

Jurnal Ilmiah Setrum

Volume 14, No.1, Juni 2025

p-ISSN : 2301-4652 / e-ISSN : 2503-068X

Analisa Ketidakseimbangan Beban Terhadap Energi Hilang Menggunakan Metode Regresi di UP3 Berau

Wahyu Hidayanto^{1*}, Ida Widiastuti¹

¹Universitas Islam Sultan Agung, Indonesia, Fakultas Teknologi Industri, Prodi Teknik Elektro

Informasi Artikel

Naskah Diterima :

28 April 2025

Direvisi : 18 Mei 2025

Disetujui : 28 Mei 2025

doi: 10.62870/setrum.v14i1.32251

***Korespondensi Penulis :**

hidayantowahyu93@gmail.com

Graphical abstract



Abstract

Load imbalance in distribution substations is one of the main factors contributing to the emergence of neutral current and increased energy losses. In electrical power distribution systems, uneven loading across the three phases (R, S, and T) can lead to higher neutral current, which in turn reduces distribution efficiency and increases power losses. This study was conducted at PLN ULP Tanjung Redeb UP3 Berau, focusing on distribution transformers serving the hospitality sector, where electricity consumption patterns are influenced by hotel occupancy rates. A quantitative approach was employed using a multiple linear regression method with three variables to analyze the relationship between load imbalance, neutral current, and energy losses. The results indicate that the greater the difference in current between phases, the higher the energy loss. According to the developed regression model, an increase of 5 amperes in phase R current over one hour can actually reduce energy loss by 1.69 watthours. On the other hand, a 5-ampere increase in phases S and T over the same duration leads to an increase in energy loss by 0.65 watthours and 0.54 watthours, respectively. With an R Square of 61.58%, it shows that the model has a fairly good ability to explain, but there is still 38.42% of the variation that cannot be explained.

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

Abstrak

Ketidakseimbangan beban pada gardu distribusi menjadi salah satu penyebab utama munculnya arus netral serta meningkatnya rugi-rugi energi listrik. Dalam sistem distribusi tenaga listrik, pembebanan yang tidak merata pada ketiga fasa (R, S, dan T) dapat menyebabkan peningkatan arus netral, yang berdampak pada turunnya efisiensi distribusi serta meningkatnya kehilangan energi. Penelitian ini dilaksanakan di PLN ULP Tanjung Redeb UP3 Berau dengan objek trafo distribusi pada kawasan perhotelan, di mana konsumsi energi listrik sangat dipengaruhi oleh tingkat hunian hotel. Pendekatan yang digunakan adalah kuantitatif dengan menerapkan metode regresi linier berganda tiga variabel untuk mengevaluasi hubungan antara ketidakseimbangan beban, arus netral, dan rugi-rugi energi. Hasil analisis menunjukkan bahwa semakin besar selisih arus antar fasa, maka semakin besar pula kehilangan energi yang terjadi. Berdasarkan model regresi yang dikembangkan, peningkatan arus fasa R sebesar 5 ampere selama satu jam justru dapat mengurangi energi hilang sebesar 1,69 *Watthour*. Sebaliknya, kenaikan arus fasa S dan T masing-masing sebesar 5 ampere selama satu jam justru meningkatkan rugi energi sebesar 0,65 *Watthour* dan 0,54 *Watthour*. Dengan *R Square* sebesar 61,58% menampilkan bahwa model mempunyai kemampuan untuk menjelaskan yang cukup baik, namun masih ada 38,42% variasi yang belum dapat dijelaskan.



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

© 2025 Penerbit Jurusan Teknik Elektro UNTIRTA Press. All rights reserved.

1. PENDAHULUAN

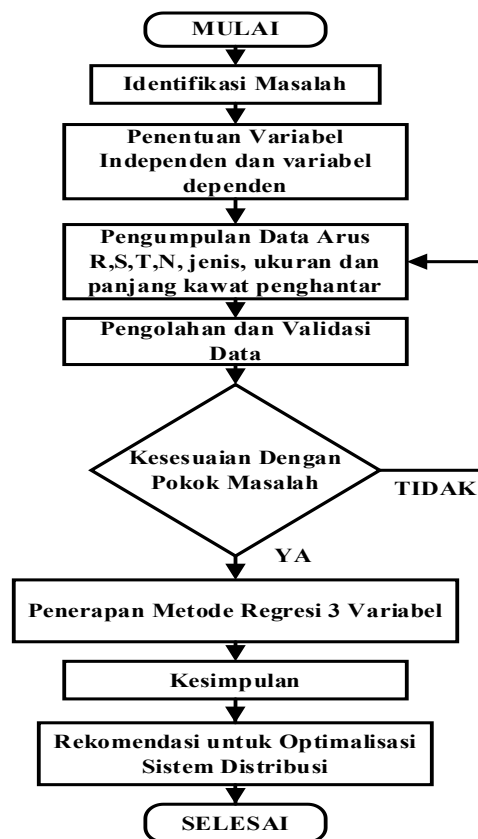
Untuk mendukung aktivitas sehari-hari manusia, energi listrik menjadi kebutuhan yang sangat vital, baik dalam sektor komersial, industri, maupun bisnis. Hal ini karena tenaga listrik mudah untuk ditransportasikan dan dikonversikan ke dalam bentuk energi lain [1]. Di era industrialisasi dan digitalisasi saat ini, permintaan terhadap energi listrik terus mengalami peningkatan setiap tahunnya. Hal ini menjadi tantangan bagi penyedia listrik dalam memastikan kontinuitas, kualitas, serta stabilitas penyaluran energi dari pembangkit hingga ke tangan konsumen. Seiring dengan laju pertumbuhan pembangunan di setiap sektor, maka dituntut adanya keandalan sistem maupun peralatan penyaluran tenaga listrik [2]. Peningkatan kebutuhan listrik ini sejalan dengan pertumbuhan jumlah penduduk dan percepatan pembangunan yang signifikan, baik di sektor publik, bisnis, maupun industri. Penyediaan listrik yang stabil dan kontinu merupakan syarat mutlak yang harus dipenuhi dalam memenuhi kebutuhan listrik [3][4]. Beban listrik disalurkan ke transformator distribusi melalui proses penyambungan yang cepat, dengan tingkat konsumsi yang bervariasi di setiap jalurnya, sehingga menyebabkan distribusi beban pada trafo menjadi tidak 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 [6]. Ketidakseimbangan beban juga bisa terjadi akibat penggunaan energi listrik yang tidak berlangsung secara bersamaan, meskipun beban yang digunakan memiliki nilai yang serupa, sehingga menimbulkan ketidakseimbangan antar fasa (R, S, dan T). Ketidakseimbangan beban pada tiap-tiap fasa (R, S, dan T), sehingga menyebabkan mengalirnya arus di netral trafo [7][8]. 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 [9]. Arus netral yang berlebihan pada sistem distribusi dapat mengakibatkan menurunnya kualitas daya dan menimbulkan panas berlebih pada transformator [10].

Penelitian ini dilaksanakan di PLN ULP Tanjung Redeb UP3 Berau dengan fokus pada analisis trafo distribusi di sektor perhotelan. Pada segmen ini, konsumsi listrik sangat bergantung pada tingkat hunian, sehingga berpotensi besar menimbulkan ketidakseimbangan beban. Ketidakseimbangan tersebut dapat menyebabkan munculnya arus netral dan terjadinya kehilangan energi. Di sisi lain, perhitungan rugi-rugi energi pada gardu distribusi umumnya hanya mencakup rugi besi dan rugi belitan pada transformator, tanpa mempertimbangkan adanya ketidakseimbangan beban. Hal ini menimbulkan kemungkinan adanya energi yang hilang namun tidak tercatat dan tidak ditagihkan kepada pelanggan. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk memahami pengaruh ketidakseimbangan beban pada masing-masing fasa (R, S, dan T) terhadap arus netral dan kehilangan energi dengan menggunakan metode regresi, guna meningkatkan efisiensi distribusi serta menekan arus netral pada gardu distribusi di masa mendatang.

2. METODE

Penelitian ini mengadopsi pendekatan kuantitatif dengan penerapan metode regresi linier berganda yang melibatkan tiga variabel independen. Metode ini dipilih untuk melakukan analisis yang lebih komprehensif dan terukur terhadap pengaruh variabel-variabel independen terhadap variabel dependen. Dalam konteks penelitian ini, variabel dependen, yaitu energi yang hilang, dipengaruhi oleh tiga variabel independen, yakni arus R, arus S, dan arus T. Melalui penggunaan metode ini, penelitian bertujuan untuk menguji eksistensi hubungan signifikan antara arus R, S, dan T terhadap arus netral serta energi yang hilang, sekaligus mengukur sejauh mana kontribusi masing-masing variabel terhadap variabel dependen. Penelitian ini dilaksanakan di area operasional PT PLN (Persero) ULP Tanjung Redeb UP3 Berau, Kalimantan Timur. Penelitian ini berlangsung selama lebih kurang tiga bulan,

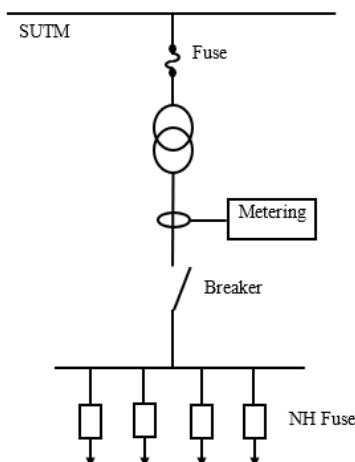
dimulai dari bulan Desember 2024 hingga selesai pada bulan Februari 2025. Diagram alir penelitian dijelaskan pada gambar 1 dibawah ini :



Gambar 1. Diagram Alir Penelitian

Dalam penelitian ini, fokus utama diarahkan pada dampak ketidakseimbangan beban pada gardu distribusi terhadap arus netral dan energi yang hilang khususnya pada segmen perhotelan. Hal ini disebabkan oleh karakteristik konsumsi listrik pada sektor tersebut yang sangat bergantung pada tingkat okupansi, sehingga berpotensi besar menyebabkan distribusi beban yang tidak merata. Ketidakseimbangan ini berkontribusi pada timbulnya arus netral serta kehilangan energi yang pada akhirnya tidak dapat ditagihkan kepada pelanggan.

Ilustrasi *single line diagram* dari gardu distribusi untuk pelanggan di segmen perhotelan dijelaskan sesuai gambar 2 dibawah ini :



Gambar 2. Diagram Alir 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

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)

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. 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.

3. HASIL

Dalam penelitian ini, data arus pada fase R, S, T, dan N diambil dari Profil Beban pada meteran *kilowatt-hour* (kWh meter) yang terpasang di gardu. Data ini tercatat setiap 15 menit pada kWh meter dan tersedia untuk diunduh dalam format *Microsoft Excel*. Pengukuran kWh meter dilakukan menggunakan Current Transformer (CT) dengan rasio 300/5A, sehingga data yang diperoleh perlu dikalikan dengan faktor kali meter (FKM) sebesar 60. Data yang diunduh dari kWh Meter dapat ditampilkan sesuai tabel 1 sebagai berikut :

Tabel 1. Data Hasil Pengukuran Arus

No	Tanggal Waktu	Arus R	Arus S	Arus T	Arus N
1	2024-12-03 23.15.00	48	62,4	96,6	43,2
2	2024-12-22 05.15.00	43,2	69	93	43,2
3	2024-12-31 18.45.00	49,8	91,2	96	43,8
4	2024-12-31 19.00.00	54,6	94,8	109,2	49,2
5	2024-12-31 19.15.00	54	97,2	97,2	43,2
6	2025-01-01 03.45.00	53,4	87,6	102	43,2
7	2025-01-01 11.00.00	46,8	77,4	103,8	49,2
8	2025-01-01 11.15.00	50,4	77,4	101,4	44,4
9	2025-01-06 17.45.00	31,2	80,4	91,2	55,2
10	2025-01-06 18.00.00	40,2	92,4	90	51,0
11	2025-01-06 18.15.00	30,6	81	93,6	57,6
12	2025-01-06 19.00.00	37,8	75,6	91,2	47,4
13	2025-01-07 17.00.00	38,4	91,2	58,2	46,2

No	Tanggal Waktu	Arus R	Arus S	Arus T	Arus N
14	2025-01-07 20.00.00	43,8	88,2	103,2	53,4
15	2025-01-09 19.45.00	52,2	82,2	101,4	43,2
16	2025-01-11 18.45.00	43,2	85,8	89,4	44,4
17	2025-01-12 00.15.00	46,8	73,2	96,6	43,2
18	2025-01-12 17.15.00	40,2	87,6	79,2	43,8
19	2025-01-12 18.00.00	42,6	93	68,4	43,8
20	2025-01-13 18.15.00	32,4	81	73,8	45,6
21	2025-01-16 19.45.00	52,2	94,2	49,2	43,8

Untuk memperoleh nilai hambatan kabel, data diambil dari lembar data spesifikasi kabel. Kawat penghantar yang digunakan adalah tipe NYY. Spesifikasi kabel tersebut dapat dilihat pada tabel 2 dibawah ini :

Tabel 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 memiliki ukuran 50 mm² dengan panjang 18 meter. Berdasarkan spesifikasi di atas, tahanan kawat penghantar 50 mm² adalah sebesar 0,387 Ω/km. Oleh karena itu, kawat penghantar dengan panjang 18 meter akan memiliki nilai hambatan sebesar 0,006966 Ω. Nilai variabel dependen (Y) dapat dihitung menggunakan persamaan (1) yaitu :

$$P_N = I_N^2 \cdot R_N \text{ (Watt)} \quad (1)$$

Dimana P_N adalah daya pada penghantar netral atau energi yang hilang, I_N adalah arus pada penghantar netral, R_N adalah hambatan kawat penghantar. Dengan demikian, akan terbentuk tabel perhitungan yang menunjukkan hubungan antara arus netral dan nilai hambatan kawat penghantar, serta hasil perhitungan variabel dependen (Y) untuk setiap nilai arus netral yang ditampilkan pada tabel 3 dibawah ini :

Tabel 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

No	Arus N (I_N)	Hambatan Kawat Penghantar (R_N)	Variabel Dependen (Y)
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
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 diperoleh pada setiap nilai arus netral, maka seluruh data observasi untuk variabel independen dan dependen yang akan digunakan untuk mencari persamaan regresi dapat digambarkan oleh tabel 4 sebagai berikut :

Tabel 4. Nilai variabel independen 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
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

3.1 Persamaan Regresi Linier Berganda 3 Variabel

Dalam persamaan regresi 3 variabel kita perlu mencari koefisien regresi $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \beta_3$. Koefisien regresi dapat diperhitungkan melalui pendekatan matrik. Matrik yang akan digunakan dijelaskan pada persamaan (2) hingga (7) sebagai berikut :

$$H = \begin{bmatrix} \Sigma Y \\ \Sigma X_1 Y \\ \Sigma X_2 Y \\ \Sigma X_3 Y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 319,9701139 \\ 13933,42001 \\ 26884,11156 \\ 28894,61786 \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$A = \begin{bmatrix} n & \Sigma X_1 & \Sigma X_2 & \Sigma X_3 \\ \Sigma X_1 & \Sigma X_1^2 & \Sigma X_1 X_2 & \Sigma X_1 X_3 \\ \Sigma X_2 & \Sigma X_1 X_2 & \Sigma X_2^2 & \Sigma X_2 X_3 \\ \Sigma X_3 & \Sigma X_1 X_3 & \Sigma X_2 X_3 & \Sigma X_3^2 \end{bmatrix} \quad (3)$$

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

$$A1 = \begin{bmatrix} \Sigma Y & \Sigma X_1 & \Sigma X_2 & \Sigma X_3 \\ \Sigma X_1 Y & \Sigma X_1^2 & \Sigma X_1 X_2 & \Sigma X_1 X_3 \\ \Sigma X_2 Y & \Sigma X_1 X_2 & \Sigma X_2^2 & \Sigma X_2 X_3 \\ \Sigma X_3 Y & \Sigma X_1 X_3 & \Sigma X_2 X_3 & \Sigma X_3^2 \end{bmatrix} \quad (4)$$

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

$$A2 = \begin{bmatrix} n & \Sigma Y & \Sigma X_2 & \Sigma X_3 \\ \Sigma X_1 & \Sigma X_1 Y & \Sigma X_1 X_2 & \Sigma X_1 X_3 \\ \Sigma X_2 & \Sigma X_2 Y & \Sigma X_2^2 & \Sigma X_2 X_3 \\ \Sigma X_3 & \Sigma X_3 Y & \Sigma X_2 X_3 & \Sigma X_3^2 \end{bmatrix} \quad (5)$$

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

$$A3 = \begin{bmatrix} n & \Sigma X_1 & \Sigma Y & \Sigma X_3 \\ \Sigma X_1 & \Sigma X_1^2 & \Sigma X_1 Y & \Sigma X_1 X_3 \\ \Sigma X_2 & \Sigma X_1 X_2 & \Sigma X_2 Y & \Sigma X_2 X_3 \\ \Sigma X_3 & \Sigma X_1 X_3 & \Sigma X_3 Y & \Sigma X_3^2 \end{bmatrix} \quad (6)$$

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

$$A4 = \begin{bmatrix} n & \Sigma X_1 & \Sigma X_2 & \Sigma Y \\ \Sigma X_1 & \Sigma X_1^2 & \Sigma X_1 X_2 & \Sigma X_1 Y \\ \Sigma X_2 & \Sigma X_1 X_2 & \Sigma X_2^2 & \Sigma X_2 Y \\ \Sigma X_3 & \Sigma X_1 X_3 & \Sigma X_2 X_3 & \Sigma X_3 Y \end{bmatrix} \quad (7)$$

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

Dari matrik diatas (A1, A2, A3, A4) maka dapat dihitung besaran nilai koefisien regresi dengan cara pembagian dari masing-masing determinan matrik tersebut. Sehingga koefisien regresi ($\beta_0, \beta_1, \beta_2, \beta_3$) dapat dihitung dengan persamaan (8) sebagai berikut :

$$\beta_0 = \frac{\det(A1)}{\det(A)} ; \beta_1 = \frac{\det(A2)}{\det(A)} ; \beta_2 = \frac{\det(A3)}{\det(A)} ; \beta_3 = \frac{\det(A4)}{\det(A)} \quad (8)$$

Dimana $\det(x)$ merupakan hasil determinan dari suatu matrik. Sehingga jika persamaan (8) dimasukkan dengan hasil determinan nilai matrik persamaan (3) hingga (7) 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 dalam persamaan (9) sebagai berikut :

$$Y = 9,660250474 - 0,338918494X_1 + 0,129269905X_2 + 0,108793441X_3 \quad (9)$$

Setelah persamaan (9) yaitu persamaan regresi linier berganda didapatkan, langkah selanjutnya adalah melakukan simulasi untuk melihat dampak dari kenaikan arus pada salah satu fasa, misalnya sebesar 5 ampere. Dari kenaikan tersebut akan dihitung energi yang hilang dengan menggunakan model yang telah ada menggunakan tabel 5 sebagai berikut :

Tabel 5. Perhitungan model regresi

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

Berdasarkan tabel 5, jika kenaikan arus terjadi selama 1 jam pada model pemakaian di segmen perhotelan yang dijadikan sampel, maka kenaikan arus sebesar 5 ampere pada fasa R akan mengakibatkan energi yang hilang turun sebesar 1,69 *watthour*. Sementara itu, jika terjadi kenaikan arus sebesar 5 ampere pada fasa S, energi yang hilang akan meningkat sebesar 0,65 *watthour*, dan jika kenaikan arus terjadi pada fasa T sebesar 5 ampere, energi yang hilang akan naik sebesar 0,54 *watthour*.

3.2 Tabel Uji ANOVA

ANOVA berfungsi untuk menentukan sejauh mana variabel independen secara bersama-sama memengaruhi variabel dependen dalam sebuah penelitian. kita perlu menghitung nilai prediksi ($\hat{Y}$) dan rata-rata nilai aktual ($\bar{Y}$). Nilai prediksi didapatkan dengan menggantikan masing-masing nilai variabel independen ke dalam persamaan regresi. Perhitungan tabel anova dijelaskan pada tabel 6 dibawah ini :

Tabel 6 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

No	aktual (Y_i)	prediksi ($\hat{Y}$)	$(\hat{Y} - \bar{Y})^2$	$\Sigma(Y_i - \hat{Y})^2$
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

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 $\Sigma(\hat{Y} - \bar{Y})^2$ dibagi dengan $K - 1$. Dapat dihitung pada persamaan (9) sebagai berikut :

$$\text{Mean Square Regression} = \frac{\Sigma(\hat{Y} - \bar{Y})^2}{K - 1} = \frac{112,2694545}{3} = 37,4231515 \quad (10)$$

Untuk *Mean Square Error (MSE)* diperoleh dari jumlah kuadrat nilai aktual dikurangi nilai prediksi $\Sigma(Y_i - \hat{Y})^2$ dibagi dengan $n - K$. Jadi *MSE* diperhitungkan pada persamaan (10) sebagai berikut :

$$\text{Mean Square Error} = \frac{\Sigma(Y_i - \hat{Y})^2}{n - K} = \frac{70,05108852}{17} = 4,120652266 \quad (11)$$

Nilai F untuk menguji signifikansi model regresi dapat dikalkulasi dengan rumus $F = \frac{\text{Mean Square Regression}}{\text{Mean Square Error}}$ jadi nilai F akan diperoleh sebagai berikut $F = \frac{37,4231515}{4,120652266} = 9,081851388$.

Dengan begitu maka dapat disusun tabel *ANOVA* sebagai berikut :

Tabel 7 Tabel uji ANOVA data observasi

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

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

4. KESIMPULAN

Hasil analisis menunjukkan bahwa ketidakseimbangan beban pada gardu distribusi memiliki pengaruh yang signifikan terhadap besarnya energi yang hilang. Semakin besar perbedaan arus antar fasa, maka semakin tinggi pula jumlah energi yang terbuang. Berdasarkan model regresi berganda, diketahui bahwa peningkatan arus fasa R sebesar 5 ampere selama satu jam justru dapat menurunkan energi hilang sebesar 1,69 Wh. Sebaliknya, peningkatan arus pada fasa S dan T dengan besaran yang sama justru menyebabkan kenaikan energi hilang masing-masing sebesar 0,65 Wh dan 0,54 Wh. Dari model yang didapatkan besaran *R Square* adalah sebesar 61,58% yang berarti bahwa model mempunyai kemampuan untuk menjelaskan yang cukup baik, namun masih ada 38,42% variasi yang belum dapat dijelaskan oleh model ini. Mengingat pola konsumsi listrik pelanggan, khususnya di segmen perhotelan, sangat bergantung pada tingkat okupansi yang sulit dikendalikan, maka salah satu solusi yang efektif untuk meminimalkan rugi-rugi daya adalah dengan menerapkan sistem pemantauan dan pengendalian beban secara *real-time* berbasis *IoT* (*Internet of Things*). Pendekatan ini memungkinkan pendeteksian dan koreksi ketidakseimbangan beban sejak dini sebelum berdampak pada efisiensi distribusi energi.

REFERENSI

- [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 Transformator 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] T. Watiningsih, "Pengaruh Ketidakseimbangan Beban Terhadap Arus Netral Dan Losses Pada Trafo Distribusi," 2012.
- [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] H. L. Latupeirissa, "Pengaruh Ketidakseimbangan Beban Terhadap Arus Netral Dan Losses Daya Pada Trafo Distribusi Gardu Kp-01 Desa Hative Kecil," vol. 7, no. 2, 2017.
- [9] M. Dahlan, "Akibat Ketidakseimbangan Beban Terhadap Arus Netral Dan Losses Pada Transformator Distribusi," 2009.
- [10] A. Nugroho, "Analisis Pengaruh Ketidakseimbangan Beban Terhadap Arus Netral Dan Losses Pada Trafo Distribusi (Studi Kasus Pada Pt. Pln (Persero) Rayon Kartasura)," 2019.