(2025), 3 (4): 470-488 **Scientica** 3021-8209

Jurnal Ilmiah Sain dan Teknologi

OPTIMALISASI PELAKSANAAN PENYEIMBANGAN BEBAN GARDU DISTRIBUSI UNTUK MENEKAN *LOSSES* DI PT PLN (PERSERO) ULP SUKANAGARA

Reza Rizkifadhla
PT PLN (Persero) ULP Sukanagara UP3 Cianjur
Jl. Pahlawan no 7, Sukanagara, Kec, Sukanagara, Kab. Cianjur, Jawa Barat
reza.rizkifadhla@pln.co.id

Abstract (English)
Distribution substation load balancing is a crucial activity aimed at reducing technical losses in the distribution network. So far, the load balancing process has relied on measuring and balancing method without considering peak or off-peak loads. This study seeks to optimize load balancing implementation at distribution substations to reduce energy losses at PT PLN (Persero) ULP Sukanagara. This research will analyze and correct load imbalance more effectively.. The research findings indicate a gain of 645.79 kWh per month from balancing eight distribution substations. This study significantly contributes to improving the performance of the electricity distribution system and can serve as a reference for implementation in other regions.

Article History
Submitted: 23 Februari 2025
Accepted: 2 Maret 2025
Published: 3 Maret 20257

Key Words
Load balancing, technical losses, peak load, off-peak load, kWh gain

Abstrak (Indonesia)
Penyeimbangan beban gardu distribusi merupakan suatu kegiatan yang dilakukan untuk menekan susut teknis yang terjadi pada jaringan distribusi. Selama ini proses penyeimbangan beban gardu distribusi menggunakan metode ukur dan seimbang tanpa mempertimbangkan beban saat puncak atau di luar puncak. Penelitian ini bertujuan untuk mengoptimalkan implementasi penyeimbangan beban pada gardu distribusi guna mengurangi kerugian energi di PT PLN (Persero) ULP Sukanagara. Penelitian ini akan menganalisis dan mengoreksi ketidakseimbangan beban secara lebih efektif. Metode penyeimbangan beban pada penelitian ini dirancang untuk mempertimbangkan keadaan beban pada saat beban puncak malam hari dan beban luar beban puncak. Berdasarkan penelitian yang dilakukan terdapat keuntungan kWh sebesar 645.79 kWh per bulan dari pelaksanaan penyeimbangan 8 gardu distribusi. Studi ini memberikan kontribusi penting dalam upaya peningkatan kinerja sistem distribusi listrik dan dapat dijadikan acuan untuk implementasi di wilayah lain.

Sejarah Artikel
Submitted: 23 Februari 2025
Accepted: 2 Maret 2025
Published: 3 Maret 20257

Kata Kunci
Penyeimbangan beban, susut teknis, beban puncak, luar beban puncak, keuntungan kwh

I . PENDAHULUAN

Kebutuhan energi listrik akan selalu meningkat seiring perkembangan zaman. Penyaluran energi listrik dari pembangkit sampai ke konsumen tidak akan lepas dari adanya *losses*. Susut (*losses*) adalah sejumlah energi yang hilang dalam proses pengaliran energi listrik mulai dari Gardu Induk sampai dengan konsumen.[1]

Susut dibedakan menjadi susut teknis dan non teknis berdasarkan sifatnya. Susut teknis terjadi karena hilangnya energi menjadi panas pada saat penyaluran. Sedangkan susut non teknis terjadi akibat masalah yang berkaitan dengan pengukuran.

Pada triwulan I tahun 2024 susut di ULP Sukanagara mencapai 7,71% dengan kontribusi susut teknis sebesar 7,51% dan susut non teknis sebesar 0,2%. Susut teknis tersebut berdasarkan tempat terjadinya terbagi menjadi susut JTM sebesar 3.82%, gardu distribusi 1.09%, JTR 1.07% dan SR 1.53%.

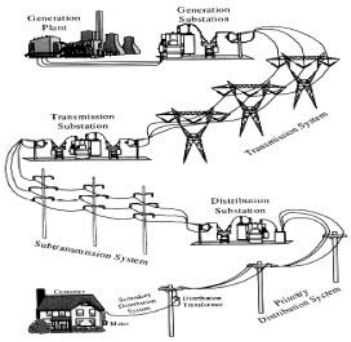
Penyeimbangan gardu distribusi merupakan kegiatan yang rutin dilakukan di PT PLN (Persero) ULP Sukanagara sebagai upaya untuk menekan susut. Penyeimbangan gardu distribusi dimulai dari pengukuran beban pada PHBTR untuk masing-masing phasa. Pembebanan masing-masing phasa diperhitungan dan dianalisis, apabila terdapat phasa yang tidak seimbang maka dilakukan pemindahan beban ke phasa yang lain. Dengan melakukan

penyeimbangan beban gardu distribusi akan berdampak pada pengurangan arus netral yang mengakibatkan *losses.*

Penyeimbangan beban yang dilakukan selama ini hanya mengacu pada satu kali pengukuran baik itu di siang hari maupun malam hari. Hal itu berakibat keseimbagan beban belum tentu bisa terjaga dalam rentang 24 jam. Pengaruhnya terhadap susut jaringan belum bisa dipastikan. Sebab itulah diperlukan pengukuran lebih dari satu kali untuk penyempurnaan penyeimbangan beban.

II . LANDASAN TEORI

A. Sistem Distribusi Tenaga Listrik



Gambar 2. 1 Sistem Pendistribusian Tenaga Listrik[2]

Sistem distribusi tenaga listrik merupakan bagian dari sistem tenaga listrik. Sistem distribusi dimulai dari PMT *incoming* di gardu induk sampai dengan alat pengukur dan pembatas (APP) di instalasi konsumen. Sistem distribusi berfungsi untuk mendistribusikan tenaga listrik dari gardu induk sebagai pusat beban ke pelanggan secara langsung atau melalui gardu distribusi dengan mutu yang memadai sesuai standar pelayanan yang berlaku. Sistem disribusi menjadi suatu sistem tersendiri karena unit distribusi ini mempunyai komponen peralatan peralatan yang saling berkaitan pengoperasiannya untuk penyaluran energi listrik.[3]
Dilihat dari tegangannya system distribusi dapat dibedakan menjadi dua macam yaitu:

a. *Distribusi Primer atau sering disebut Jaringan Tegangan Menengah (JTM) dengan tegangan operasi nominal 11.6 kV/20 kV*
b. *Distribusi Sekunder atau sering disebut Jaringan Tegangan Rendah (JTR) dengan tegangan operasi nominal 220V/380V*

B. Susut Energi

Susut *(losses)* adalah jumlah energi dalam kWh yang hilang atau menyusut terjadi karena sebab-sebab teknik maupun non teknik pada waktu penyediaan dan penyaluran energi.[1] Untuk mengetahui persentase susut dapat dihitung dengan formula berikut:

$$\frac{kWh\ Beli - kWh\ Jual}{kWh\ Beli}\ x\ 100 \ldots\ldots\ldots(2.1)$$

Dimana:
kWh Beli = Jumlah energi listrik yang tersedia
kWh jual = Penjualan energi
Susut berdasarkan sifatnya dibedakan menjadi dua jenis:

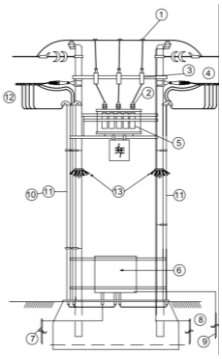
a. Susut teknis yaitu hilangnya energi listrik yang dibangkitkan pada saat disalurkan karena berubah terjadi energi panas. Susut teknis ini tidak dapat dihilangkan (fenomena alam).
b. Susut non teknis yaitu hilang energi listrik yang dikonsumsi pelanggan maupun non pelanggan karena tidak tercatat dalam penjualan.

Sedangkan berdasar tempat terjadinya susut dibedakan menjadi:

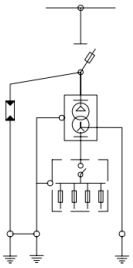
a. Susut Transmisi, yaitu hilangnya energi listrik yang dibangkitkan pada saat disalurkan melalui jaringan transmisi ke gardu induk. Meliputi susut pada Jaringan Tegangan Tinggi (JTT) dan pada Gardu Induk (GI).
b. Susut Distribusi, yaitu hilangnya energi listrik yang didistribusikan dari gardu induk melalui jaringan distribusi ke pelanggan. Meliputi susut pada Jaringan tegangan Menengah (JTM), Gardu Distribusi (GD), Jaringan Tegangan Rendah (JTR), Sambungan Rumah (SR) serta Alat Pengukur dan Pembatas (APP)

C. Gardu Distribusi

Pengertian umum Gardu Distribusi tenaga listrik adalah suatu bangunan gardu listrik berisi atau terdiri dari instalasi perlengkapan hubung bagi tegangan menengah (PHBTM), transformator distribusi (TD) dan perlengkapan hubung bagi tegangan rendah (PHBTR) untuk memasok kebutuhan tenaga listrik bagi para pelanggan baik dengan tegangan menengah (20kV) maupun tegangan rendah 220/380V)[4]



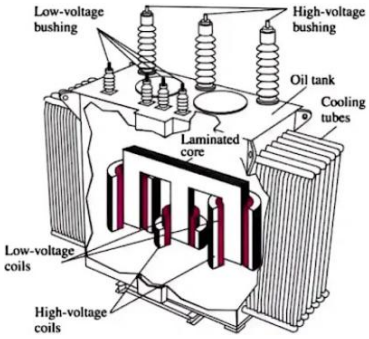
Gambar 2. 2 Monogram Konstruksi Gardu Portal[4]



Gambar 2. 3 Diagram satu garis gardu portal [4]

D. Transformator Distribusi

Trafo Distribusi pada sistem distribusi berfungsi untuk menurunkan tegangan dari 20kV ke 380V. Adapun bagian-bagiannya utamanya adalah:



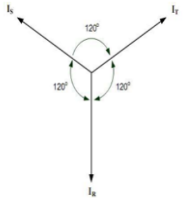
Gambar 2.4 Bagian-Bagian Transformator Distribusi[5]

a. Inti Besi
   Inti besi berfungsi untuk membangkitkan fluks yang timbul karena arus listrik dalam belitan trafo. Terbuat dai bahan lempengan baja tipis untuk mengurani panas akibat *eddy current.*
b. Kumparan Primer dan Kumparan Sekunder
   Apabila satu diantara kumparan primer maupun sekunder diberi tegangan maka akan timbul fluks pada kumparan tersebut serta menginduksi kumparan lainnya sehingga pada sisi lain kumparan akan timbul tegangan.
c. Minyak Trafo
   Minyak trafo berfungsi untuk pendingin untuk menghilangkan panas akibat rugi-rugi daya pada trafo.
d. Tangki
   Pada umumnya bagian-bagian transformator yang terendam minyak berada dalam tangka. Tangki dilengkapi dengan konservator untuk menampung pemuaian minyak transdormator.
e. Bushing
   Busing yaitu sebuah konduktor yang diselubingi oleh isolator yang berfungsi sebagai penyekat antara konduktor dengan tangka transformator. Hubungan antara kumparan transformator ke jaringan luar melalui sebuah *bushing*.
f. *Tap changer* trafo
   Tap changer adalah alat perubah pembanding transformasi yang bertujuan untuk mendapatkan tegangan operasi sekunder yang sesuai kebutuhan dari tegangan primer yang berubah ubah.

E. Ketidakseimbangan Beban Pada Transformator Distribusi

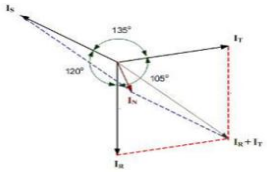
Yang dimaksud dengan keadaan seimbang adalah suatu keadaan di mana Ketiga vektor arus / tegangan sama besar. Ketiga vektor saling membentuk sudut 120º satu sama lain. Sedangkan yang dimaksud dengan keadaan tidakseimbang adalah keadaan di mana salah satu atau kedua syarat keadaan seimbang tidak terpenuhi. Kemungkinan keadaan tidak seimbang ada 3 yaitu:

a. Ketiga vektor sama besar tetapi tidak membentuk sudut 120º satu sama lain.
b. Ketiga vektor tidak sama besar tetapi membentuk sudut 120º satu sama lain.
c. Ketiga vektor tidak sama besar dan tidak membentuk sudut 120º satu sama lain



Gambar 2. 5 Vektor Beban Seimbang [6]

Gambar 2.5 menunjukkan vektor diagram arus dalam keadaan seimbang. Di sini terlihat bahwa penjumlahan ketiga vektor arusnya (IR, IS, IT) adalah sama dengan nol sehingga tidak muncul arus netral (IN)

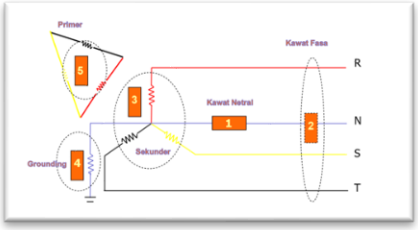


Gambar 2. 6 Vektor Beban Tidak Seimbang [6]

Sedangkan pada Gambar 2.6 menunjukkan vektor diagram arus yang tidak seimbang. Di sini terlihat bahwa penjumlahan ketiga vektor arusnya (IR, IS, IT) tidak sama dengan nol

sehingga muncul sebuah besaran yaitu arus netral (IN) yang besarnya bergantung dari seberapa besar faktor ketidak seimbangannya

F. Lokasi *Losses*



Gambar 2. 7 Lokasi Susut pada Gardu Distribusi

Losses atau rugi-rugi terjadi apabila terdapat aliran arus dari tiap-tiap fasa pada sisi sekunder trafo dengan netral trafo. Hal ini disebabkan oleh adanya ketidakseimbangan beban antara tiap-tiap fasa tersebut. Apabila hal ini tidak segera ditangani, maka bisa berakibat kerugian secara finansial maupun secara produksi listrik itu sendiri

Besarnya rugi-rugi atau *losses* dianalogikan sebagai besarnya daya yang hilang akibat dari berbagai hal, salah satunya karena ketidakseimbangan beban. Persamaan 2 menunjukkan rumus untuk mencari besarnya rugi-rugi daya yang hilang pada penghantar netral trafo (Gambar 2.6 *point* 1).

$$PN = I_N^2 \times R_N \quad \text{.....(2.2)}$$

dengan:
PN: Rugi-rugi daya atau *losses* pada penghantar netral (Watt)
IN: Arus pada penghantar netral (A)
RN: Tahanan pada penghantar netral (Ω)

Losses yang lain yang terjadi adalah adanya aliran arus pada kawat phasa. Persamaan 3 digunakan untuk menghitung besarnya rugi-rugi daya pada kawat phasa (Gambar 2.11 point 2).

$$P_{ph} = I_{ph}^2 \times R_{ph} \quad \text{.....(2.3)}$$

dengan:
Pph: Rugi-rugi daya atau *losses* terhadap phasa (Watt)
Iɢ: Arus netral yang mengalir ke phasa (A)
Rɢ: Tahanan pada kawat phasa (Ω)

Oleh karena adanya *losses* inilah beban pada trafo distribusi perlu diseimbangkan. Penyeimbangan diperlukan dengan data yang efektif dan tidak hanya berpatok pada satu kali pengukuran.

III. METODE PENELITIAN

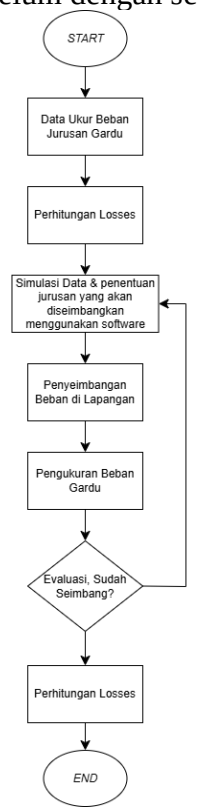
A. Metode Penelitian

Desain penelitian yang digunakan dalam penelitian ini adalah penelitian eksperimen. Metode penelitian eksperimen adalah pendekatan sistematik yang digunakan dalam ilmu pengetahuan untuk menguji hubungan sebab-akibat antara variabel-variabel tertentu. Tujuan dari eksperimen ini adalah untuk menentukan apakah perubahan dalam variabel independen menyebabkan perubahan dalam variabel dependen, serta untuk mengukur seberapa besar pengaruhnya.

B. Diagram Alir Penelitian

Dalam menyelesaikan laporan penelitian tugas akhir ini, tentu harus mengikuti langkah-langkah yang terstruktur dan sistematis agar penelitian ini dapat dikerjakan secara efektif dan efisien. Sistematika pelaksanaan dari tahap persiapan dijelaskan dalam bagan alir yang dijelaskan sebagai berikut:

1) Data yang dibutuhkan:
a) Data trafo gardu distribusi
b) Data ukur beban untuk masing-masing jurusan
c) Data pelanggan
2) Analisa Awal
a) Analisa arus per phasa dan ketidakseimbangan
b) Perhitungan *losses*
3) Mekanisme Penyeimbangan
a) Simulasi data dan penentuan jurusan yang akan diseimbangkan menggunakan *software*
b) Pelaksanaan penyeimbangan di lapangan
c) Pengukuran beban akhir
4) Hasil Penyeimbangan
a) Evaluasi dari pengukuran beban akhir
b) Perhitungan *losses* ketidakseimbangan beban
c) Perbandingan data *losses* antara sebelum dengan sesudah penyeimbangan untuk evaluasi



Gambar 3. 1 Flowchart Penelitian

A. Pengumpulan Data

Berikut merupakan sampel data gardu yang tidak seimbang di ULP Sukanagara pada bulan Oktober 2024:

Tabel 3. 1 Sampel gardu tidak seimbang di PT PLN (Persero) ULP Sukanagara

NO	GARDU	JURUSAN	PERSENTASEKETIDAK-SEIMBANGAN
1	BGL	1	42,04%
2	BNRA	3	41,19%
3	CDPA	1	27,56%
4	CGR	3	32,79%
5	CIRA	1	2,33%

6	CMAG	1	40,09%
7	GIR	3	35,70%
8	KWG	1	40,09%

Dari tabel di atas terdapat sampel gardu yang perlu diseimbangkan pembebanannya. Beban yang tidak seimbang menimbulkan arus netral dan menyebabkan kerugian *losses* di PLN

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Data Jaringan

Tabel 4. 1 Kapasitas Trafo Gardu Distribusi yang akan diseimbangkan

Nama Gardu	Kapasitas (kVA)
BGL	50
BNRA	100
CDPA	50
CGR	100
CIRA	100
CMAG	50
GIR	100
KWG	100

Tabel 4. 2 Data Jaringan Jurusan Gardu Distribusi di ULP Sukanagara

JURUSAN	PENGHANTAR		
	JENIS	PENAM-PANG (mm^2)	KHA (Amp)
1	LVTC	70	185
2	LVTC	70	185
3	LVTC	70	185
4	LVTC	70	185
DATA PENGHANTAR			
Resistansi Fasa		0.443	Ω /km (pada suhu 20°C)
Resistansi Netral		0.581	Ω /km (pada suhu 20°C)
Resistansi Grounding		1.6	Ω
Panjang Penghantar		500	m

B. **Pengukuran Beban Gardu Sebelum Penyeimbangan Beban**

Pengukuran Beban pada Jurusan di gardu distribusi dilakukan dua kali yaitu pada siang hari dan pada malam hari.

Tabel 4. 3 Pengukuran Beban Gardu Pada Siang Hari Sebelum Penyeimbangan Beban

NO	NAMA GARDU	JURUSAN	ARUS R	ARUS S	ARUS T	ARUS N	KETIDAKSEIMBANGAN
1	BGL	1	14.7 A	33.1 A	13.1 A	20.7 A	42,04%
2	BNRA	3	15.1 A	5.9 A	7 A	10.5 A	41,19%
3	CDPA	1	29.9 A	20.5 A	44.9 A	21.6 A	27,56%
4	CGR	3	10.6 A	27.3 A	17 A	21.8 A	32,79%
5	CIRA	1	35.5 A	33.2 A	34.5 A	11.8 A	2,33%
6	CMAG	1	24.1 A	7.8 A	26.8 A	13.6 A	40,09%
7	GIR	3	10.5 A	15.7 A	4.8 A	7.5 A	35,70%
8	KWG	1	15.2 A	24.1 A	45 A	21.7 A	40,09%

Tabel 4. 4 Pengukuran Beban Gardu Pada Malam Hari Sebelum Penyeimbangan Beban

NO	NAMA GARDU	JURUSAN	ARUS R	ARUS S	ARUS T	ARUS N	PERSENTASE KETIDAKSEIMBANGAN
1	BGL	1	16 A	30 A	15 A	17 A	31,69%
2	BNRA	3	21 A	3 A	25 A	9 A	54,42%
3	CDPA	1	33 A	19 A	35 A	18 A	22,99%
4	CGR	3	10 A	33 A	20 A	30 A	38,10%
5	CIRA	1	26 A	31 A	44 A	20 A	20,46%
6	CMAG	1	50 A	11 A	35 A	19 A	43,75%
7	GIR	3	15 A	22 A	8 A	17 A	31,11%
8	KWG	1	19 A	48 A	57 A	39 A	36,02%

C. **Perhitungan *Losses* Gardu Sebelum Penyeimbangan Beban**

Tabel 4. 5 Perhitungan Susut Gardu BGL Sebelum Diseimbangkan

NAMA GARDU			BGL			
Jurusan	Pengukuran	PHASA	I (A)	R (Ω /km)	Panjang jaringan (m)	I^2R (kWh)
1	SIANG	R	14.7	0.443	500	0.04786394
		S	33.1	0.443	500	0.24267762
		T	13.1	0.443	500	0.03801162
		N	20.7	0.581	500	0.12447635
		Susut Siang Hari				0.45302951
	MALAM	R	16	0.443	500	0.056704
		S	30	0.443	500	0.19935
		T	15	0.443	500	0.0498375
		N	17	0.581	500	0.0839545
		Susut Malam Hari				0.389846
Total Susut Siang Hari = 12 Jam Nyala x Susut Siang Hari						5.43635412
Total Susut Malam Hari = 12 Jam Nyala x Susut Malam Hari						4.678152
Total Susut Satu Hari = Susut siang + malam hari						10.1145061

Total Susut Satu Bulan = Total susut satu hari x 30 hari	303.435184

Tabel 4. 6 Perhitungan Susut Gardu BNRA Sebelum Diseimbangkan

NAMA GARDU			BNRA			
Jurusan	Pengukuran	PHASA	I (A)	R (Ω /km)	Panjang jaringan (m)	I^2R (kWh)
3	SIANG	R	15.1	0.443	500	0.05050422
		S	5.9	0.443	500	0.00771042
		T	7	0.443	500	0.0108535
		N	10.5	0.581	500	0.03202763
		Susut Siang Hari				0.10109576
	MALAM	R	21	0.443	500	0.0976815
		S	3	0.443	500	0.0019935
		T	25	0.443	500	0.1384375
		N	9	0.581	500	0.0235305
		Susut Malam Hari				0.261643
Total Susut Siang Hari = 12 Jam Nyala x Susut Siang Hari						1.21314906
Total Susut Malam Hari = 12 Jam Nyala x Susut Malam Hari						3.139716
Total Susut Satu Hari = Susut siang + malam hari						4.35286506
Total Susut Satu Bulan = Total susut satu hari x 30 hari						130.585952

Tabel 4. 7 Perhitungan Susut Gardu CGR Sebelum Diseimbangkan

NAMA GARDU			CGR			
Jurusan	Pengukuran	PHASA	I (A)	R (Ω /km)	Panjang jaringan (m)	I^2R (kWh)
3	SIANG	R	10.63	0.443	500	0.02502881
		S	27.26	0.443	500	0.16459833
		T	17	0.443	500	0.0640135
		N	21.82	0.581	500	0.13831065
		Susut Siang Hari				0.3919513
	MALAM	R	10	0.443	500	0.02215
		S	33	0.443	500	0.2412135
		T	20	0.443	500	0.0886
		N	30	0.581	500	0.26145
		Susut Malam Hari				0.6134135
Total Susut Siang Hari = 12 Jam Nyala x Susut Siang Hari						4.70341559
Total Susut Malam Hari = 12 Jam Nyala x Susut Malam Hari						7.360962
Total Susut Satu Hari = Susut siang + malam hari						12.0643776
Total Susut Satu Bulan = Total susut satu hari x 30 hari						361.931328

Tabel 4. 8 Perhitungan Susut Gardu CIRA Sebelum Diseimbangkan

NAMA GARDU			CIRA			
Jurusan	Pengukuran	PHASA	I (A)	R (Ω /km)	Panjang jaringan (m)	I^2R (kWh)
1	SIANG	R	35.5	0.443	500	0.27914538
		S	33.2	0.443	500	0.24414616
		T	34.5	0.443	500	0.26364038
		N	11.8	0.581	500	0.04044922
		Susut Siang Hari				0.82738113
	MALAM	R	26	0.443	500	0.149734
		S	31	0.443	500	0.2128615
		T	44	0.443	500	0.428824
		N	20	0.581	500	0.1162
		Susut Malam Hari				0.9076195
Total Susut Siang Hari = 12 Jam Nyala x Susut Siang Hari						9.92857356
Total Susut Malam Hari = 12 Jam Nyala x Susut Malam Hari						10.891434
Total Susut Satu Hari = Susut siang + malam hari						20.8200076
Total Susut Satu Bulan = Total susut satu hari x 30 hari						624.600227

Tabel 4. 9 Perhitungan Susut Gardu CMAG Sebelum Diseimbangkan

NAMA GARDU			CMAG			
Jurusan	Pengukuran	PHASA	I (A)	R (Ω /km)	Panjang jaringan (m)	I^2R (kWh)
1	SIANG	R	24.1	0.443	500	0.12864942
		S	7.8	0.443	500	0.01347606
		T	26.8	0.443	500	0.15909016
		N	13.6	0.581	500	0.05373088
		Susut Siang Hari				0.35494652
	MALAM	R	50	0.443	500	0.55375
		S	11	0.443	500	0.0268015
		T	35	0.443	500	0.2713375
		N	19	0.581	500	0.1048705
		Susut Malam Hari				0.9567595
Total Susut Siang Hari = 12 Jam Nyala x Susut Siang Hari						4.25935818
Total Susut Malam Hari = 12 Jam Nyala x Susut Malam Hari						11.481114
Total Susut Satu Hari = Susut siang + malam hari						15.7404722
Total Susut Satu Bulan = Total susut satu hari x 30 hari						472.214165

Tabel 4. 10 Perhitungan Susut Gardu GIR Sebelum Diseimbangkan

NAMA GARDU			GIR			
Jurusan	Pengukuran	PHASA	I (A)	R (Ω /km)	Panjang jaringan (m)	I^2R (kWh)
3	SIANG	R	10.5	0.443	500	0.02442038
		S	15.7	0.443	500	0.05459754
		T	4.8	0.443	500	0.00510336

		N	7.5	0.581	500	0.01634063
		Susut Siang Hari				0.1004619
	MALAM	R	15	0.443	500	0.0498375
		S	22	0.443	500	0.107206
		T	8	0.443	500	0.014176
		N	17	0.581	500	0.0839545
		Susut Malam Hari				0.255174
Total Susut Siang Hari = 12 Jam Nyala x Susut Siang Hari						1.20554274
Total Susut Malam Hari = 12 Jam Nyala x Susut Malam Hari						3.062088
Total Susut Satu Hari = Susut siang + malam hari						4.26763074
Total Susut Satu Bulan = Total susut satu hari x 30 hari						128.028922

Tabel 4. 11 Perhitungan Susut Gardu KWG Sebelum Diseimbangkan

NAMA GARDU			KWG			
Jurusan	Pengukuran	PHASA	I (A)	R (Ω /km)	Panjang jaringan (m)	I^2R (kWh)
1	SIANG	R	15.2	0.443	500	0.05117536
		S	24.1	0.443	500	0.12864942
		T	45	0.443	500	0.4485375
		N	21.7	0.581	500	0.13679355
		Susut Siang Hari				0.76515582
	MALAM	R	19	0.443	500	0.0799615
		S	48	0.443	500	0.510336
		T	57	0.443	500	0.7196535
		N	39	0.581	500	0.4418505
		Susut Malam Hari				1.7518015
Total Susut Siang Hari = 12 Jam Nyala x Susut Siang Hari						9.18186984
Total Susut Malam Hari = 12 Jam Nyala x Susut Malam Hari						21.021618
Total Susut Satu Hari = Susut siang + malam hari						30.2034878
Total Susut Satu Bulan = Total susut satu hari x 30 hari						906.104635

D. **Penentuan Phasa yang akan diseimbangkan per Gardu**

Tabel 4. 12 Rencana Penyeimbangan Gardu BGL

Nama Gardu		BGL	
Rata - rata WBP	20,30		
Rata - rata LWBP	20,30		
Ratio	1,42		
	R	S	T
I WBP	16,00	30,00	15,00
I LWBP	14,70	33,10	13,10
Eksekusi	**3,03**	**-6,83**	**3,73**
I Prediksi WBP	20,30	20,30	20,30
I Prediksi LWBP	17,73	26,27	16,83
Ratio =	Rata - rata WBP/ Rata - rata LWBP (1.42<R<188)		

Eksekusi =	(Rata - rata WBP - I WBP)/Ratio
I Prediksi WBP =	(Eksekusi X Ratio) + I WBP
I Prediksi LWBP =	I LWBP + Eksekusi

Tabel 4. 13 Rencana Penyeimbangan Gardu BNRA

Nama Gardu		BNRA	
Rata - rata WBP	16,30		
Rata - rata LWBP	9,40		
Ratio	1,73		
	R	S	T
I WBP	21,00	3,00	25,00
I LWBP	15,13	5,92	7,00
Eksekusi	**-2,71**	**7,67**	**-5,02**
I Prediksi WBP	16,30	16,30	16,30
I Prediksi LWBP	12,42	13,59	1,98
Ratio =	Rata - rata WBP/ Rata - rata LWBP (1.42<R<188)		
Eksekusi =	(Rata - rata WBP - I WBP)/Ratio		
I Prediksi WBP =	(Eksekusi X Ratio) + I WBP		
I Prediksi LWBP =	I LWBP + Eksekusi		

Tabel 4. 14 Rencana Penyeimbangan Gardu CDPA

Nama Gardu		CDPA	
Rata - rata WBP	29,00		
Rata - rata LWBP	31,80		
Ratio	1,42		
	R	S	T
I WBP	33,00	19,00	35,00
I LWBP	29,90	20,5	44,90
Eksekusi	**-2,82**	**7,04**	**-4,23**
I Prediksi WBP	29,00	29,00	29,00
I Prediksi LWBP	27,08	27,54	40,67
Ratio =	Rata - rata WBP/ Rata - rata LWBP (1.42<R<188)		
Eksekusi =	(Rata - rata WBP - I WBP)/Ratio		
I Prediksi WBP =	(Eksekusi X Ratio) + I WBP		
I Prediksi LWBP =	I LWBP + Eksekusi		

Tabel 4. 15 Rencana Penyeimbangan Gardu CGR

Nama Gardu		CGR	
Rata - rata WBP	21,00		
Rata - rata LWBP	18,30		
Ratio	1,42		
	R	S	T
I WBP	10,00	33,00	20,00
I LWBP	10,60	27,3	17,00
Eksekusi	**7,75**	**-8,45**	**0,70**
I Prediksi WBP	21,00	21,00	21,00

I Prediksi LWBP	18,35	18,85	17,70
Ratio =	Rata - rata WBP/ Rata - rata LWBP (1.42<R<188)		
Eksekusi =	(Rata - rata WBP - I WBP)/Ratio		
I Prediksi WBP =	(Eksekusi X Ratio) + I WBP		
I Prediksi LWBP =	I LWBP + Eksekusi		

Tabel 4. 16 Rencana Penyeimbangan Gardu CIRA

Nama Gardu		CIRA	
Rata - rata WBP	33,70		
Rata - rata LWBP	34,40		
Ratio	1,42		
	R	S	T
I WBP	26,00	31,00	44,00
I LWBP	35,50	33,2	34,50
Eksekusi	**5,42**	**1,90**	**-7,25**
I Prediksi WBP	33,70	33,70	33,70
I Prediksi LWBP	40,92	35,10	27,25
Ratio =	Rata - rata WBP/ Rata - rata LWBP (1.42<R<188)		
Eksekusi =	(Rata - rata WBP - I WBP)/Ratio		
I Prediksi WBP =	(Eksekusi X Ratio) + I WBP		
I Prediksi LWBP =	I LWBP + Eksekusi		

Tabel 4. 17 Rencana Penyeimbangan Gardu CMAG

Nama Gardu		CMAG	
Rata - rata WBP	32,00		
Rata - rata LWBP	19,60		
Ratio	1,63		
	R	S	T
I WBP	50,00	11,00	35,00
I LWBP	24,10	7,8	26,80
Eksekusi	**-11,03**	**12,86**	**-1,84**
I Prediksi WBP	32,00	32,00	32,00
I Prediksi LWBP	13,08	20,66	24,96
Ratio =	Rata - rata WBP/ Rata - rata LWBP (1.42<R<188)		
Eksekusi =	(Rata - rata WBP - I WBP)/Ratio		
I Prediksi WBP =	(Eksekusi X Ratio) + I WBP		
I Prediksi LWBP =	I LWBP + Eksekusi		

Tabel 4. 18 Rencana Penyeimbangan Gardu GIR

Nama Gardu		GIR	
Rata - rata WBP	15,00		
Rata - rata LWBP	10,40		
Ratio	1,44		
	R	S	T
I WBP	15,00	22,00	8,00
I LWBP	10,50	15,7	4,80

Eksekusi	**0,00**	**-4,85**	**4,85**
I Prediksi WBP	15,00	15,00	15,00
I Prediksi LWBP	10,50	10,85	9,65
Ratio =	Rata - rata WBP/ Rata - rata LWBP (1.42<R<188)		
Eksekusi =	(Rata - rata WBP - I WBP)/Ratio		
I Prediksi WBP =	(Eksekusi X Ratio) + I WBP		
I Prediksi LWBP =	I LWBP + Eksekusi		

Tabel 4. 19 Rencana Penyeimbangan Gardu KWG

Nama Gardu		KWG	
Rata - rata WBP	41,30		
Rata - rata LWBP	28,10		
Ratio	1,47		
	R	S	T
I WBP	19,00	48,00	57,00
I LWBP	15,20	24,1	45,00
Eksekusi	**15,17**	**-4,56**	**-10,68**
I Prediksi WBP	41,30	41,30	41,30
I Prediksi LWBP	30,37	19,54	34,32
Ratio =	Rata - rata WBP/ Rata - rata LWBP (1.42<R<188)		
Eksekusi =	(Rata - rata WBP - I WBP)/Ratio		
I Prediksi WBP =	(Eksekusi X Ratio) + I WBP		
I Prediksi LWBP =	I LWBP + Eksekusi		

E. Pengukuran Beban Gardu Setelah Penyeimbangan Beban

Tabel 4. 20 Pengukuran Beban Gardu Pada Siang Hari Setelah Penyeimbangan Beban

NO	NAMA GARDU	JURUSAN	ARUS R	ARUS S	ARUS T	ARUS N	PERSENTASE KETIDAKSEIMBANGAN
1	BGL	1	20,4 A	21,7 A	20,4 A	18,9 A	2,8%
2	BNRA	3	10,2 A	9,8 A	9,8 A	5,7 A	1,8%
3	CDPA	1	31,3 A	30,5 A	32,8 A	13,4 A	2,7%
4	CGR	3	15,6 A	15,1 A	14 A	18,4 A	4,0%
5	CIRA	1	34,5 A	34,2 A	34,5 A	10,9 A	0,4%
6	CMAG	1	20,6 A	18,1 A	19 A	9,5 A	4,7%
7	GIR	3	9,5 A	10,6 A	9,2 A	6,5 A	5,7%
8	KWG	1	28,3 A	28,2 A	28,6 A	19 A	0,5%

Tabel 4. 21 Pengukuran Beban Gardu Pada Malam Hari Setelah Penyeimbangan Beban

NO	NAMA GARDU	JURUSAN	ARUS R	ARUS S	ARUS T	ARUS N	PERSENTASE KETIDAKSEIMBANGAN
1	BGL	1	18,28 A	24,45 A	17,97 A	14,72 A	13,9%
2	BNRA	3	23,55 A	16,25 A	19,57 A	11,56 A	12,7%
3	CDPA	1	33,79 A	28,22 A	30,2 A	14,2 A	6,6%
4	CGR	3	17 A	21,1 A	20,2 A	16,7 A	8,3%
5	CIRA	1	25,4 A	19,2 A	43,4 A	22,3 A	32,0%
6	CMAG	1	31,3 A	30,2 A	32,4 A	12,3 A	2,3%

7	GIR	3	13,4 A	15,6 A	18,4 A	13,2 A	11,0%
8	KWG	1	16,5 A	42,5 A	45,5 A	35,7 A	35,1%

F. **Efektifitas Penyeimbangan Beban Gardu**

Tabel 4. 22 Efektifitas Penyeimbangan Gardu

PENGUKURAN	NAMA GARDU	JURUSAN	PERSENTASE KETIDAK-SEIMBANGAN SEBELUM	PERSENTASE KETIDAK-SEIMBANGAN SESUDAH	EVALUASI EFEKTIFITAS
SIANG	BGL	1	42,04%	2,8%	EFEKTIF
	BNRA	3	41,19%	1,8%	EFEKTIF
	CDPA	1	27,56%	2,7%	EFEKTIF
	CGR	3	32,79%	4,0%	EFEKTIF
	CIRA	1	2,33%	0,4%	EFEKTIF
	CMAG	1	40,09%	4,7%	EFEKTIF
	GIR	3	35,70%	5,7%	EFEKTIF
	KWG	1	40,09%	0,5%	EFEKTIF
MALAM	BGL	1	31,69%	13,9%	EFEKTIF
	BNRA	3	54,42%	12,7%	EFEKTIF
	CDPA	1	22,99%	6,6%	EFEKTIF
	CGR	3	38,10%	8,3%	EFEKTIF
	CIRA	1	20,46%	32,0%	TIDAK EFEKTIF
	CMAG	1	43,75%	2,3%	EFEKTIF
	GIR	3	31,11%	11,0%	EFEKTIF
	KWG	1	36,02%	35,1%	TIDAK EFEKTIF

G. **Perhitungan *Losses* Gardu Setelah Penyeimbangan Beban**

Tabel 4. 23 Perhitungan Susut Gardu BGL Setelah Diseimbangkan

NAMA GARDU			BGL			
Jurusan	Pengukuran	PHASA	I (A)	R (Ω /km)	Panjang jaringan (m)	I^2R (kWh)
1	SIANG	R	20,4	0,443	500	0,09217944
		S	21,7	0,443	500	0,10430214
		T	20,4	0,443	500	0,09217944
		N	18,9	0,581	500	0,10376951
		Susut Siang Hari				0,39243052
	MALAM	R	18,28	0,443	500	0,07401609
		S	24,45	0,443	500	0,13241325
		T	17,97	0,443	500	0,07152698
		N	14,72	0,581	500	0,06294508
		Susut Malam Hari				0,34090139
Total Susut Siang Hari = 12 Jam Nyala x Susut Siang Hari						4,70916624
Total Susut Malam Hari = 12 Jam Nyala x Susut Malam Hari						4,09081673

Total Susut Satu Hari = Susut siang + malam hari	8,79998297
Total Susut Satu Bulan = Total susut satu hari x 30 hari	263,999489

Tabel 4. 24 Perhitungan Susut Gardu BNRA Setelah Diseimbangkan

NAMA GARDU			BNRA			
Jurusan	Pengukuran	PHASA	I (A)	R (Ω /km)	Panjang jaringan (m)	I^2R (kWh)
3	SIANG	R	10,2	0,443	500	0,02304486
		S	9,8	0,443	500	0,02127286
		T	9,8	0,443	500	0,02127286
		N	5,7	0,581	500	0,00943835
		Susut Siang Hari				0,07502893
	MALAM	R	23,55	0,443	500	0,12284445
		S	16,25	0,443	500	0,05848984
		T	19,57	0,443	500	0,08483116
		N	11,56	0,581	500	0,03882056
		Susut Malam Hari				0,30498601
Total Susut Siang Hari = 12 Jam Nyala x Susut Siang Hari						0,9003471
Total Susut Malam Hari = 12 Jam Nyala x Susut Malam Hari						3,65983216
Total Susut Satu Hari = Susut siang + malam hari						4,56017926
Total Susut Satu Bulan = Total susut satu hari x 30 hari						136,805378

Tabel 4. 25 Perhitungan Susut Gardu CDPA Setelah Diseimbangkan

NAMA GARDU			CDPA			
Jurusan	Pengukuran	PHASA	I (A)	R (Ω /km)	Panjang jaringan (m)	I^2R (kWh)
1	SIANG	R	31,3	0,443	500	0,21700134
		S	30,5	0,443	500	0,20605038
		T	32,8	0,443	500	0,23829856
		N	13,4	0,581	500	0,05216218
		Susut Siang Hari				0,71351245
	MALAM	R	33,79	0,443	500	0,25290075
		S	28,22	0,443	500	0,1763956
		T	30,2	0,443	500	0,20201686
		N	14,2	0,581	500	0,05857642
		Susut Malam Hari				0,68988963
Total Susut Siang Hari = 12 Jam Nyala x Susut Siang Hari						8,5621494
Total Susut Malam Hari = 12 Jam Nyala x Susut Malam Hari						8,27867555
Total Susut Satu Hari = Susut siang + malam hari						16,8408249
Total Susut Satu Bulan = Total susut satu hari x 30 hari						505,224748

Tabel 4. 26 Perhitungan Susut Gardu CGR Setelah Diseimbangkan

NAMA GARDU			CGR			
Jurusan	Pengukuran	PHASA	I (A)	R (Ω /km)	Panjang jaringan (m)	I^2R (kWh)

3	SIANG	R	15,6	0,443	500	0,05390424
		S	15,1	0,443	500	0,05050422
		T	14	0,443	500	0,043414
		N	18,4	0,581	500	0,09835168
		Susut Siang Hari				0,24617414
	MALAM	R	17	0,443	500	0,0640135
		S	21,1	0,443	500	0,09861402
		T	20,2	0,443	500	0,09038086
		N	16,7	0,581	500	0,08101755
		Susut Malam Hari				0,33402592
Total Susut Siang Hari = 12 Jam Nyala x Susut Siang Hari						2,95408962
Total Susut Malam Hari = 12 Jam Nyala x Susut Malam Hari						4,00831104
Total Susut Satu Hari = Susut siang + malam hari						6,96240066
Total Susut Satu Bulan = Total susut satu hari x 30 hari						208,87202

Tabel 4. 27 Perhitungan Susut Gardu CIRA Setelah Diseimbangkan

NAMA GARDU			CIRA			
Jurusan	Pengukuran	PHASA	I (A)	R (Ω /km)	Panjang jaringan (m)	I^2R (kWh)
1	SIANG	R	34,5	0,443	500	0,26364038
		S	34,2	0,443	500	0,25907526
		T	34,5	0,443	500	0,26364038
		N	10,9	0,581	500	0,03451431
		Susut Siang Hari				0,82087032
	MALAM	R	25,4	0,443	500	0,14290294
		S	19,2	0,443	500	0,08165376
		T	43,4	0,443	500	0,41720854
		N	22,3	0,581	500	0,14446275
		Susut Malam Hari				0,78622799
Total Susut Siang Hari = 12 Jam Nyala x Susut Siang Hari						9,85044378
Total Susut Malam Hari = 12 Jam Nyala x Susut Malam Hari						9,43473582
Total Susut Satu Hari = Susut siang + malam hari						19,2851796
Total Susut Satu Bulan = Total susut satu hari x 30 hari						578,555388

Tabel 4. 28 Perhitungan Susut Gardu CMAG Setelah Diseimbangkan

NAMA GARDU			CMAG			
Jurusan	Pengukuran	PHASA	I (A)	R (Ω /km)	Panjang jaringan (m)	I^2R (kWh)
1	SIANG	R	20,6	0,443	500	0,09399574
		S	18,1	0,443	500	0,07256562
		T	19	0,443	500	0,0799615
		N	9,5	0,581	500	0,02621763
		Susut Siang Hari				0,27274048
	MALAM	R	31,3	0,443	500	0,21700134

		S	30,2	0,443	500	0,20201686
		T	32,4	0,443	500	0,23252184
		N	12,3	0,581	500	0,04394975
		Susut Malam Hari				0,69548978
Total Susut Siang Hari = 12 Jam Nyala x Susut Siang Hari						3,27288576
Total Susut Malam Hari = 12 Jam Nyala x Susut Malam Hari						8,34587736
Total Susut Satu Hari = Susut siang + malam hari						11,6187631
Total Susut Satu Bulan = Total susut satu hari x 30 hari						348,562894

Tabel 4. 29 Perhitungan Susut Gardu GIR Setelah Diseimbangkan

NAMA GARDU			GIR			
Jurusan	Pengukuran	PHASA	I (A)	R (Ω /km)	Panjang jaringan (m)	I^2R (kWh)
3	SIANG	R	9,5	0,443	500	0,01999038
		S	10,6	0,443	500	0,02488774
		T	9,2	0,443	500	0,01874776
		N	6,5	0,581	500	0,01227363
		Susut Siang Hari				0,0758995
	MALAM	R	13,4	0,443	500	0,03977254
		S	15,6	0,443	500	0,05390424
		T	18,4	0,443	500	0,07499104
		N	13,2	0,581	500	0,05061672
		Susut Malam Hari				0,21928454
Total Susut Siang Hari = 12 Jam Nyala x Susut Siang Hari						0,910794
Total Susut Malam Hari = 12 Jam Nyala x Susut Malam Hari						2,63141448
Total Susut Satu Hari = Susut siang + malam hari						3,54220848
Total Susut Satu Bulan = Total susut satu hari x 30 hari						106,266254

Tabel 4. 30 Perhitungan Susut Gardu KWG Setelah Diseimbangkan

NAMA GARDU			KWG			
Jurusan	Pengukuran	PHASA	I (A)	R (Ω /km)	Panjang jaringan (m)	I^2R (kWh)
1	SIANG	R	28,3	0,443	500	0,17739714
		S	28,2	0,443	500	0,17614566
		T	28,6	0,443	500	0,18117814
		N	19	0,581	500	0,1048705
		Susut Siang Hari				0,63959144
	MALAM	R	16,5	0,443	500	0,06030338
		S	42,5	0,443	500	0,40008438
		T	45,5	0,443	500	0,45856038
		N	35,7	0,581	500	0,37023935
		Susut Malam Hari				1,28918747
Total Susut Siang Hari = 12 Jam Nyala x Susut Siang Hari						7,67509722
Total Susut Malam Hari = 12 Jam Nyala x Susut Malam Hari						15,4702496
Total Susut Satu Hari = Susut siang + malam hari						23,1453469

Total Susut Satu Bulan = Total susut satu hari x 30 hari	694,360406

H. **Perolehan kWh Sebelum dibandingkan Setelah Penyeimbangan Beban**

Tabel 4. 31 Perolehan kWh Sebelum dibandingkan Setelah Penyeimbangan Beban

Gardu	Total Susut Satu Hari Sebelum (kWh)	Total Susut Satu Hari Sesudah (kWh)	Keuntungan Susut Satu Hari (kWh)	Persentase Keuntungan	Keuntungan Susut Satu Bulan (kWh)
	a	b	a-b	(a-b)/a	(a-b) x 30
BGL	10,11	8,80	1,31	13%	39,44
BNRA	4,35	4,56	-0,21	-5%	-6,22
CDPA	18,72	16,84	1,88	10%	56,31
CGR	12,06	6,96	5,10	42%	153,06
CIRA	20,82	19,29	1,53	7%	46,04
CMAG	15,74	11,62	4,12	26%	123,65
GIR	4,27	3,54	0,73	17%	21,76
KWG	30,20	23,15	7,06	23%	211,74

V.PENUTUP

A. Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian yang dilakukan, dapat disimpulkan bahwa:

1. Metode optimalisasi penyeimbangan beban dalam penelitian ini memperhitungkan beban LWBP (luar waktu beban puncak) dan WBP (waktu beban puncak) sehingga lebih efektif dibandingkan metode ukur dan langsung seimbangkan. Penyeimbangan beban dengan metode ini lebih efektif untuk meningkatkan saving kWh susut khususnya pada gardu distribusi.
2. Penyeimbangan beban gardu distribusi dalam proyek penelitian ini terdapat 7 gardu yang berhasil mendapatkan keuntungan kwh.
3. Terdapat keuntungan kWh sebesar 645.79 kWh per bulan dari pelaksanaan optimalisasi penyeimbangan beban pada penelitian ini.

B. Saran

Berdasarkan hasil penelitian yang dilakukan, ada beberapa saran untuk penyempurnaan *project* penyeimbangan beban gardu distribusi:

1. Pengukuran beban gardu menggunakan *power logger* selama 24 jam untuk memantau karakteristik beban.
2. Penggunaan alat *monitoring* beban secara *realtime* untuk acuan penambahan beban gardu.

DAFTAR PUSTAKA

[1] PT PLN, “Kepdir PT PLN (Persero) No,217-1.K/DIR/2005 tentang Pedoman Penyusunan Laporan Neraca Energi (kWh),” 2005.
[2] N. T. U. Dr. Lalit Goel, “Power System Reliability - Concept & Techniques”.
[3] D. Suwanto, “SISTEM DISTRIBUSI TENAGA LISTRIK,” Padang, 2009.
[4] R. Wibowo *et al.*, “STANDAR KONSTRUKSI GARDU DISTRIBUSIDAN GARDU HUBUNG TENAGA LISTRIK,” 2010.
[5] Avm, “Construction of Power Transformer,” www.researchgate.net.
[6] A. Dasa Novfowan, M. Mieftah, W. Kusuma Jurusan Teknik Elektro, and P. Negeri Malang, “ALTERNATIF PENANGANAN LOSSES AKIBAT KETIDAKSEIMBANGAN BEBAN PADA TRAFO DISTRIBUSI,” *Jurnal Teknik: Ilmu dan Aplikasi*, 2020.