

**ANALISA DAMPAK KETIDAKSEIMBANGAN BEBAN PADA ARUS
NETRAL DAN ENERGI YANG HILANG DENGAN METODE REGRESI
DI GARDU DISTRIBUSI UP3 BERAU**

LAPORAN TUGAS AKHIR

LAPORAN INI DISUSUN UNTUK MEMENUHI SALAH SATU SYARAT
MEMPEROLEH GELAR S1 PADA PRODI TEKNIK ELEKTRO
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI
UNIVERSITAS ISLAM SULTAN AGUNG SEMARANG



Oleh :

WAHYU HIDAYANTO

NIM. 30602200273

**PROGRAM STUDI TEKNIK ELEKTRO
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI
UNIVERSITAS ISLAM SULTAN AGUNG
SEMARANG**

2025

**ANALYSIS OF THE IMPACT OF LOAD IMBALANCE ON NEUTRAL
CURRENT AND ENERGY LOSS USING THE REGRESSION METHOD
AT THE DISTRIBUTION SUBSTATION UP3 BERAU**

FINAL PROJECT

PROPOSED TO COMPLETE THE REQUIREMENT TO OBTAIN A
BACHELOR'S DEGREE (S1) AT DEPARTEMENT OF INDUSTRIAL
ENGINEERING, FACULTY OF INDUSTRIAL TECHNOLOGY,
UNIVERSITAS ISLAM SULTAN AGUNG SEMARANG



Arranged By :

WAHYU HIDAYANTO

NIM. 30602200273

**ELECTRICAL ENGINEERING STUDY PROGRAM
INDUSTRIAL TECHNOLOGY FACULTY
SULTAN AGUNG ISLAMIC UNIVERSITY
SEMARANG**

2025

LEMBAR PENGESAHAN PEMBIMBING

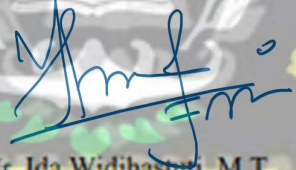
Laporan Tugas Akhir dengan judul “ANALISA DAMPAK KETIDAKSEIMBANGAN BEBAN PADA ARUS NETRAL DAN ENERGI YANG HILANG DENGAN METODE REGRESI DI GARDU DISTRIBUSI UP3 BERAU” ini disusun oleh:

Nama : WAHYU HIDAYANTO
NIM : 30602200273
Program Studi : Teknik Elektro

Telah disahkan dan disetujui oleh dosen pembimbing pada:

Hari : Rabu
Tanggal : 4 Juni 2025

Pembimbing I


Ir. Ida Widihaswati, M.T.
NIDN : 0005036501

Mengetahui,

Ka. Program Studi Teknik Elektro



Jenny Putri Hapsari, S.T., M.T.
NIDN : 0607018501

LEMBAR PENGESAHAN PENGUJI

Laporan Tugas Akhir dengan judul "ANALISA DAMPAK KETIDAKSEIMBANGAN BEBAN PADA ARUS NETRAL DAN ENERGI YANG HILANG DENGAN METODE REGRESI DI GARDU DISTRIBUSI UP3 BERAU" ini telah dipertahankan di depan Penguji sidang Tugas Akhir pada:

Hari : Rabu

Tanggal : 4 Juni 2025

Tim Penguji

Tanda Tangan

Ir. Agus Adhi Nugroho, M.T. IPM

NIDN : 0628086501

Ketua

Ir. Budi Pramono Jati, M.M., M.T.

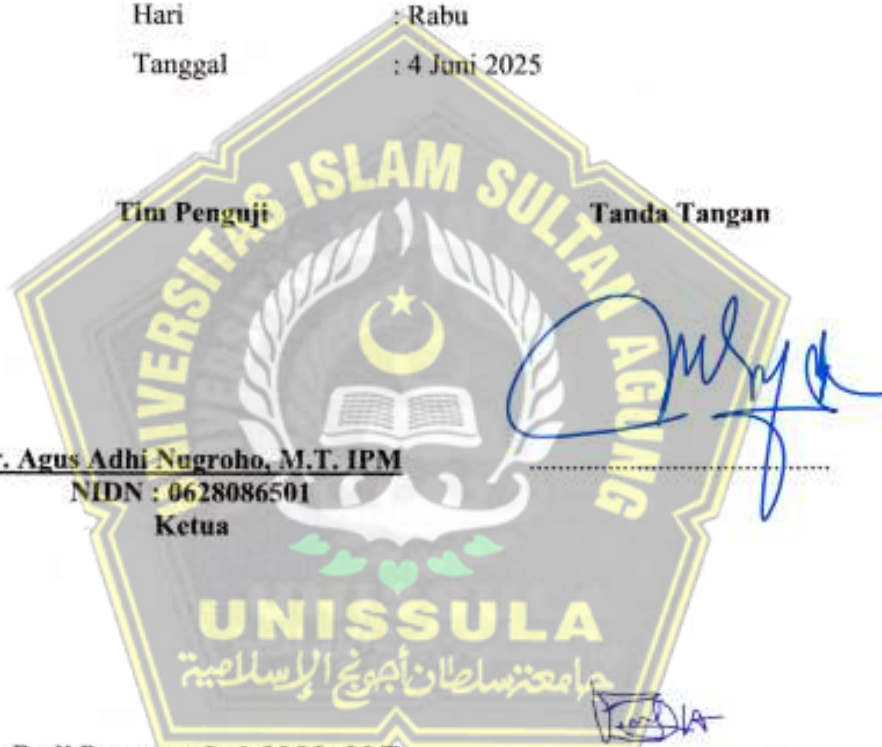
NIDN : 0623126501

Penguji I

Ir. Ida Widiastuti, M.T.

NIDN : 0005036501

Penguji II



Wahyu Hidayanto

PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI KARYA ILMIAH

Yang bertanda tangan di bawah ini :

Nama : Wahyu Hidayanto

NIM : 30602200273

Program Studi : Teknik Elektro

Fakultas : Teknologi Industri

Dengan ini saya menyerahkan karya ilmiah berupa Tugas Akhir dengan judul **“ANALISA DAMPAK KETIDAKSEIMBANGAN BEBAN PADA ARUS NETRAL DAN ENERGI YANG HILANG DENGAN METODE REGRESI DI GARDU DISTRIBUSI UP3 BERAU”** dan menyetujui menjadi hak milik Universitas Islam Sultan Agung serta memberikan hak bebas royalti non-eksklusif untuk disimpan, dialih mediakan, dikelola dalam pangkalan data dan publikasinya di internet atau media lain untuk kepentingan akademis selama tetap mencantumkan nama penulis sebagai pemilik Hak Cipta.

Pernyataan ini saya buat dengan sungguh-sungguh. Apabila dikemudian hari terbukti ada pelanggaran Hak Cipta/ Plagiarisme dalam karya ilmiah ini, maka segala bentuk tuntutan hukum yang timbul akan saya tanggung secara pribadi tanpa melibatkan pihak Universitas Islam Sultan Agung

Semarang, 25 Februari 2025

Yang Menyatakan





Wahyu Hidayanto

HALAMAN PERSEMBAHAN

Dengan segala kerendahan hati dan rasa syukur yang mendalam, karya ini dipersembahkan kepada:

1. Tuhan Yang Maha Esa. Sumber segala ilmu dan kebijaksanaan, yang telah memberi kesempatan untuk belajar, memahami, dan menyelesaikan perjalanan akademik ini.
2. Seluruh manusia di galaksi Bima Sakti. Skripsi ini bukan sekadar tugas akhir, melainkan sepotong kecil upaya untuk menambah wawasan bagi siapa pun yang haus akan ilmu. Semoga apa yang tertulis di dalamnya dapat bermanfaat bagi generasi sekarang maupun yang akan datang.
3. Kedua orang tuaku dan istri tercinta. Tiada kata yang cukup untuk menggambarkan betapa besar cinta, doa, dan pengorbanan mereka. Mereka adalah cahaya dalam kegelapan, pelabuhan dalam kelelahan, dan alasan utama mengapa langkah ini terus berjalan.
4. Dosen pembimbing Bu Ir Ida Widiastuti MT yang dengan kesabaran dan kebijaksanaan telah membimbing, mengarahkan, dan menyempurnakan setiap pemikiran yang ada dalam karya ini. Tanpa bimbingan dan ilmunya, skripsi ini hanyalah lembaran tanpa makna.
5. Kawan seperjuangan yang telah menjadi tempat berbagi keluh kesah, memberi tawa di tengah kepenatan, serta menemani perjalanan ini dengan semangat dan perjuangan yang sama. Tanpa kalian, perjalanan ini terasa lebih berat.
6. Diri sendiri untuk segala usaha, ketekunan, dan semangat pantang menyerah. Terima kasih telah bertahan sejauh ini, melawan lelah, menantang ragu, dan tetap melangkah meski jalan terasa sulit. Semoga ini menjadi awal dari perjalanan yang lebih besar lagi.

Karya ini hanyalah satu titik kecil dalam samudra ilmu yang luas, namun semoga ia dapat membawa manfaat bagi siapa pun yang menemukannya. Kepada siapa pun yang membaca, semoga ilmu ini mengantarkan kita pada pemahaman yang lebih dalam dan kebijaksanaan yang lebih luas.

HALAMAN MOTTO

"Ilmu bukan sekadar pengetahuan, tetapi cahaya yang menerangi langkah kita ke masa depan."

"Jangan takut gagal, karena setiap kesalahan adalah langkah menuju keberhasilan."

"Keraguan adalah musuh terbesar, keyakinan adalah kekuatan terbesar."



KATA PENGANTAR

Puji syukur kehadiran Allah SWT yang telah melimpahkan rahmat dan hidayah-Nya, sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi ini dengan judul "Analisa Dampak Ketidakseimbangan Beban Pada Arus Netral Dan Energi Yang Hilang Dengan Metode Regresi Di Gardu Distribusi UP3 Berau". Skripsi ini disusun sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik pada Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Industri, Universitas Islam Sultan Agung (UNISSULA).

Dalam penyusunan skripsi ini, penulis mendapat banyak bantuan, arahan, serta dukungan dari berbagai pihak. Atas dasar hal itu, penulis berkeinginan untuk mengungkapkan rasa terima kasih yang teramat dalam kepada:

1. Prof. Dr. H. Gunarto, SH., MH, Rektor Universitas Islam Sultan Agung, yang telah memberikan kesempatan dan fasilitas selama masa studi.
2. Dr. Ir. Novi Marlyana, S.T., M.T., IPU., ASEAN Eng., Dekan Fakultas Teknologi Industri, yang telah memberikan arahan dan dukungan dalam penyusunan skripsi ini.
3. Jenny Putri Hapsari, ST., MT. Ketua Program Studi Teknik Elektro, yang telah memberikan bimbingan dan motivasi selama masa studi dan penyusunan skripsi.
4. Dosen Pembimbing Ir Ida Widiastuti MT, yang dengan sabar telah membimbing dan mengarahkan penulis dalam penyusunan skripsi ini.
5. Seluruh dosen dan staf Fakultas Teknologi Industri, yang telah memberikan ilmu dan bantuan selama masa perkuliahan.
6. Orang tua dan keluarga tercinta, yang selalu memberikan doa, dukungan, dan kasih sayang yang tiada henti.
7. Teman-teman seperjuangan, yang telah memberikan semangat dan kebersamaan selama masa studi.

Skripsi ini masih memiliki kekurangan layaknya kanvas yang belum terlukis sempurna. Setiap kritik dan saran dapat membangun bagaikan warna baru yang akan memperindah karya ini. Semoga karya ini bisa bermanfaat bagi pembaca dan pengembangan ilmu pengetahuan, khususnya di bidang Teknik Elektro.

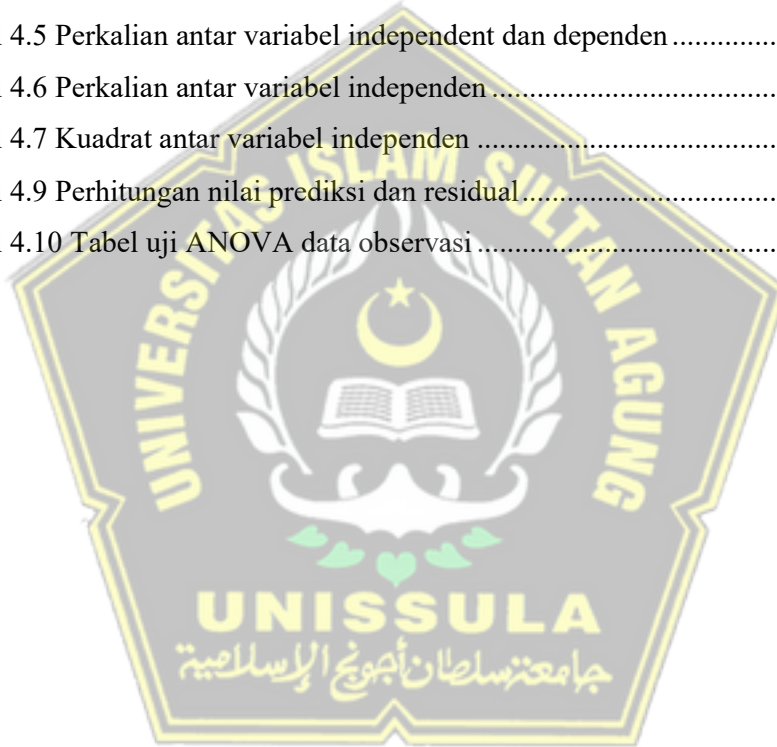
DAFTAR ISI

JUDUL	i
<i>TITLE</i>	ii
LEMBAR PENGESAHAN PEMBIMBING	iii
LEMBAR PENGESAHAN PENGUJI	iv
SURAT PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR	v
PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI KARYA ILMIAH	vi
HALAMAN PERSEMBAHAN	vii
HALAMAN MOTTO	viii
KATA PENGANTAR	ix
DAFTAR ISI.....	x
DAFTAR TABEL.....	xii
DAFTAR GAMBAR.....	xiii
ABSTRAK.....	xiv
<i>ABSTRACT</i>	xv
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	2
1.3 Pembatasan Masalah	3
1.4 Tujuan Penelitian.....	3
1.5 Manfaat Penelitian.....	3
BAB II KAJIAN PUSTAKA	5
2.1 Tinjauan Pustaka	5
2.2 Landasan Teori	9
2.2.1 Pengertian Sistem Distribusi Tenaga Listrik	9

2.2.2 Arus Beban Penuh Transformator	10
2.2.3 Ketidakseimbangan Beban	10
2.2.4 Tahanan pada Kawat Penghantar.....	11
2.2.5 Losses Akibat Adanya Arus Netral pada Penghantar Netral.....	12
2.2.6 Determinan Matriks	13
2.2.7 Regresi	14
BAB III METODE PENELITIAN.....	22
3.1 Jenis Penelitian	22
3.2 Lokasi dan Waktu Pelaksanaan.....	22
3.3 Langkah – Langkah Penelitian	23
BAB IV DATA DAN ANALISA	27
4.1 Hasil Penelitian.....	27
4.2 Persamaan Regresi Linier Berganda 3 Variabel.....	31
4.3 Tabel Uji ANOVA	36
BAB V PENUTUP.....	40
5.1 Kesimpulan.....	40
5.2 Saran.....	40
DAFTAR PUSTAKA	41
LAMPIRAN.....	43

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Penjumlahan variabel independent dan dependen	18
Tabel 2.2 Perhitungan Perkalian antar variabel	18
Tabel 2.3 Tabel uji ANOVA.....	20
Tabel 4.1 Data Hasil Pengukuran Arus.....	27
Tabel 4.2 Data Spesifikasi Kawat Penghantar	28
Tabel 4.3 Perhitungan Nilai Variabel Dependen (Y).....	29
Tabel 4.4 Nilai variabel independen dan variabel dependen	30
Tabel 4.5 Perkalian antar variabel independent dan dependen	31
Tabel 4.6 Perkalian antar variabel independen	32
Tabel 4.7 Kuadrat antar variabel independen	33
Tabel 4.9 Perhitungan nilai prediksi dan residual.....	37
Tabel 4.10 Tabel uji ANOVA data observasi.....	38



DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 Langkah pertama menghitung determinan Matrikss.....	13
Gambar 2. 2 Langkah kedua menghitung determinan Matrikss	13
Gambar 2. 3 Langkah ketiga menghitung determinan Matrikss	14
Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian	23
Gambar 3.2 <i>Single Line</i> Gardu Distribusi	24



ABSTRAK

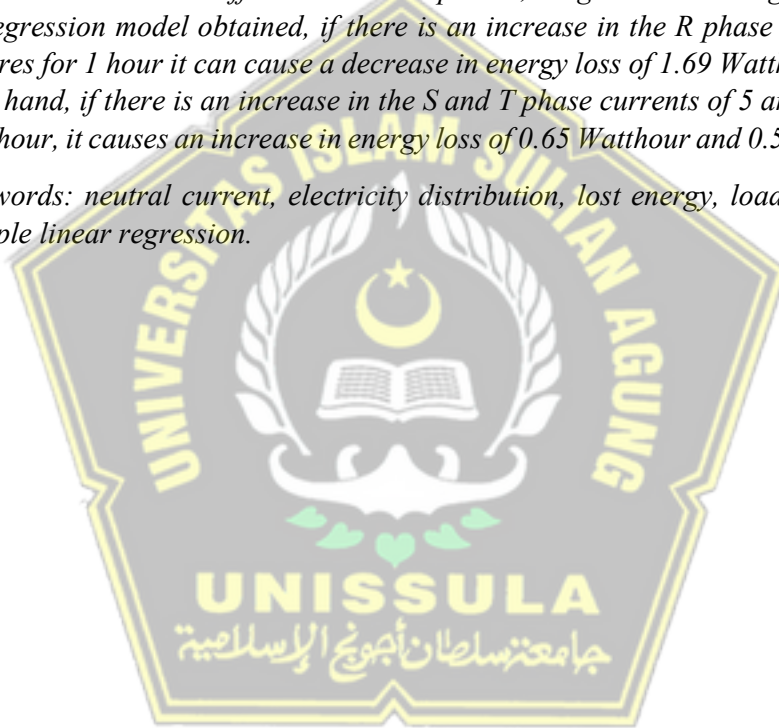
Ketidakseimbangan beban pada gardu distribusi merupakan salah satu faktor utama yang menyebabkan timbulnya arus netral dan energi yang hilang (*losses*). Dalam sistem distribusi tenaga listrik, beban yang tidak merata pada fasa R, S, dan T dapat meningkatkan arus netral, yang pada akhirnya menurunkan efisiensi distribusi dan meningkatkan rugi-rugi daya. Penelitian ini dilakukan di PLN ULP Tanjung Redeb UP3 Berau dengan fokus pada trafo distribusi segmen perhotelan, di mana pola pemakaian energi listrik dipengaruhi oleh tingkat okupansi. Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif dengan metode regresi linier berganda 3 variabel untuk menganalisis hubungan antara ketidakseimbangan beban dengan arus netral dan energi yang hilang. Hasil penelitian menunjukkan bahwa semakin besar perbedaan arus antar fasa, semakin besar pula energi yang hilang. Dari model regresi yang diperoleh, jika ada kenaikan arus fasa R sebesar 5 ampere selama 1 jam dapat menyebabkan penurunan energi hilang sebesar 1,69 *Watthour*. Sebaliknya, jika ada kenaikan arus fasa S dan T masing-masing sebesar 5 ampere selama 1 jam menyebabkan peningkatan energi hilang sebesar 0,65 *Watthour* dan 0,54 *Watthour*.

Kata kunci: arus netral, distribusi listrik, energi hilang, ketidakseimbangan beban, regresi linier berganda.

ABSTRACT

Load imbalance at distribution substations is one of the main factors that causes neutral currents and energy losses. In an electric power distribution system, uneven loads on the R, S, and T phases can increase neutral current, which ultimately reduces distribution efficiency and increases power losses. This research was conducted at PLN ULP Tanjung Redeb UP3 Berau with a focus on distribution transformers in the hotel segment, where electrical energy usage patterns are influenced by occupancy levels. This research uses a quantitative approach with a 3-variable multiple linear regression method to analyze the relationship between load imbalance and neutral current and energy loss. The research results show that the greater the current difference between phases, the greater the energy lost. From the regression model obtained, if there is an increase in the R phase current of 5 amperes for 1 hour it can cause a decrease in energy loss of 1.69 Watthour. On the other hand, if there is an increase in the S and T phase currents of 5 amperes each for 1 hour, it causes an increase in energy loss of 0.65 Watthour and 0.54 Watthour.

Key words: neutral current, electricity distribution, lost energy, load imbalance, multiple linear regression.



BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Untuk memenuhi kebutuhan manusia sehari – hari, energi listrik merupakan kebutuhan yang sangat penting, baik untuk kebutuhan komersil, industry maupun bisnis. Hal ini karena tenaga listrik mudah untuk ditransportasikan dan dikonversikan ke dalam bentuk energi lain [1]. Di era industri dan digitalisasi saat ini, kebutuhan akan energi listrik terus meningkat dari tahun ke tahun. Dan itu akan menjadi tantangan penyedia energi listrik dalam menjaga kontinuitas, kualitas dan kestabilan penyaluran pasokan energi listrik dari pembangkit sampai kepada konsumen. Seiring dengan laju pertumbuhan pembangunan di setiap sektor, maka dituntut adanya keandalan sistem maupun peralatan penyaluran tenaga listrik [2]. Hal ini berbanding lurus dengan laju peningkatan jumlah penduduk serta laju percepatan pembangunan yang cukup pesat, baik dari dalam sektor publik, bisnis maupun industri. Penyediaan listrik yang stabil dan kontinyu merupakan syarat mutlak yang harus dipenuhi dalam memenuhi kebutuhan listrik [3] [4]. Beban energi listrik disambungkan ke trafo distribusi dengan proses penyambungan yang cepat serta pemakaian yang berbeda – beda setiap jalurnya sehingga menyebabkan trafo distribusi tidak terbebani secara seimbang. Beban dikatakan seimbang apabila pada masing-masing fasa mengalir arus yang sama besarnya, namun pada kenyataannya selalu ada kemungkinan ketidakseimbangan sehingga arusnya tidak seimbang [5]. Ketidakseimbangan beban pada suatu sistem distribusi tenaga listrik selalu terjadi dan penyebab ketidakseimbangan tersebut adalah pada beban-beban satu fasa pada pelanggan jaringan tegangan rendah. Ketidakseimbangan beban juga dapat disebabkan oleh pemakaian energi listrik yang digunakan secara tidak bersamaan dan mempunyai beban yang sama sehingga mengakibatkan ketidakseimbangan antar fasa (R, S, dan T). Ketidakseimbangan beban pada tiap-tiap fasa (R, S, dan T), sehingga menyebabkan mengalirnya arus di netral trafo [6]. Arus yang mengalir di

netral trafo ini menyebabkan terjadinya *losses* (rugi - rugi), yaitu *losses* akibat adanya arus netral pada penghantar netral trafo dan *losses* akibat arus netral yang mengalir ke tanah [6][7]. Arus netral yang berlebihan pada sistem distribusi dapat mengakibatkan menurunnya kualitas daya dan menimbulkan panas berlebih pada transformator [8].

Penelitian ini dilakukan di PLN ULP Tanjung Redeb UP3 Berau, dengan fokus pada analisis trafo distribusi segmen perhotelan yang mana ditemukan ketidakseimbangan beban sebesar 36.84%. Pada segmen tersebut, pemakaian energi listrik mengikuti tingkat okupansi, sehingga potensi pemakaian listrik tidak seimbang cukup besar. Ketidakseimbangan beban dapat mengakibatkan timbulnya arus netral dan energi yang hilang. Di sisi lain, perhitungan susut energi pada gardu distribusi umumnya hanya mempertimbangkan komponen-komponen seperti Rugi Besi (W), Rugi Belitan (W) pada transformator tanpa memperhatikan ketidakseimbangan beban transformator. Sehingga ada potensi energi listrik yang hilang dan tidak terjual ke konsumen. Penelitian ini bertujuan untuk memperoleh pemahaman mengenai dampak ketidakseimbangan beban pada fasa R, S, dan T terhadap arus netral dan energi yang hilang (*losses*) menggunakan metode regresi agar dapat meningkatkan efisiensi distribusi listrik serta meminimalisasi arus netral pada gardu distribusi di waktu mendatang.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan uraian tersebut, permasalahan utama dalam penelitian ini dirumuskan sebagai berikut :

1. Bagaimana pengaruh ketidakseimbangan beban pada gardu distribusi terhadap arus netral?
2. Seberapa besar ketidakseimbangan beban gardu distribusi berkontribusi terhadap energi yang tidak tersalurkan kepada konsumen?
3. Strategi apa yang dapat diterapkan untuk mengurangi ketidakseimbangan beban dan meminimalkan arus netral pada gardu distribusi?

1.3 Pembatasan Masalah

Dalam penyusunan penelitian ini, telah ditentukan batasan-batasan masalah sebagai berikut:

1. Penelitian ini dibatasi pada gardu distribusi di wilayah PLN ULP Tanjung Redeb UP3 Berau, sehingga tidak mencakup gardu distribusi di wilayah lain.
2. Penelitian hanya berfokus pada analisis ketidakseimbangan beban gardu distribusi, pengaruhnya terhadap arus netral, dan besaran energi yang hilang akibat ketidakseimbangan tersebut.
3. Data yang digunakan untuk analisis akan dibatasi pada periode tertentu yang dianggap mewakili kondisi operasional gardu distribusi tersebut.
4. Penelitian hanya mengukur dan menganalisis arus netral dan energi yang hilang sebagai akibat langsung dari ketidakseimbangan beban, tanpa membahas aspek lain seperti kualitas daya atau usia pakai peralatan.

1.4 Tujuan Penelitian

Berdasarkan rumusan masalah tersebut, maka penelitian ini bertujuan sebagai berikut :

1. Menganalisis hubungan antara ketidakseimbangan beban dan arus netral pada gardu distribusi di PLN ULP Tanjung Redeb UP3 Berau.
2. Mengukur besarnya energi yang hilang akibat ketidakseimbangan beban.
3. Memberikan rekomendasi untuk meningkatkan efisiensi distribusi listrik dan meminimalisasi arus netral pada gardu distribusi.

1.5 Manfaat Penelitian

Adapun manfaat yang diharapkan dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Memberikan pemahaman yang lebih mendalam mengenai ketidakseimbangan beban pada gardu distribusi serta faktor-faktor penyebabnya.

2. Meminimalisasi rugi-rugi daya (*losses*) pada jaringan distribusi melalui pemantauan dan penyeimbangan beban.
3. Membantu PLN dalam mengoptimalkan distribusi tenaga listrik dengan mengurangi energi yang tidak tersalurkan akibat ketidakseimbangan beban.
4. Menyediakan dasar ilmiah untuk rekomendasi penanganan beban yang tidak seimbang, yang dapat diterapkan dalam kebijakan operasional PLN.



BAB II

KAJIAN PUSTAKA

2.1 Tinjauan Pustaka

Pada penelitian sebelumnya yang dilakukan oleh Jeremi Gurusinga [7], analisis dilakukan terhadap ketidakseimbangan beban pada sistem distribusi listrik Gardu Distribusi BBKK, PSH, dan CPTY di Garut, yang menyebabkan arus netral dan rugi-rugi daya meningkat. Penelitian ini menyarankan penggunaan kawat netral yang lebih besar sebagai salah satu solusi untuk mengurangi rugi-rugi daya. Metode penelitian ini melibatkan analisis data lapangan, perhitungan ketidakseimbangan beban, analisis arus netral, dan perhitungan rugi-rugi daya. Persentase ketidakseimbangan pada Gardu BBKK dan PSH saat beban puncak pada pukul 18:55 dan 18:46 tercatat masing-masing sebesar 5,36% dan 5,73%.

Penelitian oleh Sya'roni et al [8] dilakukan di jaringan distribusi PLN Rayon Rungkutarea Surabaya Selatan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa ketidakseimbangan beban menggunakan software ETAP 12.6.0 dan hasil pengukuran didapatkan hasil ketidakseimbangan beban yang besar selisih arus antar fasa pada BUS 1 atau transformator BE 1438, fasa R ke S sebesar 38,4 A, S ke T sebesar 24,4 A dan R ke T sebesar 14,6 A, kemudian setelah dilakukan perhitungan, presentase Ketidakseimbangan beban terbesar dengan kode BE 1192 ketidakseimbangan beban mencapai 25.6 %, dan rugi-rugi daya sebesar 1.027 KW dengan presentase rugi-rugi sebesar 9.14 %. Ketidakseimbangan beban pada transformator menyebabkan arus netral bertambah besar sehingga mengakibatkan rugi-rugi daya juga bertambah besar. Untuk itu solusi dari ketidakseimbangan beban adalah dengan memindahkan beban sehingga pembebanan antar fasa bisa merata.

Mahmud Patilima [3] dari Universitas Ichsan Gorontalo mengulas pengaruh ketidakseimbangan beban pada transformator distribusi di Gorontalo. Metode yang digunakan melibatkan pengumpulan data lapangan, pengukuran beban dan rugi-rugi daya, analisis ketidakseimbangan beban, dan

analisis temporal. Penelitian ini juga melakukan evaluasi dampak ketidakseimbangan beban terhadap rugi-rugi daya, khususnya pada periode beban puncak di malam hari. Secara umum, dapat tarik benang merah bahwa pada malam hari ketidakseimbangan beban pada trafo tiang meningkat akibat distribusi penggunaan listrik yang tidak merata.

Rumakat J et al [6] menyoroti nilai presentase ketidakseimbangan beban pada Gardu BGLLTR1033 Lateri 1 pada jam 18:15:34 waktu beban puncak sebesar 7,03% jika bersandar pada acuan/standar ketidakseimbangan yang dianjurkan PLN (SK ED PLN No.0017.E/DIR/2014) maka gardu tersebut berada pada kondisi baik yaitu $<10\%$. Arus Netral yang didapat sebesar 23,105 A, Arus netral ini akan berpengaruh pada besarnya rugi-rugi transformator maka dari nilai arus netral ini bisa diketahui nilai dari rugirugi pada transformator sebesar 396,110 Watt.

Dalam studi yang dilakukan oleh Muliadi dan koleganya [1], ketidakseimbangan beban pada penyulang Mibo di Banda Aceh dianalisis menggunakan metode komponen simetris. Hasil menunjukkan bahwa ketidakseimbangan yang lebih besar menyebabkan peningkatan arus netral dan menurunkan efisiensi trafo distribusi. Metode yang digunakan adalah metode komponen simetris, yang memungkinkan analisis ketidakseimbangan beban dengan memecah sistem tiga fasa menjadi komponen urutan positif, negatif, dan nol. Pendekatan ini membantu mengidentifikasi besarnya arus netral dan dampak ketidakseimbangan beban terhadap efisiensi transformator. Berdasarkan perhitungan, kehilangan daya akibat arus netral yang mengalir ke tanah tercatat pada trafo MB1 04-00 sebesar 1,76%, pada trafo MB1 05-00 sebesar 1,28%, dan pada trafo MB1 07-00 mencapai 2,69%.

Penelitian Muhammad Imam Nur Iman Yy dan rekan-rekannya [2] di Gardu Distribusi MG0045 di Manggar menyoroti upaya penyeimbangan beban untuk mengurangi arus netral dan meningkatkan umur transformator. Pengukuran beban pada setiap fasa menunjukkan pentingnya redistribusi beban untuk menjaga efisiensi transformator. Metode yang digunakan

melibatkan pengumpulan data lapangan, pengukuran beban dan arus netral, analisis ketidakseimbangan beban, dan redistribusi beban. Penelitian ini juga melakukan evaluasi dampak penyeimbangan beban terhadap arus netral, efisiensi transformator, dan umur transformator. Melakukan penyeimbangan beban dapat mengurangi arus netral yang menyebabkan kehilangan daya, serta membantu menjaga kinerja transformator. Dengan demikian, umur transformator dapat diperpanjang dan risiko kerusakan dapat diminimalkan.

Studi oleh Aditiya Doni Wirawan [4] di penyulang Pangsuma PT. PLN Mempawah menghitung ketidakseimbangan beban dan kerugian daya yang disebabkan oleh aliran arus netral. Hasil menunjukkan perbedaan ketidakseimbangan beban antara siang dan malam hari yang signifikan, menyebabkan tingginya rugi-rugi daya. Metode yang digunakan adalah pengumpulan data lapangan, pengukuran beban dan arus netral, analisis ketidakseimbangan beban, dan perhitungan rugi-rugi daya. Penelitian ini juga melakukan analisis temporal untuk membandingkan variasi beban dan rugi-rugi daya pada siang dan malam hari. Pendekatan ini memberikan gambaran yang jelas tentang dampak ketidakseimbangan beban terhadap rugi-rugi daya pada penyulang Pangsuma. Semakin besar arus netral yang mengalir melalui penghantar netral, semakin besar pula kehilangan daya yang terjadi serta meningkatnya biaya yang harus dikeluarkan.

Rio Afrianda dan tim [5] dari Institut Teknologi PLN menyoroti efek ketidakseimbangan beban pada efisiensi transformator distribusi di Bekasi. Penelitian ini menekankan perlunya pemeliharaan rutin untuk mengurangi rugi-rugi dan menjaga stabilitas distribusi listrik. Metode yang digunakan dengan cara pengumpulan data lapangan, pengukuran beban dan arus netral, analisis ketidakseimbangan beban, dan evaluasi efisiensi transformator. Penelitian ini juga melakukan analisis rugi-rugi daya dan memberikan rekomendasi pemeliharaan rutin untuk mengurangi dampak negatif ketidakseimbangan beban pada sistem distribusi listrik. Apabila kehilangan

daya ini terus berlanjut, hal tersebut dapat menyebabkan kerugian bagi PLN serta menurunkan efisiensi transformator.

Penelitian Ruliyanto [9] membahas dampak dari ketidakseimbangan beban pada arus netral dan rugi-rugi daya (losses) pada transformator distribusi. Dalam penelitian ini, dilakukan analisis terhadap arus netral yang muncul akibat ketidakseimbangan beban dan bagaimana hal ini berdampak pada peningkatan losses yang berujung pada penurunan efisiensi transformator. Metode yang digunakan adalah pengumpulan data lapangan, pengukuran beban dan arus netral, analisis ketidakseimbangan beban, dan perhitungan rugi-rugi daya. Akibat ketidakseimbangan beban tersebut munculah arus di netral trafo. Arus yang mengalir di netral trafo ini menyebabkan terjadinya losses(rugi-rugi), yaitu losses akibat adanya arus netral pada penghantar netral trafo dan losses akibat arus netral yang mengalir ke ground. Setelah dianalisis, terjadi ketidakseimbangan beban pada Trafo 1 sebesar 5.23%, akan berakibat muncul arus netral IN sebesar 300 ampere, dan losses akibat arus netral IG yang mengalir ke tanah sebesar 0.15%. Kapasitas daya yang terpakai saat ini sebesar 84.65%

Adi Nugroho [10] dalam studinya di PT. PLN Rayon Kartasura menganalisis ketidakseimbangan beban yang menyebabkan aliran arus netral pada transformator distribusi efisiensi distribusi daya. Metode yang digunakan yaitu pengumpulan data lapangan, pengukuran beban dan arus netral, analisis ketidakseimbangan beban, dan analisis temporal. Penelitian ini juga melakukan evaluasi efisiensi distribusi daya dan memberikan rekomendasi solusi untuk mengurangi dampak negatif ketidakseimbangan beban pada sistem distribusi listrik. Kehilangan daya yang terjadi akibat arus netral pada penghantar netral trafo tercatat sebesar 0,046 kW dengan persentase 0,028% pada siang hari, sementara pada malam hari mencapai 0,448 kW dengan persentase 0,280%.

2.2 Landasan Teori

2.2.1 Pengertian Sistem Distribusi Tenaga Listrik

Sistem distribusi merupakan salah satu bagian penting dalam sistem tenaga listrik. Sistem distribusi berfungsi untuk memindahkan energi listrik dari sumber daya besar pembangkit listrik hingga tiba ke konsumen. Dengan demikian, peran utama distribusi listrik adalah: 1) mendistribusikan energi listrik ke berbagai lokasi pelanggan, dan 2) menjadi subsistem tenaga listrik yang berinteraksi langsung dengan pelanggan, karena energi yang tersedia di pusat-pusat beban (pelanggan) disalurkan langsung kepada pengguna, termasuk untuk kebutuhan industri. Tenaga listrik yang dihasilkan oleh pembangkit tenaga listrik besar dengan tegangan dari 11 kV sampai 24 kV dinaikkan tegangannya oleh gardu induk dengan transformator penaik tegangan menjadi 70 kV, 154 kV, 220 kV atau 500 kV kemudian disalurkan melalui saluran transmisi [11].

Meningkatkan tegangan memiliki tujuan untuk mengurangi kehilangan daya listrik pada saluran transmisi. Hal ini disebabkan oleh kerugian daya yang sebanding dengan kuadrat arus yang mengalir ($I^2.R$). Dengan arus yang sama, apabila tegangan dinaikkan, maka kerugian energi menjadi lebih kecil, sehingga efisiensi saluran distribusi dapat tercapai. Dari saluran transmisi, energi listrik dialirkan ke gardu induk untuk kemudian diturunkan tegangannya menggunakan transformator penurun tegangan menjadi tegangan menengah, yang biasanya sebesar 20 kV, 12 kV, atau 11 kV. Setelah itu, energi listrik disalurkan ke pusat-pusat beban atau pelanggan melalui saluran distribusi. Sistem distribusi tenaga listrik dibedakan menjadi tiga bagian, yaitu distribusi primer, distribusi sekunder, dan distribusi tersier [11].

Dalam sistem distribusi tenaga listrik jarak jauh, tegangan tinggi selalu digunakan untuk meminimalkan kerugian pada transformator step-up. Tegangan yang digunakan dalam transmisi tenaga listrik umumnya berupa tegangan tinggi (HV, UHV, EHV), meskipun penggunaan tegangan ini memiliki konsekuensi yang lebih besar terhadap isolasi dan komponen

pendukung lainnya. Beban atau pelanggan dihubungkan ke sistem distribusi tegangan rendah melalui transformator step-down. Akibatnya, di setiap daerah terdapat saluran yang memiliki nilai tegangan berbeda-beda.[11]

2.2.2 Arus Beban Penuh Transformator

Kapasitas transformator jika dianalisa dari sisi tegangan tinggi (masukan) dapat dibuat rumus seperti halnya berikut:

$$S = 3.V.I \text{ (VA)} \dots\dots\dots (2.1)$$

dimana:

S = Kapasitas transformator (kVA)

V = Tegangan di bagian masukan transformator (kV)

I = Arus pada jaringan listrik (A)

Oleh karena itu, dalam proses menghitung arus beban maksimal (*full load*), dapat dipergunakan persamaan :

$$I_{fl} = \frac{S}{\sqrt{3} . V} \dots\dots\dots (2.2)$$

dimana :

I_{fl} = Arus maksimal yang dapat ditanggung (A)

S = Kapasitas transformator (kVA)

V = Tegangan pada keluaran transformator (kV)

2.2.3 Ketidakseimbangan Beban

Perbedaan Untuk menentukan besarnya ketidak seimbangan beban pada tiap Phasa [7], dapat digunakan perumusan dengan persamaan (2.3) sampai dengan (2.6) sebagai berikut :

$$I_{rata-rata} = \frac{I_R + I_S + I_T}{3} \dots\dots\dots (2.4)$$

$$I_R = a . I_{rata-rata} , \text{ maka } a = a = \frac{I_R}{I_{rata-rata}} \dots\dots\dots (2.4)$$

$$I_R = a . I_{rata-rat} , \text{ maka } a = a = \frac{I_R}{I_{rata-rata}} \dots\dots\dots (2.5)$$

$$I_R = a . I_{rata-rata} , \text{ maka } a = a = \frac{I_R}{I_{rata-rata}} \dots\dots\dots (2.6)$$

Pada keadaan seimbang besarnya koefisien a, b, dan c adalah 1. Dengan demikian, untuk menentukan presentase ketidakseimbangan beban rata-rata dapat digunakan perumusan persamaan (2.7) sebagai berikut:

$$\%_{\text{ketidakseimbangan}} = \frac{|a-1| + |b-1| + |c-1|}{3} \times 100\% \dots\dots\dots (2.7)$$

Arus netral yang berlebihan pada sistem distribusi dapat mengakibatkan menurunnya kualitas daya dan menimbulkan panas berlebih pada trafo.[10]

2.2.4 Tahanan pada Kawat Penghantar

Tahanan (resistansi) pada kawat penghantar merupakan satu diantara parameter penting dalam sistem distribusi tenaga listrik. Tahanan didefinisikan sebagai hambatan intrinsik dari material penghantar terhadap aliran arus listrik. Besarnya tahanan pada kawat penghantar dipengaruhi oleh beberapa faktor, seperti panjang kawat, luas penampang kawat, jenis material penghantar, dan suhu.

2.2.4.1 Faktor-Faktor yang Mempengaruhi Tahanan

a. Panjang Kawat

Tahanan kawat memiliki hubungan searah dengan panjang kawat. Semakin panjang kawat, semakin besar tahanan yang dihasilkan. Hubungan ini dinyatakan dengan persamaan:

$$R = \rho \frac{L}{A} \dots\dots\dots (2.8)$$

di mana:

R = tahanan (Ω)

ρ = resistivitas material ($\Omega \cdot m$)

L = panjang kawat (m)

A = luas penampang kawat (m^2)

b. Luas Penampang (A)

Tahanan memiliki hubungan terbalik dengan luas penampang kawat. Semakin meningkat luas penampang, semakin kecil

tahanannya. Oleh karena itu, kabel dengan diameter lebih besar lebih efektif untuk mengurangi rugi-rugi daya.

c. Material Penghantar

Material penghantar seperti tembaga dan aluminium memiliki resistivitas rendah, sehingga sering digunakan dalam instalasi listrik. Resistivitas tembaga lebih rendah dibandingkan aluminium, membuatnya lebih efisien sebagai penghantar listrik.

d. Suhu

Resistivitas material penghantar cenderung meningkat seiring dengan naiknya suhu. Material seperti tembaga memiliki koefisien suhu positif, sehingga tahanannya akan meningkat ketika suhu kawat meningkat.

2.2.5 Losses Akibat Adanya Arus Netral pada Penghantar Netral

Karena adanya perbedaan distribusi beban antar fase pada sisi keluaran transformator (phasa T, phasa S, phasa R) maka timbullah arus di sisi netral trafo. Arus yang melewati pada kabel penghantar netral trafo ini mengakibatkan kehilangan daya (rugi-rugi). Kehilangan daya pada penghantar netral trafo ini dapat dihitung menggunakan rumus berikut:

$$P_N = I_N^2 \cdot R_N \text{ (Watt)} \dots\dots\dots (2.9)$$

dimana:

P_N = Kehilangan daya pada penghantar netral trafo (watt)

I_N = Arus yang lewat pada netral trafo (A)

R_N = Hambatan penghantar netral trafo (Ω)

Sedangkan kehilangan daya yang diakibatkan karena mengalirnya arus netral ke tanah (*ground*) dapat dirumuskan sebagaimana berikut :

$$P_G = I_G^2 \cdot R_G \text{ (Watt)} \dots\dots\dots (2.10)$$

P_G = Kehilangan daya akibat mengalirnya arus netral ke tanah (watt)

I_G = Arus yang lewat ke tanah (A)

R_G = Tahanan pembumian netral trafo (Ω)

2.2.6 Matriks

Matriks adalah kumpulan bilangan, simbol, atau ekspresi, berbentuk persegi atau persegi panjang yang disusun menurut baris dan kolom. Penulisan symbol (Notasi) matriks menggunakan huruf kapital. Susunan bilangan yang mendatar dalam matriks disebut baris, sedangkan susunan bilangan yang tegak pada matriks disebut kolom [12]. Secara umum matriks digambarkan seperti gambar 2.1 di bawah ini :

$$A_{m \times n} = \begin{bmatrix} a_{11} & \dots & a_{1n} \\ \dots & \dots & \dots \\ a_{m1} & \dots & a_{mn} \end{bmatrix}$$

Gambar 2. 1 Matriks

Perhatikan bahwa elemen pada matriks A berindeks rangkap, contohnya a_{11} , itu menunjukkan matriks A pada baris ke-1 dan kolom ke-1. Begitu juga dengan elemen matriks A yang berindeks a_{mn} , itu berarti matriks A pada baris ke- m dan kolom ke- n . Ordo matriks merupakan banyaknya baris dan kolom yang menentukan ukuran matriks. [12].

2.2.7 Determinan Matriks

Dalam mencari koefisien regresi dengan metode pendekatan Matriks maka diperlukan pemahaman dalam mencari determinan sebuah Matriks. Untuk mencari determinan matriks ordo 4 x 4 dapat menggunakan metode Sarrus. Metode Sarrus adalah sebuah cara (metode) yang digunakan untuk menentukan determinan sebuah matriks dengan cara mengalikan, menjumlahkan dan mengurangi elemen-elemen matriks tertentu [13]. yang pertama dilakukan adalah kita memerlukan langkah-langkah seperti berikut yaitu pertama hitung dengan urutan (+ - + - + - +) dengan jarak 1-1-1 yang bisa ditampilkan seperti gambar 2.2 dibawah ini :

$$A1 = \begin{bmatrix} a & b & c & d & a & b & c & d \\ e & f & g & h & e & f & g & h \\ i & j & k & l & i & j & k & l \\ m & n & o & p & m & n & o & p \end{bmatrix}$$

Gambar 2. 2 Langkah pertama menghitung determinan Matriks

Diperoleh perhitungan seperti berikut ini:

$$A1 = afkp - bglm + chin - deho - ahkn + belo - cfip + dgjm \dots\dots\dots (2.11)$$

Langkah selanjutnya adalah menghitung dengan urutan $(- + - + - + -)$ dengan jarak 1-2-3 yang bisa ditampilkan pada gambar 2.2 dibawah ini :

$$A1 = \begin{bmatrix} a & b & c & d \\ e & f & g & h \\ i & j & k & l \\ m & n & o & p \end{bmatrix}$$

Gambar 2. 3 Langkah kedua menghitung determinan Matriks

Diperoleh perhitungan seperti berikut ini:

$$A2 = -aflo + bgip - chjm + dekn + ahjo - bekp + cflm - dgjn \dots\dots\dots (2.12)$$

Langkah selanjutnya adalah menghitung dengan urutan $(+ - + - + -)$ dengan jarak 2-1-2 yang bisa ditampilkan pada gambar 2.3 dibawah ini :

$$A2 = \begin{bmatrix} a & b & c & d \\ e & f & g & h \\ i & j & k & l \\ m & n & o & p \end{bmatrix}$$

Gambar 2. 4 Langkah ketiga menghitung determinan Matriks

Diperoleh perhitungan seperti di bawah ini:

$$A3 = agln - bhio + cejp - dfkm - agjp + bhkm - celn + dfio \dots\dots\dots (2.13)$$

Setelah menemukan nilai dari A1, A2 dan A3, sekarang kita bisa langsung menghitung nilai determinannya dengan rumus berikut ini:

$$\text{Determinan (A)} = A1 + A2 + A3 \dots\dots\dots (2.14)$$

2.2.8 Regresi

Regresi dalam penelitian kuantitatif adalah teknik statistik yang digunakan untuk menganalisa hubungan antara variabel terikat dan bebas. Teknik ini membantu peneliti untuk memahami sejauh mana variabel independent mempengaruhi variabel dependen [14]. Tujuan dari regresi adalah untuk memahami, memprediksi, dan menjelaskan variabilitas pada

variabel dependen berdasarkan informasi dari variabel independen. Berdasarkan bentuk hubungan antara variabel, regresi dapat dibedakan menjadi regresi linier dan regresi non-linier.

1) Regresi Linier Sederhana

Regresi linier sederhana adalah jenis analisis regresi yang paling mendasar, yang menjelaskan hubungan linear antara satu variabel independen (X) dan satu variabel dependen (Y). Dalam analisis ini, hubungan antara kedua variabel diasumsikan berbentuk garis lurus. Artinya, setiap perubahan pada variabel independen akan menyebabkan perubahan proporsional pada variabel dependen. Hubungan ini dinyatakan dalam persamaan matematis sebagai berikut :

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \varepsilon \dots \dots \dots (2.15)$$

dimana :

Y adalah Variabel dependen
 X_1 adalah Variabel independen
 β_0 adalah Konstanta (intersep)
 β_1 adalah Koefisien regresi
 ε adalah Error atau residu

Regresi linier digunakan ketika hubungan antara variabel bersifat proporsional, yaitu perubahan pada variabel independen menghasilkan perubahan searah yang tetap pada variabel dependen. Model ini memiliki asumsi utama, seperti normalitas residual, homoskedastisitas (varian residual konstan), tidak adanya multikolinearitas, dan independensi data. Jika asumsi-asumsi ini tidak terpenuhi, hasil estimasi model dapat menjadi tidak valid.

2) Regresi Linier Berganda

Regresi linier berganda merupakan teknik analisis regresi yang menggunakan lebih dari satu variabel bebas untuk mempelajari hubungannya dengan variabel terikat. Pendekatan ini memungkinkan

peneliti untuk mengevaluasi dampak beberapa variabel bebas terhadap variabel terikat secara bersamaan. Dalam metode ini, hubungan antara variabel bebas dan variabel terikat diungkapkan melalui persamaan matematis yang relatif rumit, yaitu sebagai berikut :

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_n X_n + \varepsilon \dots\dots\dots (2.16)$$

dimana :

Y	adalah Variabel dependen
X_1, X_2, X_3	adalah Variabel independen
β_0	adalah Konstanta (intersep)
$\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_n$	adalah Koefisien regresi
ε	adalah Error atau residu

Dalam penerapan regresi linier berganda, penting untuk memastikan bahwa asumsi-asumsi tertentu terpenuhi. Beberapa asumsi tersebut meliputi independensi antar variabel bebas, tidak adanya multikolinearitas, serta distribusi normal dari error. Selain itu, peneliti dapat memanfaatkan teknik seperti analisis varians untuk menilai signifikansi model secara keseluruhan dan melakukan pengujian hipotesis guna mengevaluasi kontribusi masing-masing variabel bebas. Kelebihan utama dari regresi linier berganda adalah kemampuannya untuk memberikan gambaran yang lebih mendalam mengenai hubungan antar variabel dalam penelitian kuantitatif, karena metode ini memungkinkan analisis pengaruh beberapa variabel bebas secara bersamaan.

3) Regresi Non-Linier

Regresi nonlinier adalah teknik statistik yang digunakan untuk memodelkan hubungan antara variabel terikat dan satu atau lebih variabel bebas ketika hubungan tersebut tidak mengikuti pola linier. Berbeda dengan regresi linier yang memiliki bentuk persamaan garis lurus, regresi nonlinier dapat mencakup berbagai bentuk kurva, seperti

eksponensial, logaritmik, polinomial, atau bentuk lainnya yang lebih kompleks.

Dalam regresi nonlinier, model matematis yang digunakan biasanya melibatkan parameter-parameter yang tidak linier, sehingga proses estimasi parameter memerlukan pendekatan iteratif, seperti metode kuadrat terkecil nonlinier (*nonlinear least squares*). Metode ini bertujuan untuk meminimalkan selisih antara nilai observasi dan nilai prediksi dari model.

Beberapa asumsi yang perlu diperhatikan dalam regresi nonlinier meliputi independensi error, distribusi normal dari error, dan homoskedastisitas (varian error yang konstan). Namun, karena sifatnya yang fleksibel, regresi nonlinier sering digunakan dalam berbagai bidang, seperti ilmu biologi, fisika, ekonomi, dan teknik, untuk memodelkan fenomena yang tidak dapat dijelaskan secara memadai oleh model linier.

Keunggulan regresi nonlinier terletak pada kemampuannya untuk menyesuaikan diri dengan data yang memiliki pola hubungan yang lebih rumit, sehingga memberikan hasil yang lebih akurat dan relevan dalam konteks penelitian yang kompleks

2.2.8.1 Regresi Linier Berganda 3 Variabel

Dalam menganalisa hubungan antara ketidakseimbangan beban terhadap arus netral dan energi yang hilang terdapat tiga variabel independent yaitu arus R, arus S dan arus T. Sedangkan untuk variabel dependen adalah energi yang hilang pada penghantar netral trafo serta arus netral pada penghantar netral. Sehingga dapat menggunakan regresi linier berganda 3 variabel untuk menganalisa data. Regresi linier berganda 3 variabel mempunyai persamaan seperti (2.12) seperti berikut :

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_3 + \varepsilon$$

Dalam persamaan tersebut kita perlu mencari koefisien regresi $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \beta_3$. Koefisien regresi dapat dicari langkah pendekatan Matriks. Langkah awal dengan menghitung jumlah dari variabel independent ($\Sigma X_1, \Sigma X_2, \Sigma X_3$) serta dependen (ΣY) dengan tabel bantu seperti berikut :

Tabel 2.1 Penjumlahan variabel independent dan dependen

Y	X ₁	X ₂	X ₃
ΣY	ΣX_1	ΣX_2	ΣX_3

Selanjutnya mencari variabel yang dihasilkan dari perkalian antar variabel ($X_1Y, X_2Y, X_3Y, X_1X_2, X_1X_3, X_2X_3$) dan kuadrat variabel independent (X_1^2, X_2^2, X_3^2) yang selanjutnya akan diperoleh masing-masing jumlah dari variabel tersebut, perhitungan tersebut dapat menggunakan tabel bantu sebagai berikut:

Tabel 2.2 Perhitungan Perkalian antar variabel

X_1Y	X_2Y	X_3Y	X_1X_2	X_1X_3	X_2X_3	X_1^2	X_2^2	X_3^2
ΣX_1Y	ΣX_2Y	ΣX_3Y	ΣX_1X_2	ΣX_1X_3	ΣX_2X_3	ΣX_1^2	ΣX_2^2	ΣX_3^2

Setelah mendapatkan variabel pendukung, maka langkah selanjutnya adalah membuat beberapa Matriks dari variabel yang telah ada, untuk selanjutnya digunakan dalam menghitung determinan masing-masing Matriks. Matriks yang diperlukan dijabarkan dengan detail sebagai berikut :

$$\begin{aligned}
 A &= \begin{bmatrix} n & \Sigma X_1 & \Sigma X_2 & \Sigma X_3 \\ \Sigma X_1 & \Sigma X_1^2 & \Sigma X_1X_2 & \Sigma X_1X_3 \\ \Sigma X_2 & \Sigma X_1X_2 & \Sigma X_2^2 & \Sigma X_2X_3 \\ \Sigma X_3 & \Sigma X_1X_3 & \Sigma X_2X_3 & \Sigma X_3^2 \end{bmatrix} & H &= \begin{bmatrix} \Sigma Y \\ \Sigma X_1Y \\ \Sigma X_2Y \\ \Sigma X_3Y \end{bmatrix} \\
 A1 &= \begin{bmatrix} \Sigma Y & \Sigma X_1 & \Sigma X_2 & \Sigma X_3 \\ \Sigma X_1Y & \Sigma X_1^2 & \Sigma X_1X_2 & \Sigma X_1X_3 \\ \Sigma X_2Y & \Sigma X_1X_2 & \Sigma X_2^2 & \Sigma X_2X_3 \\ \Sigma X_3Y & \Sigma X_1X_3 & \Sigma X_2X_3 & \Sigma X_3^2 \end{bmatrix} & A3 &= \begin{bmatrix} n & \Sigma X_1 & \Sigma Y & \Sigma X_3 \\ \Sigma X_1 & \Sigma X_1^2 & \Sigma X_1Y & \Sigma X_1X_3 \\ \Sigma X_2 & \Sigma X_1X_2 & \Sigma X_2Y & \Sigma X_2X_3 \\ \Sigma X_3 & \Sigma X_1X_3 & \Sigma X_1Y & \Sigma X_3^2 \end{bmatrix} \\
 A2 &= \begin{bmatrix} n & \Sigma Y & \Sigma X_2 & \Sigma X_3 \\ \Sigma X_1 & \Sigma X_1Y & \Sigma X_1X_2 & \Sigma X_1X_3 \\ \Sigma X_2 & \Sigma X_2Y & \Sigma X_2^2 & \Sigma X_2X_3 \\ \Sigma X_3 & \Sigma X_3Y & \Sigma X_2X_3 & \Sigma X_3^2 \end{bmatrix} & A4 &= \begin{bmatrix} n & \Sigma X_1 & \Sigma X_2 & \Sigma Y \\ \Sigma X_1 & \Sigma X_1^2 & \Sigma X_1X_2 & \Sigma X_1Y \\ \Sigma X_2 & \Sigma X_1X_2 & \Sigma X_2^2 & \Sigma X_2Y \\ \Sigma X_3 & \Sigma X_1X_3 & \Sigma X_2X_3 & \Sigma X_3Y \end{bmatrix}
 \end{aligned}$$

Dari Matriks-Matriks diatas, nilai n adalah jumlah data observasi sedangkan Matriks H akan digunakan untuk mensubstitusi Matriks $A1$ dikolom pertama, Matriks $A2$ dikolom kedua, Matriks $A3$ dikolom ketiga dan Matriks $A4$ dikolom keempat. Selanjutnya kita mencari nilai dari masing-masing koefisien regresi $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \beta_3$. Koefisien regresi β_0 dapat dicari dengan cara hasil determinan Matriks $A1$ dibagi dengan hasil determinan Matriks A , untuk mencari nilai koefisien regresi β_1 maka hasil determinan Matriks $A2$ dibagi dengan hasil determinan Matriks A , untuk mencari nilai koefisien regresi β_2 maka hasil determinan Matriks $A3$ dibagi dengan hasil determinan Matriks A , sedangkan untuk mencari nilai koefisien regresi β_3 maka hasil determinan Matriks $A4$ dibagi dengan hasil determinan Matriks A . Setelah diketahui koefisien regresi, maka dapat dibuat persamaan regresi linier berganda 3 variabel.

2.2.8.2 Tabel ANOVA

ANOVA, atau Analysis of Variance, merupakan salah satu metode uji signifikansi yang sering digunakan dalam analisis data berbasis kelompok. Tujuan utama penerapan uji ANOVA adalah untuk menilai variasi yang terjadi di dalam kelompok tertentu serta membandingkan variasi tersebut dengan variasi antar kelompok yang berbeda.

Sebagai metode pengujian serentak yang juga dikenal sebagai uji F, ANOVA digunakan untuk mengevaluasi perbedaan rata-rata antar beberapa kelompok yang mengalami perlakuan berbeda. Dengan kata lain, analisis ini membantu dalam mengidentifikasi sejauh mana variabel bebas secara kolektif memengaruhi variabel terikat dalam suatu penelitian. Tabel uji ANOVA dapat digambarkan sebagai berikut:

Tabel 2.3 Tabel uji ANOVA

Model	<i>Sum of Square</i>	<i>df</i>	<i>Mean Square</i>	<i>F</i>
<i>Regression/Model</i>	$\Sigma(\hat{Y} - \bar{Y})$	$K - 1$	$\frac{SSR}{df\ SSR}$	$\frac{MSR}{MSE}$
<i>Residual/Error</i>	$\Sigma(Y_i - \hat{Y})$	$n - K$	$\frac{SSE}{df\ SSE}$	
Total	SSR + SSE			

Keterangan :

- Regression Sum of Squares* (SSR) adalah jumlah kuadrat dari selisih antara nilai prediksi ($\hat{Y}$) dan rata-rata nilai aktual ($\bar{Y}$).
- Residual Sum of Squares* (SSE) adalah jumlah kuadrat dari selisih antara nilai aktual (Y_i) dan nilai prediksi ($\hat{Y}$).
- df (*Degrees of Freedom* / Derajat Kebebasan) *Regression* ($K - 1$), di mana K adalah jumlah parameter dalam model (termasuk intersep).
- df (*Degrees of Freedom* / Derajat Kebebasan) *Error* ($n - K$), dimana n adalah jumlah total data observasi.
- Mean Square Regression* (MSR) adalah rata-rata variasi yang dijelaskan oleh model.
- Mean Square Error* (MSE) adalah rata-rata variasi dalam error atau residual
- F Digunakan untuk menguji signifikansi model regresi, Jika nilai F cukup besar dan signifikan, ini menunjukkan bahwa model memiliki pengaruh yang signifikan dalam menjelaskan variasi data. Uji F ini menguji apakah setidaknya satu variabel independen secara bersama-sama berpengaruh terhadap variabel dependen [14].
- R Square (Koefisien Determinasi) mengukur seberapa besar variasi dalam variabel dependen yang dapat dijelaskan oleh

model regresi. Nilai R-squared memiliki nilai antara 0 dan 1, dan semakin mendekati 1 menunjukkan bahwa variabel independen dapat menjelaskan variasi variabel dependen dengan lebih baik [14].

Tabel 2.3 diatas merupakan bagian dari analisis regresi yang digunakan dalam uji ANOVA untuk mengevaluasi apakah model memiliki signifikansi yang cukup untuk menjelaskan hubungan antara variabel independen dan dependen.



BAB III

METODE PENELITIAN

3.1 Jenis Penelitian

Pada penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif dengan metode regresi linier berganda yang melibatkan 3 (tiga) variabel independen. Metode ini dipilih untuk menganalisis pengaruh variabel-variabel independen terhadap variabel dependen secara lebih mendalam dan terukur. Dalam konteks penelitian ini, energi yang hilang sebagai variabel dependen dipengaruhi oleh tiga variabel independen, yaitu arus R, arus S, dan arus T.

Dengan menggunakan metode ini, penelitian dapat menguji apakah terdapat hubungan signifikan antara arus R, arus S, dan arus T terhadap arus netral dan energi yang hilang serta menentukan seberapa besar pengaruh masing-masing variabel terhadap variabel dependen.

Selain itu, metode regresi linier berganda memungkinkan analisis kuantitatif yang lebih sistematis karena mampu mengukur hubungan antarvariabel secara matematis dan menghasilkan persamaan regresi yang dapat digunakan untuk prediksi atau estimasi nilai variabel dependen berdasarkan variabel-variabel independennya. Oleh karena itu, pendekatan ini dianggap paling sesuai dalam penelitian ini untuk memahami pola hubungan serta signifikansi pengaruh dari arus R, arus S, dan arus T terhadap arus netral dan energi yang hilang.

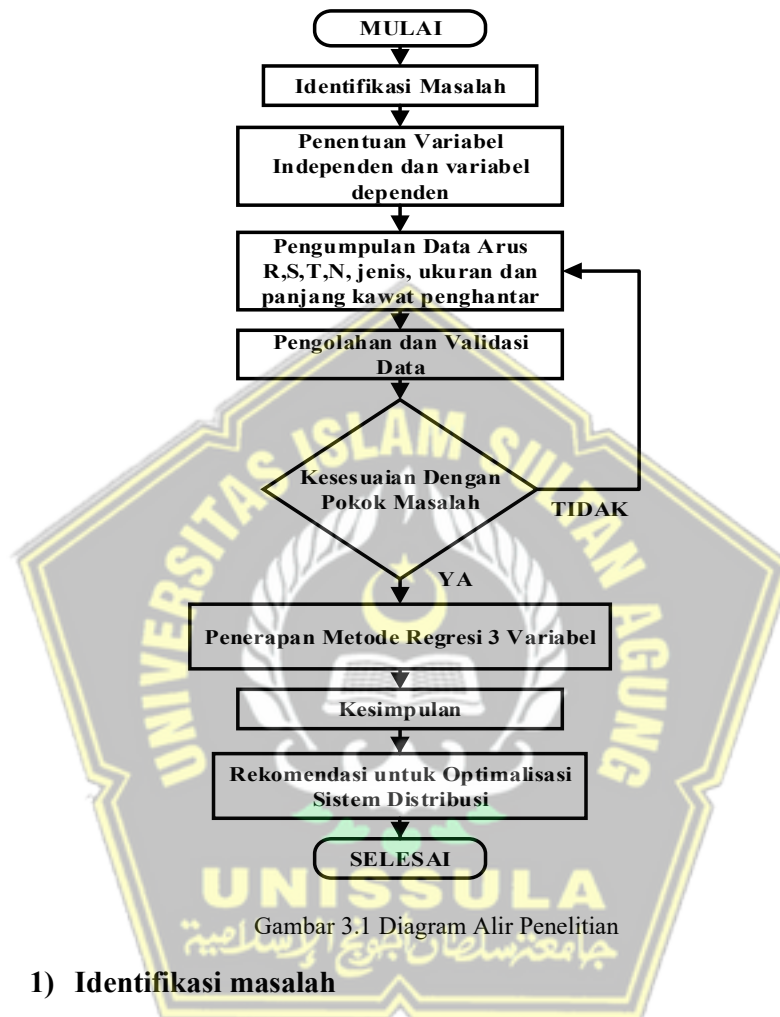
3.2 Lokasi dan Waktu Pelaksanaan

Penelitian ini dilakukan di wilayah kerja PT PLN (Persero) ULP Tanjung Redeb UP3 Berau, Kalimantan Timur.

Waktu penelitian dilaksanakan selama kurang lebih tiga bulan di mulai dari tahap awal pada Desember 2024 sampai dengan tahap akhir pada bulan Februari 2025.

3.3 Langkah – Langkah Penelitian

Berikut diagram alir penelitian disertai dengan penjelasannya :

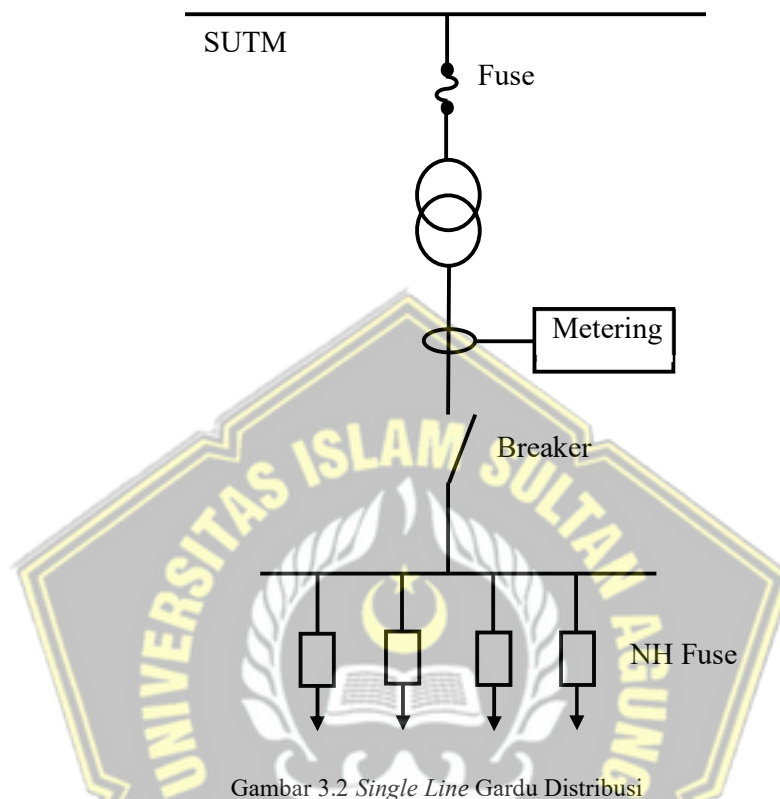


Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian

1) Identifikasi masalah

Identifikasi masalah adalah tahap awal dalam penelitian yang bertujuan untuk memahami dan merumuskan isu-isu utama yang akan diteliti. Pada penelitian ini, fokus utamanya adalah pada pengaruh ketidakseimbangan beban pada gardu distribusi terhadap arus netral dan energi yang hilang pada segmen perhotelan, dikarenakan pemakaian energi listrik mengikuti tingkat okupansi, sehingga potensi pemakaian listrik tidak seimbang cukup besar. Ketidakseimbangan beban dapat mengakibatkan timbulnya arus netral dan energi yang hilang yang tidak terjual ke konsumen.

Single Line gardu distribusi pelanggan segmen perhotelan dapat digambarkan sebagai berikut:



Gambar 3.2 *Single Line* Gardu Distribusi

2) Penentuan Variabel Penelitian

Setelah dilaksanakan indentifikasi masalah kemudian dilakukan penentuan variabel-variabel penelitian. Pada gardu distribusi terdapat 3 keluaran fasa dan 1 keluaran netral disisi sekunder sehingga didapatkan variable-variabel pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

a) Variabel Dependen (Y)

Variabel dependen dalam penelitian ini adalah energi yang hilang pada pada penghantar netral trafo serta arus netral pada penghantar netral (dalam satuan Watt).

b) Variabel Independen (X)

Variabel independen dalam penelitian ini adalah:

- a. Arus pada Fasa R (X_1): Nilai arus listrik yang mengalir pada fasa R (dalam satuan Ampere)

- b. Arus pada Fasa S (X_2): Nilai arus listrik yang mengalir pada fasa S (dalam satuan Ampere)
- c. Arus pada Fasa T (X_3): Nilai arus listrik yang mengalir pada fasa T (dalam satuan Ampere)

3) Pengumpulan Data

Pengumpulan data dalam penelitian ini, untuk tujuan memperoleh informasi yang relevan, akurat, dan lengkap mengenai pengaruh ketidakseimbangan beban pada gardu distribusi terhadap arus netral dan energi yang hilang. Data diambil dari *Load Profile* pada *kilowatt-hour meter* (kWh meter) pada gardu distribusi, termasuk arus tiap fasa, dan arus netral. Yang mana data tersebut terekam setiap 15 menit pada kWh meter dan dapat didownload dalam format *Microsoft Excel* sehingga dapat memudahkan dalam pengolahan serta pembacaan data.

Pengumpulan data juga dilakukan untuk mengetahui jenis penampang, ukuran dan panjang kawat penghantar untuk didapatkan besaran nilai hambatan pada kawat penghantar.

4) Pengolahan Data dan Validasi

Pengolahan data bertujuan untuk menganalisis hasil pengukuran dan observasi guna menjawab tujuan penelitian, yaitu memahami pengaruh ketidakseimbangan beban pada gardu distribusi terhadap arus netral dan energi yang hilang. Memeriksa kelengkapan dan konsistensi data yang dikumpulkan dari pengukuran dan mengidentifikasi serta menghilangkan outlier atau data yang tidak wajar akibat kesalahan pengukuran.

5) Penerapan Metode Regresi

Dari data yang dikumpulkan selanjutnya akan di analisa menggunakan metode regresi untuk menganalisis hubungan antara satu variabel dependen (Y) yaitu energi yang hilang pada penghantar netral trafo. Dari hasil langkah penentuan variabel, didapatkan bahwa keluaran fasa berjumlah 3 yaitu R, S dan T yang mana setiap fasa tersebut mengalirkan arus sesuai beban tiap fasa sehingga dalam metode

regresi ini akan menggunakan 3 variabel independen (X_1 , X_2 , dan X_3) yaitu arus yang mengalir pada setiap fasa transformator disisi sekunder.

6) Kesimpulan

Menarik kesimpulan dari hasil penelitian yang dilandasi dari data – data yang sudah dikumpulkan dan dianalisa menggunakan metode regresi linier berganda.

7) Rekomendasi

Memberikan rekomendasi berdasarkan hasil penelitian untuk mengurangi energi yang hilang pada gardu distribusi berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan.



BAB IV DATA DAN ANALISA

4.1 Hasil Penelitian

Pada penelitian ini, data arus R,S,T dan N diambil dari *Load Profile* pada *kilowatt-hour meter* (kWh meter) pada gardu. Data terekam setiap 15 menit pada kWh meter dan dapat diunduh dalam format *Microsoft Excel*. kWh Meter mengukur menggunakan *Current Transformer* (CT) dengan rasio 300/5A sehingga data perlu dikalikan dengan faktor kali meter (FKM) 60. Adapun data arus tanpa sudut dari hasil unduh kWh Meter dengan perhitungan ketidakseimbangan menggunakan persamaan (2.7) dapat ditampilkan pada tabel 4.1 sebagai berikut :

Tabel 4.1 Data Hasil Pengukuran Arus

No	Tanggal Waktu	Arus R	Arus S	Arus T	Arus N	Persentase Ketidakseimbangan
1	2024-12-03 23.15.00	48	62,4	96,6	43,2	26.67%
2	2024-12-22 05.15.00	43,2	69	93	43,2	24.56%
3	2024-12-31 18.45.00	49,8	91,2	96	43,8	24.64%
4	2024-12-31 19.00.00	54,6	94,8	109,2	49,2	24.44%
5	2024-12-31 19.15.00	54	97,2	97,2	43,2	23.19%
6	2025-01-01 03.45.00	53,4	87,6	102	43,2	22.72%
7	2025-01-01 11.00.00	46,8	77,4	103,8	49,2	25.61%
8	2025-01-01 11.15.00	50,4	77,4	101,4	44,4	22.69%
9	2025-01-06 17.45.00	31,2	80,4	91,2	55,2	35.90%
10	2025-01-06 18.00.00	40,2	92,4	90	51,0	30.55%
11	2025-01-06 18.15.00	30,6	81	93,6	57,6	36.84%
12	2025-01-06 19.00.00	37,8	75,6	91,2	47,4	29.72%

No	Tanggal Waktu	Arus R	Arus S	Arus T	Arus N	Persentase Ketidakseimbangan
13	2025-01-07 17.00.00	38,4	91,2	58,2	46,2	30.46%
14	2025-01-07 20.00.00	43,8	88,2	103,2	53,4	29.42%
15	2025-01-09 19.45.00	52,2	82,2	101,4	43,2	22.39%
16	2025-01-11 18.45.00	43,2	85,8	89,4	44,4	27.11%
17	2025-01-12 00.15.00	46,8	73,2	96,6	43,2	23.45%
18	2025-01-12 17.15.00	40,2	87,6	79,2	43,8	27.83%
19	2025-01-12 18.00.00	42,6	93	68,4	43,8	24.90%
20	2025-01-13 18.15.00	32,4	81	73,8	45,6	32.05%
21	2025-01-16 19.45.00	52,2	94,2	49,2	43,8	29.65%

Sedangkan untuk mendapatkan nilai hambatan kabel, data diambil dari *datasheet* spesifikasi kabel. Kawat penghantar yang digunakan adalah tipe NYY. Adapun spesifikasi kabel tersebut dapat ditampilkan pada tabel berikut:

Tabel 4.2 Data Spesifikasi Kawat Penghantar

Nom. Cross Sect (mm ²)	DC resistance 20°C (Ω/km)	AC resistance 70°C (Ω/km)	Trefoil Formation (mH/km)	Flat Formation (mH/km)
10	1.83	2.190	0.350	0.396
16	1.15	1.376	0.327	0.374
25	0.727	0.870	0.312	0.358
35	0.524	0.627	0.299	0.345
50	0.387	0.464	0.290	0.336
70	0.268	0.321	0.280	0.326
95	0.193	0.232	0.274	0.321

Kawat penghantar yang digunakan pada netral berukuran 50 mm² dengan panjang 18 meter. Sesuai dengan spesifikasi diatas maka tahanan kawat

penghantar 50 mm^2 adalah sebesar $0,387 \Omega/\text{km}$. Sehingga kawat penghantar dengan panjang 18 meter akan mempunyai nilai hambatan sebesar $0,006966 \Omega$. Setelah mendapatkan nilai hambatan dari kawat penghantar selanjutnya harus mencari nilai variabel dependen (Y) untuk persamaan regresi. Nilai variabel dependen (Y) dapat dicari menggunakan persamaan (2.9) yaitu:

$$P_N = 43,2^2 \cdot 0,006966 = 13,00022784 \text{ Watt}$$

Dari data observasi diatas, maka untuk mencari nilai variabel dependen (Y) pada setiap nilai arus netral maka diperlukan data dari tabel 4.1 kolom arus N dan data pada tabel 4.2 yang telah dihitung berdasarkan panjang kawat penghantar yang sebenarnya. Sehingga akan terbentuk tabel perhitungan sebagai berikut :

Tabel 4.3 Perhitungan Nilai Variabel Dependen (Y)

No	Arus N (I_N)	Hambatan Kawat Penghantar (R_N)	Variabel Dependen (Y)
1	43,2	0,006966	13,00022784
2	43,2	0,006966	13,00022784
3	43,8	0,006966	13,36385304
4	49,2	0,006966	16,86217824
5	43,2	0,006966	13,00022784
6	43,2	0,006966	13,00022784
7	49,2	0,006966	16,86217824
8	44,4	0,006966	13,73249376
9	55,2	0,006966	21,22568064
10	51,0	0,006966	18,118566
11	57,6	0,006966	23,11151616
12	47,4	0,006966	15,65093016
13	46,2	0,006966	14,86850904

No	Arus N (I_N)	Hambatan Kawat Penghantar (R_N)	Variabel Dependen (Y)
14	53,4	0,006966	19,86396696
15	43,2	0,006966	13,00022784
16	44,4	0,006966	13,73249376
17	43,2	0,006966	13,00022784
18	43,8	0,006966	13,36385304
19	43,8	0,006966	13,36385304
20	45,6	0,006966	14,48482176
21	43,8	0,006966	13,36385304

Setelah nilai variabel dependen didapatkan pada masing-masing nilai arus netral, maka semua data observasi untuk nilai variabel independent dan dependen yang akan digunakan untuk mencari persamaan regresi dapat digambarkan sebagai berikut :

Tabel 4.4 Nilai variabel independent dan variabel dependen

No	X_1	X_2	X_3	Y
1	48	62,4	96,6	13,00022784
2	43,2	69	93	13,00022784
3	49,8	91,2	96	13,36385304
4	54,6	94,8	109,2	16,86217824
5	54	97,2	97,2	13,00022784
6	53,4	87,6	102	13,00022784
7	46,8	77,4	103,8	16,86217824
8	50,4	77,4	101,4	13,73249376
9	31,2	80,4	91,2	21,22568064
10	40,2	92,4	90	18,118566
11	30,6	81	93,6	23,11151616
12	37,8	75,6	91,2	15,65093016
13	38,4	91,2	58,2	14,86850904
14	43,8	88,2	103,2	19,86396696
15	52,2	82,2	101,4	13,00022784

No	X ₁	X ₂	X ₃	Y
16	43,2	85,8	89,4	13,73249376
17	46,8	73,2	96,6	13,00022784
18	40,2	87,6	79,2	13,36385304
19	42,6	93	68,4	13,36385304
20	32,4	81	73,8	14,48482176
21	52,2	94,2	49,2	13,36385304

4.2 Persamaan Regresi Linier Berganda 3 Variabel

Dari tabel 4.4 diatas telah didapatkan nilai untuk setiap variabel independent dan variabel dependen. Maka langkah selanjutnya adalah mencari persamaan regresi linier berganda 3 variabel. Dalam persamaan tersebut kita perlu mencari koefisien regresi $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \beta_3$. Koefisien regresi dapat dicari langkah pendekatan Matriks. Langkah awal dengan menghitung jumlah dari variabel independent ($\Sigma X_1, \Sigma X_2, \Sigma X_3$), jumlah perkalian antar variabel independent dan dependen ($\Sigma X_1Y, \Sigma X_2Y, \Sigma X_3Y$) serta jumlah variabel dependen (ΣY) dengan menggunakan tabel perhitungan sebagai berikut :

Tabel 4.5 Perkalian antar variabel independent dan dependen

No	X ₁	X ₂	X ₃	Y	X ₁ Y	X ₂ Y	X ₃ Y
1	48	62,4	96,6	13,0002 2784	624,010 9363	811,214 2172	1255,82 2009
2	43,2	69	93	13,0002 2784	561,609 8427	897,015 721	1209,02 1189
3	49,8	91,2	96	13,3638 5304	665,519 8814	1218,78 3397	1282,92 9892
4	54,6	94,8	109,2	16,8621 7824	920,674 9319	1598,53 4497	1841,34 9864
5	54	97,2	97,2	13,0002 2784	702,012 3034	1263,62 2146	1263,62 2146
6	53,4	87,6	102	13,0002 2784	694,212 1667	1138,81 9959	1326,02 324
7	46,8	77,4	103,8	16,8621 7824	789,149 9416	1305,13 2596	1750,29 4101
8	50,4	77,4	101,4	13,7324 9376	692,117 6855	1062,89 5017	1392,47 4867
9	31,2	80,4	91,2	21,2256 8064	662,241 236	1706,54 4723	1935,78 2074

No	X_1	X_2	X_3	Y	X_1Y	X_2Y	X_3Y
10	40,2	92,4	90	18,1185 66	728,366 3532	1674,15 5498	1630,67 094
11	30,6	81	93,6	23,1115 1616	707,212 3945	1872,03 2809	2163,23 7913
12	37,8	75,6	91,2	15,6509 3016	591,605 16	1183,21 032	1427,36 4831
13	38,4	91,2	58,2	14,8685 0904	570,950 7471	1356,00 8024	865,347 2261
14	43,8	88,2	103,2	19,8639 6696	870,041 7528	1752,00 1886	2049,96 139
15	52,2	82,2	101,4	13,0002 2784	678,611 8932	1068,61 8728	1318,22 3103
16	43,2	85,8	89,4	13,7324 9376	593,243 7304	1178,24 7965	1227,68 4942
17	46,8	73,2	96,6	13,0002 2784	608,410 6629	951,616 6779	1255,82 2009
18	40,2	87,6	79,2	13,3638 5304	537,226 8922	1170,67 3526	1058,41 7161
19	42,6	93	68,4	13,3638 5304	569,300 1395	1242,83 8333	914,087 5479
20	32,4	81	73,8	14,4848 2176	469,308 225	1173,27 0563	1068,97 9846
21	52,2	94,2	49,2	13,3638 5304	697,593 1287	1258,87 4956	657,501 5696
TOTAL	931,8	1762,8	1884,6	319,970 1139	13933,4 2001	26884,1 1156	28894,6 1786

Dari tabel 4.5 diatas telah didapatkan hasil penjumlahan dari variabel independent ($\sum X_1, \sum X_2, \sum X_3$), jumlah perkalian antar variabel independent dan dependen ($\sum X_1Y, \sum X_2Y, \sum X_3Y$) serta jumlah variabel dependen ($\sum Y$) Selanjutnya mencari hasil penjumlahan dari perkalian antar variabel independent ($\sum X_1X_2, \sum X_1X_3, \sum X_2X_3$) dengan tabel berikut :

Tabel 4.6 Perkalian antar variabel independen

No	X_1	X_2	X_3	X_1X_2	X_1X_3	X_2X_3
1	48	62,4	96,6	2995,2	4636,8	6027,84
2	43,2	69	93	2980,8	4017,6	6417
3	49,8	91,2	96	4541,76	4780,8	8755,2
4	54,6	94,8	109,2	5176,08	5962,32	10352,16
5	54	97,2	97,2	5248,8	5248,8	9447,84
6	53,4	87,6	102	4677,84	5446,8	8935,2

No	X_1	X_2	X_3	X_1X_2	X_1X_3	X_2X_3
7	46,8	77,4	103,8	3622,32	4857,84	8034,12
8	50,4	77,4	101,4	3900,96	5110,56	7848,36
9	31,2	80,4	91,2	2508,48	2845,44	7332,48
10	40,2	92,4	90	3714,48	3618	8316
11	30,6	81	93,6	2478,6	2864,16	7581,6
12	37,8	75,6	91,2	2857,68	3447,36	6894,72
13	38,4	91,2	58,2	3502,08	2234,88	5307,84
14	43,8	88,2	103,2	3863,16	4520,16	9102,24
15	52,2	82,2	101,4	4290,84	5293,08	8335,08
16	43,2	85,8	89,4	3706,56	3862,08	7670,52
17	46,8	73,2	96,6	3425,76	4520,88	7071,12
18	40,2	87,6	79,2	3521,52	3183,84	6937,92
19	42,6	93	68,4	3961,8	2913,84	6361,2
20	32,4	81	73,8	2624,4	2391,12	5977,8
21	52,2	94,2	49,2	4917,24	2568,24	4634,64
TOTAL	931,8	1762,8	1884,6	78516,36	84324,6	157340,88

Dari tabel 4.6 diatas telah didapatkan hasil penjumlahan dari perkalian antar variabel dependen ($\sum X_1X_2, \sum X_1X_3, \sum X_2X_3$). Selanjutnya mencari hasil penjumlahan dari kuadrat variabel dependent ($\sum X_1^2, \sum X_2^2, \sum X_3^2$) dengan tabel berikut :

Tabel 4.7 Kuadrat antar variabel independen

No	X_1	X_2	X_3	X_1^2	X_2^2	X_3^2
1	48	62,4	96,6	2304	3893,76	9331,56
2	43,2	69	93	1866,24	4761	8649
3	49,8	91,2	96	2480,04	8317,44	9216
4	54,6	94,8	109,2	2981,16	8987,04	11924,64
5	54	97,2	97,2	2916	9447,84	9447,84
6	53,4	87,6	102	2851,56	7673,76	10404
7	46,8	77,4	103,8	2190,24	5990,76	10774,44
8	50,4	77,4	101,4	2540,16	5990,76	10281,96
9	31,2	80,4	91,2	973,44	6464,16	8317,44
10	40,2	92,4	90	1616,04	8537,76	8100
11	30,6	81	93,6	936,36	6561	8760,96

No	X ₁	X ₂	X ₃	X ₁ ²	X ₂ ²	X ₃ ²
12	37,8	75,6	91,2	1428,84	5715,36	8317,44
13	38,4	91,2	58,2	1474,56	8317,44	3387,24
14	43,8	88,2	103,2	1918,44	7779,24	10650,24
15	52,2	82,2	101,4	2724,84	6756,84	10281,96
16	43,2	85,8	89,4	1866,24	7361,64	7992,36
17	46,8	73,2	96,6	2190,24	5358,24	9331,56
18	40,2	87,6	79,2	1616,04	7673,76	6272,64
19	42,6	93	68,4	1814,76	8649	4678,56
20	32,4	81	73,8	1049,76	6561	5446,44
21	52,2	94,2	49,2	2724,84	8873,64	2420,64
TOTAL	931,8	1762,8	1884,6	42463,8	149671,44	173986,92

Setelah didapatkan jumlah dari semua nilai variabel pembantu ($X_1Y, X_2Y, X_3Y, X_1X_2, X_1X_3, X_2X_3, X_1^2, X_2^2, X_3^2$) maka langkah selanjutnya adalah membuat Matriks yang akan digunakan untuk mendapatkan nilai dari masing-masing koefisien regresi. Matriks yang akan digunakan adalah sebagai berikut :

$$H = \begin{bmatrix} \Sigma Y \\ \Sigma X_1 Y \\ \Sigma X_2 Y \\ \Sigma X_3 Y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 319,9701139 \\ 13933,42001 \\ 26884,11156 \\ 28894,61786 \end{bmatrix}$$

$$A = \begin{bmatrix} n & \Sigma X_1 & \Sigma X_2 & \Sigma X_3 \\ \Sigma X_1 & \Sigma X_1^2 & \Sigma X_1 X_2 & \Sigma X_1 X_3 \\ \Sigma X_2 & \Sigma X_1 X_2 & \Sigma X_2^2 & \Sigma X_2 X_3 \\ \Sigma X_3 & \Sigma X_1 X_3 & \Sigma X_2 X_3 & \Sigma X_3^2 \end{bmatrix}$$

$$A = \begin{bmatrix} 21 & 931,8 & 1762,8 & 1884,6 \\ 931,8 & 42463,8 & 78516,36 & 84324,6 \\ 1762,8 & 78516,36 & 149671,44 & 157340,88 \\ 1884,6 & 84324,6 & 157340,88 & 173986,92 \end{bmatrix}$$

$$A1 = \begin{bmatrix} \Sigma Y & \Sigma X_1 & \Sigma X_2 & \Sigma X_3 \\ \Sigma X_1 Y & \Sigma X_1^2 & \Sigma X_1 X_2 & \Sigma X_1 X_3 \\ \Sigma X_2 Y & \Sigma X_1 X_2 & \Sigma X_2^2 & \Sigma X_2 X_3 \\ \Sigma X_3 Y & \Sigma X_1 X_3 & \Sigma X_2 X_3 & \Sigma X_3^2 \end{bmatrix}$$

$$A1 = \begin{bmatrix} 319,9701139 & 931,8 & 1762,8 & 1884,6 \\ 13933,42001 & 42463,8 & 78516,36 & 84324,6 \\ 26884,11156 & 78516,36 & 149671,44 & 157340,88 \\ 28894,61786 & 84324,6 & 157340,88 & 173986,92 \end{bmatrix}$$

$$A2 = \begin{bmatrix} n & \Sigma Y & \Sigma X_2 & \Sigma X_3 \\ \Sigma X_1 & \Sigma X_1 Y & \Sigma X_1 X_2 & \Sigma X_1 X_3 \\ \Sigma X_2 & \Sigma X_2 Y & \Sigma X_2^2 & \Sigma X_2 X_3 \\ \Sigma X_3 & \Sigma X_3 Y & \Sigma X_2 X_3 & \Sigma X_3^2 \end{bmatrix}$$

$$A2 = \begin{bmatrix} 21 & 319,9701139 & 1762,8 & 1884,6 \\ 931,8 & 13933,42001 & 78516,36 & 84324,6 \\ 1762,8 & 26884,11156 & 149671,44 & 157340,88 \\ 1884,6 & 28894,61786 & 157340,88 & 173986,92 \end{bmatrix}$$

$$A3 = \begin{bmatrix} n & \Sigma X_1 & \Sigma Y & \Sigma X_3 \\ \Sigma X_1 & \Sigma X_1^2 & \Sigma X_1 Y & \Sigma X_1 X_3 \\ \Sigma X_2 & \Sigma X_1 X_2 & \Sigma X_2 Y & \Sigma X_2 X_3 \\ \Sigma X_3 & \Sigma X_1 X_3 & \Sigma X_3 Y & \Sigma X_3^2 \end{bmatrix}$$

$$A3 = \begin{bmatrix} 21 & 931,8 & 319,9701139 & 1884,6 \\ 931,8 & 42463,8 & 13933,42001 & 84324,6 \\ 1762,8 & 78516,36 & 26884,11156 & 157340,88 \\ 1884,6 & 84324,6 & 28894,61786 & 173986,92 \end{bmatrix}$$

$$A4 = \begin{bmatrix} n & \Sigma X_1 & \Sigma X_2 & \Sigma Y \\ \Sigma X_1 & \Sigma X_1^2 & \Sigma X_1 X_2 & \Sigma X_1 Y \\ \Sigma X_2 & \Sigma X_1 X_2 & \Sigma X_2^2 & \Sigma X_2 Y \\ \Sigma X_3 & \Sigma X_1 X_3 & \Sigma X_2 X_3 & \Sigma X_3 Y \end{bmatrix}$$

$$A4 = \begin{bmatrix} 21 & 931,8 & 1762,8 & 319,9701139 \\ 931,8 & 42463,8 & 78516,36 & 13933,42001 \\ 1762,8 & 78516,36 & 149671,44 & 26884,11156 \\ 1884,6 & 84324,6 & 157340,88 & 28894,61786 \end{bmatrix}$$

Dari Matriks diatas ($A1, A2, A3, A4$) maka dapat dihitung besaran nilai koefisien regresi dengan cara pembagian dari masing-masing determinan Matriks tersebut. Sehingga koefisien regresi ($\beta_0, \beta_1, \beta_2, \beta_3$) dapat diperoleh dengan menghitung determinan menggunakan persamaan (2.14), dan hasil dari determinan Matriks tersebut dapat digunakan untuk mencari koefisien regresi yang dirumuskan sebagai berikut:

$$\beta_0 = \frac{\det(A1)}{\det(A)} ; \beta_1 = \frac{\det(A2)}{\det(A)} ; \beta_2 = \frac{\det(A3)}{\det(A)} ; \beta_3 = \frac{\det(A4)}{\det(A)}$$

Sehingga jika rumus diatas dimasukkan dengan hasil determinan nilai Matriks yang telah dibuat maka hasil dari masing-masing koefisien regresi adalah sebagai berikut :

$$\beta_0 = \frac{1372999949911}{142128814734} = 9,660250474$$

$$\beta_1 = \frac{-48170083821}{142128814734} = -0,338918494$$

$$\beta_2 = \frac{18372978327}{142128814734} = 0,129269905$$

$$\beta_3 = \frac{15462682799}{142128814734} = 0,108793441$$

Setelah didapatkan nilai dari masing-masing koefisien regresi maka persamaan regresinya dapat dituliskan sebagai berikut :

$$Y = 9,660250474 - 0,338918494X_1 + 0,129269905X_2 + 0,108793441X_3$$

Dari persamaan regresi yang telah didapatkan, akan disimulasikan jika salah satu pisa mengalami sebesar 5 ampere. Dari kenaikan tersebut kita akan mencari energi yang hilang dengan menggunakan model yang telah ada menggunakan tabel berikut :

Tabel 4.8 Simulasi energi yang hilang dari kenaikan arus

No	X ₁	X ₂	X ₃	Y
1	42,6	93	68,4	14,68
2	47,6	93	68,4	12,99
3	42,6	98	68,4	15,33
4	42,6	98	73,4	15,23

Dari tabel diatas, jika kenaikan terjadi selama 1 jam maka pada model pemakaian di segmen perhotelan yang dijadikan sampel tersebut kenaikan arus di fasa R sebesar 5 ampere akan menyebabkan energi yang hilang akan turun sebesar 1,69 *watthour*. Jika ada kenaikan arus di fasa S sebesar 5 ampere maka energi yang hilang akan naik sebesar 0,65 *watthour* dan jika ada kenaikan arus di fasa T sebesar 5 ampere maka energi yang hilang akan naik sebesar 0,54 *watthour*.

4.3 Tabel Uji ANOVA

ANOVA digunakan untuk mengevaluasi perbedaan rata-rata antar beberapa kelompok yang mengalami perlakuan berbeda. Dengan kata lain, analisis ini membantu dalam mengidentifikasi sejauh mana variabel bebas secara kolektif memengaruhi variabel terikat dalam suatu penelitian. Tabel

uji ANOVA digambarkan pada tabel 2.3. Sehingga kita perlu menghitung nilai prediksi ($\hat{Y}$) dan rata-rata nilai aktual ($\bar{Y}$). Nilai prediksi didapatkan dengan memasukkan persamaan regresi dengan masing-masing nilai variabel independen. Setelah nilai prediksi dan rata-rata nilai actual diketahui maka tabel ANOVA dapat lengkap maka dapat diketahui nilai rata-rata variasi yang dijelaskan oleh model dan rata-rata variasi dalam error atau residual sehingga dapat dianalisis apakah model memiliki signifikansi yang cukup untuk menjelaskan hubungan antara variabel independen dan dependen. Untuk mencari nilai prediksi ($\hat{Y}$) dan rata-rata aktual ($\bar{Y}$) dapat dijelaskan dalam tabel berikut :

Tabel 4.8 Perhitungan nilai prediksi dan residual

No	aktual (Y_i)	prediksi ($\hat{Y}$)	$(\hat{Y} - \bar{Y})^2$	$\Sigma(Y_i - \hat{Y})^2$
1	13,00022784	11,96805121	10,6838825	1,065388605
2	13,00022784	14,05638496	1,393077714	1,115467861
3	13,36385304	15,01569511	0,048830828	2,72858221
4	16,86217824	15,29033141	0,002879323	2,470702454
5	13,00022784	14,49840899	0,545032409	2,244546753
6	13,00022784	13,98297752	1,571750088	0,965796926
7	16,86217824	15,09711474	0,019476254	3,115449153
8	13,73249376	13,61590391	2,626889511	0,013593194
9	21,22568064	19,4012556	17,34375584	3,328526709
10	18,118566	17,77167589	6,426244243	0,120332751
11	23,11151616	19,9432729	22,15209119	10,03776534
12	15,65093016	16,543898	1,708839584	0,797391569
13	14,86850904	14,76697387	0,220616418	0,01030939
14	19,86396696	17,44470913	4,875427558	5,852808454
15	13,00022784	13,62634616	2,593149608	0,39202415
16	13,73249376	15,83646297	0,359749098	4,426686438
17	13,00022784	13,77086837	2,148580555	0,593886824
18	13,36385304	15,97621118	0,546918069	6,82441507
19	13,36385304	14,68589512	0,30335527	1,747795267
20	14,48482176	17,17910948	3,773063025	7,259186341
21	13,36385304	9,498567403	32,92584542	14,94043306
Rata-Rata ($\bar{Y}$)	15,23667209			
Jumlah			112,2694545	70,05108852

Dari tabel diatas telah diketahui nilai dari jumlah kuadrat nilai prediksi dikurangi nilai rata-rata $\sum(\hat{Y} - \bar{Y})^2$ dan jumlah kuadrat nilai aktual dikurangi nilai prediksi $\sum(Y_i - \hat{Y})^2$. Sebelum memasukkan nilai tersebut kedalam tabel ANOVA maka perlu diketahui nilai *df Regression*, *df Error*, *Mean Square Regression* (MSR), dan *Mean Square Error* (MSE).

Df Regression didapatkan dari rumus $K - 1$, K adalah jumlah parameter dalam model (termasuk intersep) dengan jumlah yaitu 4. Sehingga nilai *df Regression* adalah $(4 - 1) = 3$. *Df Error* didapatkan dari rumus $n - K$, dimana n adalah jumlah total data observasi. Sehingga nilai *Df Error* adalah 17.

Mean Square Regression (MSR) didapatkan dari jumlah kuadrat nilai prediksi dikurangi nilai rata-rata $\sum(\hat{Y} - \bar{Y})^2$ dibagi dengan $K - 1$. Sehingga dapat dihitung sebagai berikut :

$$\text{Mean Square Regression} = \frac{112,2694545}{3} = 37,4231515$$

Sedangkan *Mean Square Error* (MSE) didapatkan dari jumlah kuadrat nilai aktual dikurangi nilai prediksi $\sum(Y_i - \hat{Y})^2$ dibagi dengan $n - K$. Sehingga MSE dapat dihitung sebagai berikut :

$$\text{Mean Square Error} = \frac{70,05108852}{17} = 4,120652266$$

Nilai F yang digunakan untuk menguji signifikansi model regresi dapat dihitung dengan rumus $F = \frac{\text{Mean Square Regression}}{\text{Mean Square Error}}$ sehingga nilai F akan didapatkan sebagai berikut $F = \frac{37,4231515}{4,120652266} = 9,081851388$. Dari data yang telah dihitung diatas maka dapat disusun tabel ANOVA sebagai berikut :

Tabel 4.9 Tabel uji ANOVA data observasi

Model	Sum of Square	df	Mean Square	F
<i>Regression/Model</i>	112,2694545	3	37,4231515	9,081851388
<i>Residual/Error</i>	70,05108852	17	4,120652266	
Total	182,320543	20		

Nilai $R\text{ Square} = 1 - \frac{\text{Sum of Square Error}}{\text{Sum of Square Total}}$, sehingga nilai $R\text{ Square} = 0,615780606$ (61,58%). $R\text{ Square}$ sebesar 61,58% menunjukkan bahwa model memiliki kemampuan menjelaskan yang cukup baik, tetapi masih ada 38,42% variasi yang belum dijelaskan oleh model ini. Hasil ini menunjukkan bahwa arus R, arus S, dan arus T memiliki pengaruh terhadap arus netral, meskipun tidak seluruh variasi dapat dijelaskan oleh model.



BAB V

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

1. Hasil analisis menunjukkan bahwa ketidakseimbangan beban pada gardu distribusi memiliki dampak signifikan terhadap energi yang hilang. Jika semakin besar perbedaan arus antar fasanya, maka semakin besar energi yang hilang.
2. Dari hasil persamaan regresi berganda 3 variabel didapati jika ada kenaikan arus fasa R sebesar 5 ampere selama 1 jam maka menyebabkan penurunan energi hilang sebesar 1,69 *Watthour*. Jika kenaikan arus fasa S sebesar 5 ampere selama 1 jam maka menyebabkan kenaikan energi hilang sebesar 0,65 *Watthour*. Dan jika ada kenaikan arus fasa T sebesar 5 ampere selama 1 jam maka menyebabkan kenaikan energi hilang sebesar 0,54 *Watthour*.
3. Dikarenakan tingkat okupansi dan pemakaian pelanggan sulit dikendalikan maka salah satu strategi untuk meminimalkan energi yang hilang bisa dilakukan dengan memonitoring dan kontrol beban secara *real-time* sehingga dapat membantu mendeteksi serta mengoreksi ketidakseimbangan beban sebelum menyebabkan rugi-rugi daya yang lebih besar.

5.2 Saran

1. Model regresi ini cukup baik dengan nilai *R Square* sebesar 61,58% menunjukkan bahwa model dapat menjelaskan 61,58% variasi pada arus netral dan energi yang hilang namun masih terdapat variasi yang belum dijelaskan oleh model sebesar 38,42% yang dipengaruhi oleh faktor lain yang tidak dimasukkan dalam model sehingga model perhitungan dapat di sempurnakan.
2. Perlu dilakukan penambahan variabel lain yang mungkin berpengaruh terhadap arus netral, seperti tegangan, faktor daya, atau harmonisa agar model regresi dapat menjelaskan lebih banyak variasi data.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Muliadi, Syukri, T. M. Asyadi, and A. Salim, "Analisa Pengaruh Ketidakseimbangan Beban Pada Trafo Distribusi Penyulang Mibo Rayon Merduati," vol. 2, 2022.
- [2] M. I. Nur *et al.*, "Analisis Pengaruh Penyeimbangan Beban Tranformator Pada Gardu Distribusi Mg0045 160 Kva Terhadap Losses," 2024.
- [3] M. Patilima, "Pengaruh Ketidakseimbangan Beban Terhadap Losses Dan Pembebanan Transformator Distribusi," 2022.
- [4] A. D. Wirawan, Junaidi, and M. I. Arsyad, "Analisa Pengaruh Ketidakseimbangan Beban Terhadap Arus Netral Dan Losses Pada Transformator Distribusi Di Penyulang Pangsuma Pt. Pln (Persero) Rayon Mempawah," 2022.
- [5] R. Afrianda, A. Annisa, and N. Huda, "Pengaruh Ketidakseimbangan Beban Terhadap Efisiensi Transformator Distribusi Studi Gardu Pt Pln (Persero) Area Bekasi," vol. 10, no. 1, 2020, doi: 10.33322/sutet.v10i1.1127.
- [6] J. Rumakat and D. Fauziah, "Prosiding Seminar Nasional Energi, Telekomunikasi dan Otomasi SNETO 2021 Analisis Beban Tidak Seimbang Terhadap Arus Netral dan Rugi-Rugi pada Penghantar Netral Transformator di Rayon Baguala Ambon," 2021.
- [7] J. Gurusinga, "Prosiding Seminar Nasional Energi, Telekomunikasi Dan Otomasi Sneto 2023 Analisis Pengaruh Ketidakseimbangan Beban Terhadap Arus Dan Losses Pada Penghantar Netral Di Gardu Distribusi Bbkk,Psh Dan Cpty Up3 Garut," 2023.
- [8] Z. Sya'roni and T. Rijanto, "Analisis Ketidakseimbangan Beban Transformator Distribusi 20 Kv Dan Solusinya Pada Jaringan Tegangan Rendah," 2019.

- [9] Ruliyanto, “Pengaruh Ketidakseimbangan Beban Terhadap Arus Netral dan Arus Ground pada Trafo 1 dan Trafo 2 pada Beban Puncak Sesaat,” *Jurnal Ilmiah GIGA*, vol. 23, no. 1, pp. 2020–2047, 2020.
- [10] A. Nugroho, “Analisis Pengaruh Ketidakseimbangan Beban Terhadap Arus Netral Dan Losses Pada Trafo Distribusi (Studi Kasus Pada Pt. Pln (Persero) Rayon Kartasura),” 2019.
- [11] Suhadi, “Teknik Distrbusi Tenaga Listrik Jilid 1,” 2008.
- [12] E. M. Asih, R. Wahyu, Y. Putra, M. Pd, S. Andriani, and M. P. Kelas, “Matriks Untuk SMA/MA/SMK/MAK XI Semester Ganjil,” 2023.
- [13] Y. Irfan, “Modul Pembelajaran Sma Matematika Umum Determinan Dan Invers Matriks,” 2020.
- [14] W. A. Iba Zainuddin, “Regresi Linier Sederhana dan Berganda,” 2024.

