra berdasarkan data PT. PLN (Persero) UP3 Surabaya Selatan ULP Rungkut sebagai berikut:

$$\text{Jenis Penghantar} = \text{ACCC}$$

Luas Penampang = 150 mm²
 Impedansi kabel (Z_1, Z_2) = 0,2162 + j 0,3305 ohm/km
 Panjang Saluran = 9,421 kms
 Tegangan Sistem = 20 kV

Impedansi saluran tiap transformator memiliki nilai berbeda yang disebabkan oleh jarak tiap gardu tersebut dari Gardu induk. Untuk memudahkan perhitungan, nilai impedansi saluran penyulang Pondok chandra diubah dalam satuan per unit (pu), menggunakan persamaan 2.15 sebagai berikut :

$$Z_{base} = \frac{KV_{base}^2}{MVA_{base}} \text{ Ohm}$$

$$Z_{base} = \frac{20^2}{100} \text{ Ohm} = 4 \text{ Ohm}$$

Dengan menggunakan persamaan 2.19 yang tertera pada Bab 2, hasil perhitungan impedansi dalam pu untuk masing-masing trafo adalah:

- BE 376 dengan perkiraan posisi trafo adalah 70% dari panjang saluran yaitu 6,5947 km

$$Z_{l1} = \frac{0,2162 + j 0,3305 \times 6,5947}{4} \text{ pu}$$

$$Z_{l1} = 0,3564 + j 0,54488 \text{ pu}$$
- BE 554 dengan perkiraan posisi trafo adalah 75% dari panjang saluran yaitu 7,065 km

$$Z_{l2} = \frac{0,2162 + j 0,3305 \times 7,065}{4} \text{ pu}$$

$$Z_{l2} = 0,3819 + j 0,5838 \text{ pu}$$
- BE dengan perkiraan posisi trafo adalah 80% dari panjang saluran yaitu 7,5368 km

$$Z_{l3} = \frac{0,2162 + j 0,3305 \times 7,5368}{4} \text{ pu}$$

$$Z_{l3} = 0,4073 + j 0,6227 \text{ pu}$$

Setelah semua nilai impedansi dihitung, impedansi total penyulang dapat dihitung dengan menggunakan persamaan 2.20 pada Bab 2. Impedansi total (Z_n) dari setiap trafo dapat dilihat pada tabel 4.19 di bawah ini.

Tabel 4.34 Impedansi Total Setiap Trafo Pada Penyulang Pondok Chandra

Nomor Gardu	Impedansi Total (pu)
BE 376	0,5655 + j 0,5571
BE 554	0,5910 + j 0,5961
BE 549	0,6164 + j 0,6350

4.2.1.1.2 Perhitungan Arus Hubung Singkat Setiap Trafo di Penyulang Pondok Chandra

Perhitungan arus hubung singkat tiga fasa pada tiap trafo secara detail dijelaskan secara detail sebagai berikut:

$$\text{Daya dasar (MVA}_{base}) = 100 \text{ MVA}$$

$$\text{Tegangan dasar (KV}_{base}) = 20 \text{ kV}$$

$$\text{Tegangan dalam pu (E}_a) = 1,0 \text{ pu}$$

Arus dasar sebesar:

$$I_{base} = \frac{MVA_{base}}{\sqrt{3} \times KV_{base}} \times 1000A$$

$$I_{base} = \frac{100}{\sqrt{3} \times 20} \times 1000A = 2.886,75$$

Arus hubung singkat tiga fasa (I_a) pada sisi tegangan menengah dapat dihitung dengan menggunakan persamaan 2.10 pada bab 2. Untuk mencari nilai arus hubung singkat pada sisi tegangan rendah dapat menggunakan perbandingan tegangan. Hasil perhitungan arus hubung singkat pada setiap transformator dapat dilihat pada Tabel 4.20.

Tabel 4.35 Arus Gangguan Tiga Fasa Pada Setiap Trafo Beban Rumah Tangga

Nomor Gardu	Arus Gangguan Sisi Tegangan Menengah (A)	Arus Gangguan sisi Tegangan (A)
BE 376	2400,34	120017,03
BE 554	2383,00	119150,10
BE 549	2363,62	118181,12

4.2.1.2 Perhitungan Arus Hubung Singkat Penyulang Zamhuri

4.2.1.2.1 Perhitungan Impedansi Setiap Trafo

Data teknis penghantar penyulang Zamhuri berdasarkan data PT. PLN (Persero) UP3 Surabaya Selatan ULP Rungkut sebagai berikut:

Jenis Penghantar	= ACCC
Luas Penampang	= 150 mm ²
Impedansi kabel (Z ₁ ,Z ₂)	= 0,2162 + j 0,3305 ohm/km
Panjang Saluran	= 13,224 kms
Tegangan Sistem	= 20 kV

Impedansi saluran tiap transformator memiliki nilai berbeda yang disebabkan oleh jarak tiap gardu tersebut dari Gardu induk. Untuk memudahkan perhitungan, nilai impedansi saluran penyulang Pondok chandra diubah dalam satuan per unit (pu), menggunakan persamaan 2.15 pada Bab 2 sebagai berikut :

$$Z_{base} = \frac{KV_{base}^2}{MVA_{base}} \text{ Ohm}$$

$$Z_{base} = \frac{20^2}{100} \text{ Ohm} = 4 \text{ Ohm}$$

Dengan menggunakan persamaan 2.19 yang tertera pada Bab 2, hasil perhitungan impedansi dalam pu untuk masing-masing trafo adalah:

- BE 1107 dengan perkiraan posisi trafo adalah 60% dari panjang saluran yaitu 7,9344 km
$$Z_{l1} = \frac{0,2162 + j 0,3305 \times 7,9344}{4} \text{ pu}$$
$$Z_{l1} = 0,4288 + j 0,6555$$
- BE 807 dengan perkiraan posisi trafo adalah 58% dari panjang saluran yaitu 7,6699 km
$$Z_{l2} = \frac{0,2162 + j 0,3305 \times 7,6699}{4} \text{ pu}$$
$$Z_{l2} = 0,4145 + j 0,6337$$
- BE 1846 dengan perkiraan posisi trafo adalah 65% dari panjang saluran yaitu 8,5956 km
$$Z_{l3} = \frac{0,2162 + j 0,3305 \times 8,5956}{4} \text{ pu}$$
$$Z_{l3} = 0,4646 + j 0,7102$$

Setelah semua nilai impedansi dihitung, impedansi total penyulang dapat dihitung dengan menggunakan persamaan 2.20 pada Bab 2. Impedansi total (Z_n) dari setiap trafo dapat dilihat pada tabel 4.21 di bawah ini.

Tabel 4.36 Impedansi Total Setiap Trafo Pada Penyulang Zamhuri

Nomor Gardu	Impedansi Total (pu)
BE 1107	$0,6379 + j 0,6678$
BE 807	$0,6236 + j 0,6460$
BE 1846	$0,6736 + j 0,7225$

4.2.1.2.2 Perhitungan Arus Hubung Singkat Setiap Trafo di Penyulang Zamhuri

Perhitungan arus hubung singkat tiga fasa pada tiap trafo secara detail dijelaskan secara detail sebagai berikut:

$$\text{Daya dasar (MVA}_{base}) = 100 \text{ MVA}$$

$$\text{Tegangan dasar (KV}_{base}) = 20 \text{ kV}$$

$$\text{Tegangan dalam pu (E}_a) = 1,0 \text{ pu}$$

Arus dasar sebesar:

$$I_{base} = \frac{MVA_{base}}{\sqrt{3} \times KV_{base}} \times 1000A$$

$$I_{base} = \frac{100}{\sqrt{3} \times 20} \times 1000A = 2.886,75 \text{ A}$$

Arus hubung singkat tiga fasa (I_{sc}) pada sisi tegangan menengah dapat dihitung dengan menggunakan persamaan 2.10 pada Bab 2. Untuk mencari nilai arus hubung singkat pada sisi tegangan rendah dapat menggunakan perbandingan tegangan. Hasil perhitungan arus hubung singkat pada setiap transformator dapat dilihat pada Tabel 4.22.

Tabel 4.37 Arus Gangguan Tiga Fasa Pada Setiap Trafo Beban Bisnis

Nomor Gardu	Arus Gangguan Sisi Tegangan Menengah (A)	Arus Gangguan sisi Tegangan (A)
BE 1107	2345,80	117289,7688
BE 807	2357,80	117889,9205
BE 1846	2313,42	115671,2051

4.2.1.3 Perhitungan Arus Hubung Singkat Penyulang SUIK

4.2.1.3.1 Perhitungan Impedansi Setiap Trafo

Data teknis penghantar penyulang SUIK berdasarkan data PT. PLN (Persero) UP3 Surabaya Selatan ULP Rungkut sebagai berikut:

Jenis Penghantar	= ACCC
Luas Penampang	= 150 mm ²
Impedansi kabel (Z ₁ ,Z ₂)	= 0,2162 + j 0,3305 ohm/km
Panjang Saluran	= 9,649 kms
Tegangan Sistem	= 20 kV

Impedansi saluran tiap transformator memiliki nilai berbeda yang disebabkan oleh jarak tiap gardu tersebut dari Gardu induk. Untuk memudahkan perhitungan, nilai impedansi saluran penyulang SUIK diubah dalam satuan per unit (pu), menggunakan persamaan 2.15 pada bab 2 sebagai berikut:

$$Z_{base} = \frac{KV_{base}^2}{MVA_{base}} \text{ Ohm}$$

$$Z_{base} = \frac{20^2}{100} \text{ Ohm} = 4 \text{ Ohm}$$

Dengan menggunakan persamaan 2.19 pada Bab 2, hasil perhitungan impedansi dalam pu untuk masing-masing trafo adalah:

- BE 39 dengan perkiraan posisi trafo adalah 30% dari panjang saluran yaitu 2,894 km
$$Z_{l1} = \frac{0,2162 + j 0,3305 \times 2,894}{4} \text{ pu}$$
$$Z_{l1} = 0,1564 + j 0,2391 \text{ pu}$$
- BE 47 dengan perkiraan posisi trafo adalah 35% dari panjang saluran yaitu 3,3771 km
$$Z_{l2} = \frac{0,2162 + j 0,3305 \times 3,3771}{4} \text{ pu}$$
$$Z_{l2} = 0,1825 + j 0,2790 \text{ pu}$$
- BE 50 dengan perkiraan posisi trafo adalah 40% dari panjang saluran yaitu 3,8596 km
$$Z_{l3} = \frac{0,2162 + j 0,3305 \times 3,8596}{4} \text{ pu}$$
$$Z_{l3} = 0,2086 + j 0,3188 \text{ pu}$$

Setelah semua nilai impedansi dihitung, impedansi total penyulang

dapat dihitung dengan menggunakan persamaan 2.20 pada Bab 2. Impedansi total (Z_n) dari setiap trafo dapat dilihat pada tabel 4.23 di bawah ini.

Tabel 4.38 Impedansi Total Setiap Trafo Pada Penyulang SUIK

Nomor Gardu	Impedansi Total (pu)
BE 39	$0,3655 + j 0,2514$
BE 47	$0,3916 + j 0,2913$
BE 50	$0,4177 + j 0,3311$

4.2.1.3.2 Perhitungan Arus Hubung Singkat Setiap Trafo di Penyulang SUIK

Perhitungan arus hubung singkat tiga fasa pada tiap trafo secara detail dijelaskan secara detail sebagai berikut:

$$\text{Daya dasar (MVA}_{base}) = 100 \text{ MVA}$$

$$\text{Tegangan dasar (KV}_{base}) = 20 \text{ kV}$$

$$\text{Tegangan dalam pu (E}_a) = 1,0 \text{ pu}$$

Arus dasar sebesar:

$$Z_{base} = \frac{MVA_{base}}{\sqrt{3} \times KV_{base}} \times 1000A$$

$$Z_{base} = \frac{100}{\sqrt{3} \times 20} \times 1000A = 2.886,75 \text{ A}$$

Arus hubung singkat tiga fasa (I_{sc}) pada sisi tegangan menengah dapat dihitung dengan menggunakan persamaan 2.10 pada Bab 2. Untuk mencari nilai arus hubung singkat pada sisi tegangan rendah dapat menggunakan perbandingan tegangan. Hasil perhitungan arus hubung singkat pada setiap transformator dapat dilihat pada Tabel 4.24.

Tabel 4.39 Arus Gangguan Tiga Fasa Pada Setiap Trafo Beban Industri

Nomor Gardu	Arus Gangguan Sisi Tegangan Menengah (A)	Arus Gangguan sisi Tegangan (A)
BE 39	2440,69	122034,84
BE 47	2447,72	122386,44
BE 50	2450,31	122515,69

4.2.2 Hasil Analisis Pengukuran THD Arus

THD Arus akan dianalisis pada masing-masing transformator di setiap jenis beban berdasarkan standar IEEE 519. Arus hubung singkat (ISC) yang telah dihitung adalah arus hubung singkat yang ada pada PCC (Point of Common Coupling) sedangkan IL adalah arus beban nominal diperoleh melalui pengukuran pada transformator. Perbandingan nilai Isc dan Il dapat ditunjukkan pada Tabel 4.25 dibawah.

Tabel 4.40 Perbandingan Nilai Isc dan Il Pada Setiap Jenis Beban

Jenis Beban	Nomor Gradu	Isc (kA)	Il (A)	Isc/Il
Rumah Tangga	BE 376	120.017	173,63	691,22
	BE 554	119.150	146,2	814,97
	BE 549	118.181	146,26	808,02
Bisnis	BE 1107	117.289	167,47	700,35
	BE 807	117.889,9	135,23	871,77
	BE 1846	115.671	195,06	593,00
Industri	BE 39	122.034	177,63	687,01
	BE 47	122.386	39,26	3117,32
	BE 50	122.515	101,53	1206,68

Hasil perhitungan menunjukkan Isc/Il pada jenis beban rumah tangga, bisnis dan transformator BE 39 menunjukkan nilai antara 100-1000, sehingga standar nilai THD arus yang digunakan adalah 15%. Namun untuk Transformator beban industri dengan nomor gardu BE 47 dan BE 50 menggunakan standar THD arus 20% karena memiliki nilai Isc/Il lebih besar dari 1000. Adapun hasil analisis yang dilakukan pada setiap jenis beban dapat ditunjukkan pada Tabel 4.26 di bawah. Data tersebut menunjukkan bahwa THD arus Transformator sudah sesuai dengan standar yang berlaku, kecuali pada Transformator BE 554 Fasa S tidak sesuai standar dengan nilai THD arus 16,83%.

Tabel 4.41 Analisa THD Arus Pada Setiap Jenis Beban

Jenis Beban	Nomor Gardu	Fasa	Pengukuran (%)	Standar (%)	keterangan
Rumah Tangga	BE 376	R	9,21	15	Sesuai Standar
		S	6,12	15	Sesuai Standar
		T	10,13	15	Sesuai Standar
	BE 554	R	9,7	15	Sesuai Standar
		S	16,83	15	Tidak Sesuai
		T	9,82	15	Sesuai Standar
	BE 549	R	9,95	15	Sesuai Standar
		S	11,19	15	Sesuai Standar
		T	12,85	15	Sesuai Standar
Bisnis	BE 1107	R	12,34	15	Sesuai Standar
		S	14,06	15	Sesuai Standar
		T	9,94	15	Sesuai Standar
	BE 807	R	13,57	15	Sesuai Standar
		S	10,66	15	Sesuai Standar
		T	12,35	15	Sesuai Standar
	BE 1846	R	9,95	15	Sesuai Standar
		S	8,82	15	Sesuai Standar
		T	5,29	15	Sesuai Standar
Industri	BE 39	R	2,17	15	Sesuai Standar
		S	4,40	15	Sesuai Standar
		T	2,46	15	Sesuai Standar
	BE 47	R	9,59	20	Sesuai Standar
		S	10,32	20	Sesuai Standar
		T	9,13	20	Sesuai Standar
	BE 50	R	7,49	20	Sesuai Standar
		S	4,36	20	Sesuai Standar
		T	10,46	20	Sesuai Standar

4.2.3 Hasil Analisis Pengukuran THD Tegangan

Pada Subbab ini, penulis melakukan analisis hasil pengukuran THD tegangan pada setiap jenis beban dengan menggunakan standar dari IEEE std.519-2014, seperti yang tertera pada Tabel 2.2 pada Bab 2.

Dikarenakan pengukuran dilakukan pada sisi tegangan rendah (400V), maka standar harmonisa tegangan yang digunakan adalah 5%. Tabel 4.27 di bawah menunjukkan perbandingan hasil pengukuran THD tegangan pada setiap jenis beban dengan standar yang berlaku. Data tersebut menunjukkan bahwa nilai THD Tegangan pada setiap transformator telah sesuai dengan standar dari IEEE std.519-2014

Tabel 4.42 Analisa THD Tegangan Pada Setiap Jenis Beban

Jenis Beban	Nomor Gardu	Fasa	V_{THD} pengukuran (%)	V_{THD} Standar (%)	Keterangan
Rumah Tangga	BE 376	R	1,41	5	Sesuai Standar
		S	1,48	5	Sesuai Standar
		T	1,46	5	Sesuai Standar
	BE 554	R	2,03	5	Sesuai Standar
		S	1,53	5	Sesuai Standar
		T	1,74	5	Sesuai Standar
	BE 549	R	1,37	5	Sesuai Standar
		S	1,51	5	Sesuai Standar
		T	1,39	5	Sesuai Standar
Bisnis	BE 1107	R	1,79	5	Sesuai Standar
		S	1,96	5	Sesuai Standar
		T	1,86	5	Sesuai Standar
	B3 807	R	2,17	5	Sesuai Standar
		S	2,22	5	Sesuai Standar
		T	1,83	5	Sesuai Standar
	BE 1846	R	1,65	5	Sesuai Standar
		S	1,57	5	Sesuai Standar
		T	1,50	5	Sesuai Standar

Tabel 4.43 Analisa THD Tegangan Pada Setiap Jenis Beban

Jenis Beban	Nomor Gardu	Fasa	V_{THD} pengukuran (%)	V_{THD} Standar (%)	Keterangan
Industri	BE 39	R	1,1	5	Sesuai Standar
		S	1,18	5	Sesuai Standar
		T	1,06	5	Sesuai Standar
	BE 47	R	1,49	5	Sesuai Standar
		S	1,54	5	Sesuai Standar
		T	1,82	5	Sesuai Standar
	BE 50	R	1,08	5	Sesuai Standar
		S	1,19	5	Sesuai Standar
		T	1,33	5	Sesuai Standar

4.3 Analisis Hasil Perhitungan Nilai Faktor K

Berdasarkan persamaan 2.4 pada Bab 2, Faktor-k sama dengan jumlah kuadrat dari arus frekuensi harmonisa dikalikan dengan kuadrat dari angka frekuensi harmonisa yang dinyatakan sebagai perbandingan dari total arus rms tiap fasa yang diperoleh dari hasil pengukuran. Tabel 4.28 di bawah menunjukkan hasil perhitungan Faktor-k transformator pada setiap jenis beban.

Tabel 4.44 Hasil Perhitungan Nilai Faktor-k Setiap Jenis Beban

Jenis Beban	Nomor Gardu	Fasa	Faktor-k
Rumah Tangga	BE 376	R	1,1269
		S	1,0584
		T	1,1454
	BE 554	R	1,0973
		S	1,3548
		T	1,1065
	BE 549	R	1,1087
		S	1,1565
		T	1,3564

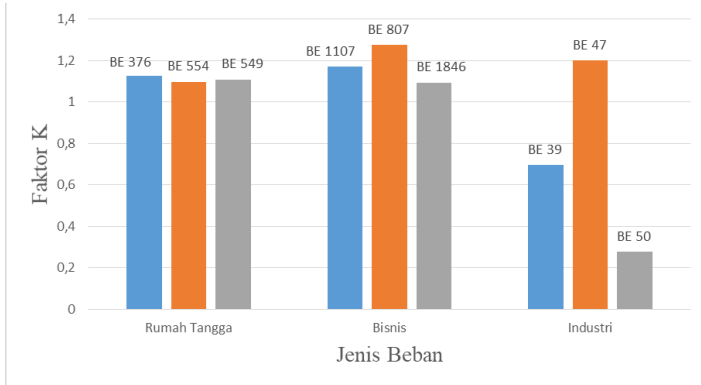
Tabel 4.45 Hasil Perhitungan Nilai Faktor-k Setiap Jenis Beban

Jenis Beban	Nomor Gardu	Fasa	Faktor-k
Bisnis	BE 1107	R	1,1692
		S	1,2820
		T	1,1322
	B3 807	R	1,2748
		S	1,1383
		T	1,2180
	BE 1846	R	1,0934
		S	1,1109
		T	1,1254
Industri	BE 39	R	0,6959
		S	0,7106
		T	0,7170
	BE 47	R	1,2004
		S	1,1633
		T	1,2478
	BE 50	R	0,2757
		S	0,4043
		T	0,4343

Berdasarkan data di atas, pengaruh jenis beban terhadap nilai faktor-k pada setiap fasa transformator sebagai berikut:

o Fasa R

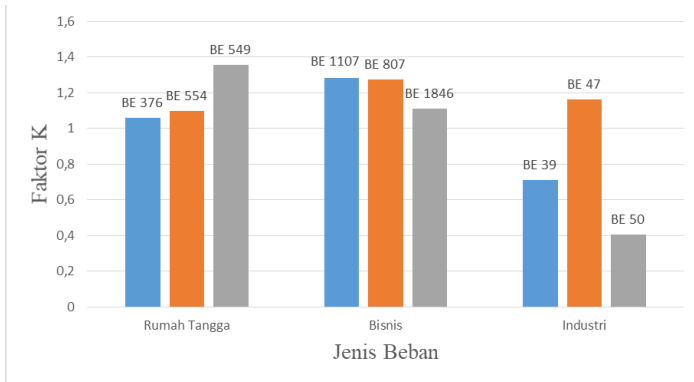
Karakteristik nilai faktor-k fasa R transformator tertera dalam bentuk grafik seperti yang terdapat pada Gambar 4.10 di bawah ini. Gambar 4.10 menunjukkan bahwa nilai faktor-k Transformator BE 1107 dan BE 807 jenis beban bisnis memiliki adalah data dengan nilai tertinggi, diikuti dengan jenis beban rumah tangga pada transformator BE 554. Sedangkan jenis beban industri memiliki nilai faktor-k terendah pada transformator BE 39 dan 50.



Gambar 4.10 Nilai Faktor-k Fasa R Setiap Transformator

○ Fasa S

Karakteristik nilai faktor-k fasa S transformator tertera dalam bentuk grafik seperti yang terdapat pada Gambar 4.11 di bawah ini.

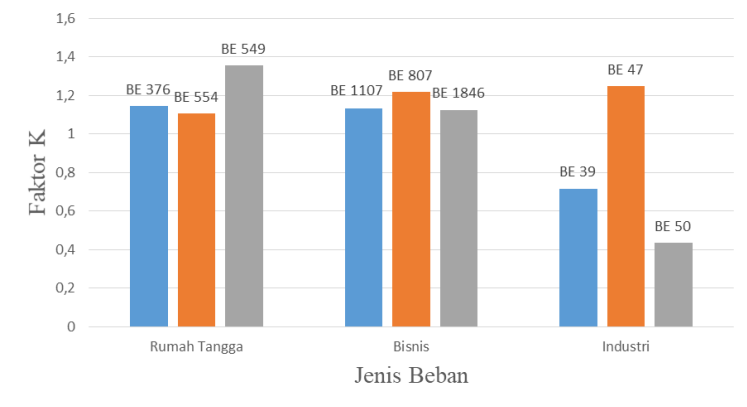


Gambar 4.11 Nilai Faktor-k Fasa S Setiap Transformator

Gambar 4.11 menunjukkan bahwa nilai faktor-k Transformator BE 554 dan BE 549 jenis beban rumah tangga adalah data dengan nilai yang tertinggi pada, diikuti dengan jenis beban bisnis pada transformator BE 1107. Sedangkan jenis beban industri memiliki nilai faktor-k terendah pada transformator BE 39 dan 50.

o Fasa T

Karakteristik nilai faktor-k fasa T tertera dalam bentuk grafik seperti yang terdapat pada Gambar 4.12 di bawah. Gambar 4.12 menunjukkan bahwa nilai faktor-k Transformator BE 549 jenis beban rumah tangga adalah data dengan nilai yang tertinggi. Sedangkan, jenis beban industri transformator BE 39 dan 50 memiliki nilai faktor-k yang terendah.



Gambar 4.12 Grafik Nilai Faktor-k Fasa T Setiap Transformator

Pola data faktor-k untuk ketiga fasa menunjukkan bahwa jenis pelanggan rumah tangga dan bisnis memiliki tren data faktor-k yang tertinggi, sedangkan untuk jenis beban industri memiliki tren data yang terendah. Hal ini menunjukkan bahwa harmonisa pada jenis pelanggan rumah tangga dan bisnis juga tinggi karena memiliki sumber beban non-linier seperti lampu led, pendingin ruangan, dan peralatan hemat energi lainnya. Hal tersebut menyebabkan, jenis pelanggan rumah tangga, bisnis, dan industry sangat mempengaruhi nilai faktor-k.

4.4 Analisis Evaluasi Kapasitas Transformator yang Terpasang

Berdasarkan IEEE std. c57.100-1998, evaluasi kapasitas transformator yang terpasang bisa dilakukan dengan menghitung nilai *derating factor* (D). Setelah didapatkan nilai *derating factor* (D), Pembebanan maskimal transformator distribusi bisa didapatkan sehingga nilai tersebut dibandingkan dengan persentase pembebanan transformator

pada saat waktu beban puncak (WBP) yang telah diukur sebelumnya.

4.4.1 Perhitungan *Derating Factor* (D)

Berdasarkan persamaan 2.5 yang tertera pada Bab 2. Dalam Menghitung nilai *Derating factor* (D), diperlukan nilai Faktor rugi-rugi hamonisa pada belitan (F_{HL}) dan nilai rugi arus eddy belitan dibawah kondisi rating (P_{EC}). F_{HL} atau faktor rugi-rugi harmonisa pada belitan dapat dihitung dengan persamaan 2.6 yang tertera pada Bab 2.

Seluruh Transformator yang diuji adalah transformator Distribusi Bambang Djaya berkapasitas 160 kVA. Berdsarkan yang diperoleh dari PT. Bambang Djaya, nilai P_{EC} Transformator 160 kVA adalah 3,92% atau 0,0392 pu dari rugi-rugi belitan transformator. Berdasarkan data tersebut, hasil perhitungan *derating factor* (D) pada seluruh transformator dapat dilihat pada Tabel 4.29 di bawah ini.

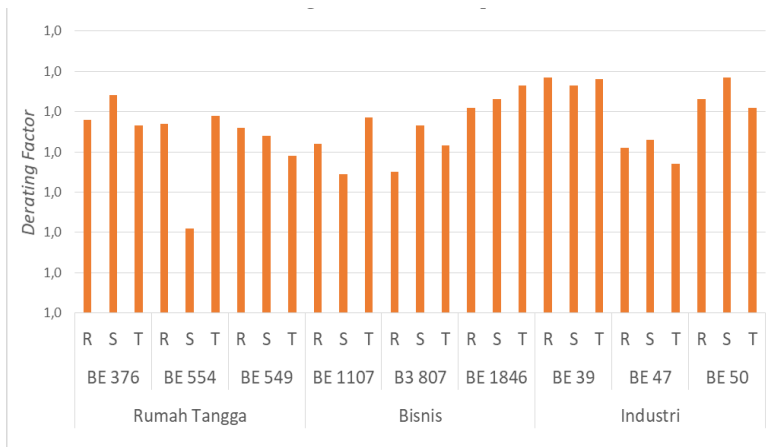
Tabel 4.46 Hasil Perhitungan Nilai *Derating Factor* (D) Transformator

Jenis Beban	Nomor Gardu	Fasa	F_{HL}	D
Rumah Tangga	BE 376	R	1,1268	0,9976
		S	1,0593	0,9988
		T	1,1416	0,9973
	BE 554	R	1,1357	0,9974
		S	1,4176	0,9922
		T	1,1166	0,9978
	BE 549	R	1,1465	0,9972
		S	1,1722	0,9968
		T	1,226	0,9958
Bisnis	BE 1107	R	1,1899	0,9964
		S	1,272	0,9949
		T	1,1279	0,9977
	B3 807	R	1,2681	0,995
		S	1,1423	0,9973
		T	1,1956	0,9963
	BE 1846	R	1,0952	0,9982

Tabel 4.47 Hasil Perhitungan Nilai *Derating Factor* (D) Transformator

Jenis Beban	Nomor Gardu	Fasa	F_{HL}	D
Industri		S	1,0703	0,9986
		T	1,0357	0,9993
	BE 39	R	1,0135	0,9997
		S	1,0357	0,9993
		T	1,0211	0,9996
	BE 47	R	1,2028	0,9962
		S	1,1766	0,9966
		T	1,2436	0,9954
	BE 50	R	1,0662	0,9986
S		1,0185	0,9997	
T		1,0973	0,9982	

Data pada Tabel 4.29 dapat dilihat dalam bentuk diagram batang seperti yang terlihat pada Gambar 4.13 di bawah ini.



Gambar 4.13 Nilai Perhitungan *Derating Factor* Pada Setiap Jenis Beban

4.4.2 Analisis Hasil Evaluasi Transformator Yang Terpasang

Nilai *derating factor* (D) pada transformator yang telah dihitung

dapat digunakan untuk mendapatkan pembebanan maksimal transformator yang dianjurkan setelah adanya harmonisa. Tabel 4.29 di bawah menunjukkan analisis evaluasi pemasangan transformator distribusi pada setiap jenis beban.

Tabel 4.48 Analisis Hasil Evaluasi Transformator Yang Terpasang

Jenis Beban	Nomor Gardu	Fasa	Pembebanan Maksimal Transformator	Persentase Beban Transformator WPB (%)	Keterangan
Rumah Tangga	BE 376	R	99,76	75,54	Sesuai
		S	99,88		
		T	99,73		
	BE 554	R	99,74	67,1	Sesuai
		S	99,22		
		T	99,78		
	BE 549	R	99,72	64,39	Sesuai
		S	99,68		
		T	99,58		
Bisnis	BE 1107	R	99,64	76,38	Sesuai
		S	99,49		
		T	99,77		
	B3 807	R	99,5	58,5	Sesuai
		S	99,73		
		T	99,63		
	BE 1846	R	99,82	86,53	Sesuai
		S	99,86		
		T	99,93		
Industri	BE 39	R	99,97	75,54	Sesuai
		S	99,93		
		T	99,96		

Tabel 4.49 Analisis Hasil Evaluasi Transformator Yang Terpasang

Jenis Beban	Nomor Gardu	Fasa	Pembebanan Maksimal Transformator	Persentase Beban Transformator WPB (%)	Keterangan		
		S	99,93	16,96	Sesuai		
		T	99,96				
	BE 47	R	99,62				
		S	99,66				
		T	99,54				
	BE 50	R	99,86			41,29	Sesuai
		S	99,97				
		T	99,82				

Data pada Tabel 4.23 menunjukkan bahwa kapasitas transformator distribusi yang terpasang sudah sesuai karena pembebanan transformator tidak melebihi pembebanan yang dianjurkan akibat efek dari harmonisa. Hal ini menunjukkan transformator tersebut masih aman digunakan sehingga *uprating* transformator tidak diperlukan. Namun data tersebut bisa dijadikan acuan apabila terjadi perkembangan jumlah beban dikemudian hari.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB V

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan pada pelaksanaan tugas akhir ini didapat beberapa kesimpulan sebagai berikut:

- a. Hasil pengukuran beban jenis pelanggan rumah tangga pada Transformator BE 376, BE 554, dan 549 masing-masing menunjukkan waktu beban puncak pada pukul 20.00, 20.00, dan 21.00 WIB.
- b. Hasil pengukuran beban jenis pelanggan bisnis pada Transformator BE 1107, BE 807, dan 1846 masing-masing menunjukkan waktu beban puncak pada pukul 21.00, 18.00, dan 17.00 WIB.
- c. Hasil pengukuran beban jenis pelanggan rumah tangga pada Transformator BE 39, BE 47, dan 50 masing-masing menunjukkan waktu beban puncak pada pukul 08.00, 15.00, dan 11.00 WIB.
- d. Dari Hasil Pengukuran nilai THD arus dan Tegangan pada waktu beban puncak (WBP) masih sesuai standar IEEE 519 "*IEEE Recommended Practices and Requirement for harmonic Control in electric in Electrical Power System* ", kecuali pada Transformator BE 554 Fasa S tidak sesuai standar dengan nilai THD arus 16,83%.
- e. Nilai Faktor-k yang telah dihitung untuk ketiga fasa menunjukkan bahwa jenis pelanggan rumah tangga dan bisnis memiliki tren data faktor-k yang tertinggi, sedangkan untuk jenis beban industri memiliki tren data yang terendah. Hal ini menunjukkan bahwa harmonisa pada jenis pelanggan rumah tangga dan bisnis juga tinggi karena memiliki sumber beban non-linier seperti lampu led, pendingin ruangan, dan peralatan hemat energi lainnya. Hal tersebut menyebabkan, jenis pelanggan rumah tangga, bisnis, dan industri sangat mempengaruhi nilai faktor-k.
- f. Kapasitas transformator distribusi yang terpasang sudah sesuai karena pembebanan transformator tidak melebihi pembebanan maksimal transformator setelah adanya harmonisa. Hal ini menunjukkan transformator tersebut masih aman digunakan sehingga *uprating* transformator tidak diperlukan. Namun data tersebut bisa dijadikan acuan apabila terjadi pertumbuhan jumlah beban dikemudian hari.

- g. Apabila mengacu pada standar dari SPLN yang menganjurkan pembebanan transformator paling baik adalah 60%-80% dari kapasitasnya, Maka Transformator yang melebihi pembebanan tersebut harus dilakukan uprating yaitu Transformator BE 1846 beban bisnis dengan pembebanan 86,53%.

5.2 Saran

Saran yang dapat diberikan berdasarkan hasil analisis untuk pengembangan penelitian ini adalah:

- a. Diperlukan penambahan jumlah transformator distribusi pada ketiga jenis beban agar pola data lebih jelas terlihat.
- b. Dalam melakukan penelitian, disarankan untuk melakukan pengujian pada transformator dengan kapasitas yang lebih besar sehingga nilai THD arus dan tegangan bisa lebih besar.
- c. Suhu yang merupakan efek dari adanya harmonisa bisa ditambahkan dalam analisis pada penelitian selanjutnya.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] A. Baghini, *Handbook Of Power Quality*. USA: Jhon Wiley & Sons, Ltd, 2008.
- [2] S. Hasan, I. Daut, dan S. Taib, “*K-factor due to implementing of DC unbalanced/balanced of a transformer,*” dalam *2007 Asia-Pacific Conference on Applied Electromagnetics*, Melaka, Malaysia, 2007, hlm. 1–4.
- [3] S. J. Chapman, *Electric Machinery Fundamentals*, 4th ed. Australia: Elizabeth A. Jones, 2005.
- [4] Keputusan Direksi PT PLN (Persero), *Standar Konstruksi Gardu Distribusi dan Gardu Hubung Tenaga Listrik*. 2010.
- [5] Edaran Direksi PT PLN (Persero), “Metode Pemeliharaan Trafo Distribusi Berbasis Kaidah Manajemen Aset.” 2014.
- [6] S. Krishnamoorthy dan D. Jayabal, “*Evaluation of transformer loading and energy loss for increasing energy efficiency in distribution system,*” dipresentasikan pada 2015 12th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology, ECTI-CON 2015, 2015.
- [7] D. Suswanto, *Sistem Distribusi Tenaga Listrik*, 1st ed. Padang, 2009.
- [8] R. C. Dougan, M. F. McGranaghan, S. Santoso, dan H. W. Beaty, *Electrical Power Systems Quality*, Second. 2004.
- [9] C.Sankaran, *Power Quality*. USA: CRC Press LLC, 2002.
- [10] “*IEEE Recommended Practice and Requirements for*

- Harmonic Control in Electric Power Systems*,” IEEE.
- [11] “*IEEE Recommended Practice for Establishing Transformer Capability When Supplying Nonsinusoidal Load Currents*,” IEEE, Jul 1998.
 - [12] H. Saadat, *Power System Analysis*. New York: McGraw-Hill Book Company, 1999.
 - [13] S. J. Masykur, “Analisa Gangguan Hubung Singkat Tiga Fasa Pada Sistem Tenaga Listrik Dengan Metode Thevenin,” *Jurnal Sistem Teknik Industri*, vol. 6, Jul 2005.
 - [14] H. Kersting, *Distribution System Modelling and Analysis*. New Mexico: CRC Press, 2002.

LAMPIRAN

Lampiran 1. Data Spesifikasi Losses Transformator B&D

Merk	B&D
Kapasitas	160 kVA
No-Load Losses	378 Watt
Total Losses	2705 Watt
Winding Losses HV	1461 Watt
P_{EC} HV	0,6%
Winding Losses LV	788 Watt
P_{EC} LV	3,92%

Lampiran 2. Foto-Foto Ketika Pengukuran Beban dan Harmonisa



Pengukuran Siang Hari



Pengukuran Malam Hari



Pengukuran Suhu Menggunakan *Thermovision*

BIOGRAFI PENULIS



Agus Prawira Kusuma, lahir di Kota Langsa, Provinsi Aceh pada tanggal 17 Agustus 1997. Anak kedua dari tiga bersaudara. Selama kuliah penulis pernah aktif sebagai anggota sekaligus pernah menjadi ketua umum periode 2017-2018 PMKTR Surabaya. Selain itu, penulis juga pernah aktif pada kegiatan organisasi di Departemen Teknik Elektro yaitu sebagai anggota KALPATARU ELEKTRO ITS. Saat ini penulis aktif sebagai asisten Laboratorium Tegangan Tinggi Departemen Teknik Elektro Fakultas Teknologi Elektro ITS. Pendidikan formal yang telah ditempuh yaitu:

1. MIN Paya Bujok Kota Langsa
2. SMPN 3 Kota Langsa
3. SMAN 10 Fajar Harapan Kota Banda Aceh

Penulis dapat dihubungi pada email: agusprawirakusuma@gmail.com