



Optimasi Penambahan Transformator Sisipan Terhadap Keandalan Jaringan di Gardu Distribusi

Hendrawan Riki Prabowo^{1*}, Arief Marwanto²

^{1,2} Progam Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Industri, Universitas Islam Sultan Agung, Semarang, Indonesia

Alamat: Jl. Kaligawe Raya No.Km.4, Terboyo Kulon, Kec. Genuk, Kota Semarang, Jawa Tengah 50112

Korespondensi penulis: hendrawanrp99@gmail.com

Abstract: Distribution substations are one of the important assets managed by the State Electricity Company (PLN), especially distribution transformers to distribute electric power to consumers. The MOADK006 Distribution Substation is located in Wakarleli Village, Moa District, Southwest Maluku Regency, Maluku Province with a transformer capacity of 100 kVA which is supplied by the Inner City Feeder of the PLN Moa electricity system. The transformer experiences a load condition exceeding 80% of its capacity. To overcome the problem of overloading at the MOADK006 distribution substation, which reached 93.72% of the 100 kVA capacity, it has exceeded the standards set by PLN ED Decree No.0017.E/DIR/2014. As a solution, an insert transformer with a capacity of 100 kVA was added. After adding the insert transformer, the MOADK006 distribution substation load was reduced to 45.02%, while the insert transformer bore a load of 48.81%. With this load distribution, the two distribution substations are in good loading condition, namely less than 60%, in accordance with the guidelines of PLN ED Decree No.0017.E/DIR/2014. It is estimated that the MOADK006 distribution substation can last up to 8 years. The voltage measurement at the end of the network after adding the insert transformer also experienced improvements, where the results of the Drop Voltage value at the end of the network before and after adding the insert transformer were 8.88% to 2.70% for the R phase, 7.59% to 3.16% for the S phase, and 7.55% to 2.25% for the T phase. Thus, the addition of the insert transformer proved to be effective in reducing the load on the distribution substation. MOADK006 and improves the voltage value at the end of the network, so that it meets applicable operational standards.

Keywords: Distribution Transformer, Insert Transformer, Overload, Voltage Drop

Abstrak: Gardu Distribusi merupakan salah satu asset penting yang dikelola Perusahaan Listrik Negara (PLN) terutama transformator distribusi guna menyalurkan tenaga listrik ke konsumen. Gardu Distribusi MOADK006 terletak di Desa Wakarleli, Kecamatan Moa, Kabupaten Maluku Barat Daya, Provinsi Maluku dengan kapasitas transformator 100 kVA yang disuplai oleh Penyulang Dalam Kota sistem kelistrikan PLN Moa. Transformator tersebut mengalami kondisi beban melebihi 80% dari kapasitasnya. Untuk mengatasi masalah pembebanan berlebih pada gardu distribusi MOADK006, yang mencapai 93,72% dari kapasitas 100 kVA telah melebihi standar yang ditetapkan oleh SK ED PLN No.0017.E/DIR/2014. Sebagai solusi, dilakukan penambahan transformator sisipan dengan kapasitas 100 kVA. Setelah penambahan transformator sisipan, beban gardu distribusi MOADK006 berkurang menjadi 45,02%, sementara transformator sisipan menanggung beban sebesar 48,81%. Dengan distribusi beban ini, kedua gardu distribusi berada dalam kondisi pembebanan yang baik, yaitu kurang dari 60%, sesuai dengan pedoman SK ED PLN No.0017.E/DIR/2014. Diperkirakan gardu distribusi MOADK006 dapat bertahan hingga 8 tahun kedepan. Pengukuran tegangan pada ujung jaringan sesudah dilakukan penambahan transformator sisipan juga mengalami perbaikan, dimana hasil nilai jatuh tegangan (Drop Voltage) pada ujung jaringan sebelum dan sesudah penambahan transformator sisipan sebesar 8,88% menjadi 2,70% untuk fasa R, 7,59% menjadi 3,16% untuk fasa S, dan 7,55% menjadi 2,25% untuk fasa T. Dengan demikian, penambahan transformator sisipan terbukti efektif dalam mengurangi beban pada gardu distribusi MOADK006 dan memperbaiki nilai tegangan pada ujung jaringan, sehingga memenuhi standar operasional yang berlaku.

Kata kunci: Trafo Distribusi, Trafo Sisipan, Beban Lebih, Penurunan Tegangan

1. LATAR BELAKANG

Energi listrik sudah menjadi kebutuhan utama bagi masyarakat, tanpa adanya listrik berbagai kegiatan tentunya akan terhambat (Irawati Bursa, 2021). Melihat betapa pentingnya energi listrik tentu perusahaan kelistrikan di Indonesia yaitu PT PLN (Persero) dituntut mampu menyediakan serta mendistribusikan energi listrik untuk masyarakat umum dengan keandalan dan kontinuitas yang terjaga untuk mencegah pemadaman atau gangguan listrik di kemudian hari (Renaldi, 2022) (Kementerian ESDM RI, 2016).

Standar pelayanan PLN mencakup penyediaan energi listrik yang berkontinuitas dan berkualitas bagi pelanggan pengoptimalan pengelolaan aset yang dimiliki agar selalu dapat beroperasi dengan efisien dan handal (PT. PLN (Persero), 2010a) (M. Randi Wahyu Susanto, 2020). Efisien berarti energi listrik yang dihasilkan oleh pembangkit dan didistribusikan hingga ke beban pelanggan mengalami rugi-rugi yang seminimal mungkin, dan handal berarti aset-aset kelistrikan PLN dapat beroperasi dengan baik, tidak menyebabkan gangguan yang dapat mengakibatkan terganggunya proses pendistribusian energi listrik (Samsurizal & Hadinoto, 2020).

PT. PLN (Persero) selalu rutin melaksanakan pemeliharaan secara berkala terhadap aset yang dimilikinya untuk menjaga Keandalan tersebut, salah satu aset berharga yang dimiliki PLN khususnya di jaringan distribusi yaitu Gardu Distribusi (PT PLN (Persero), 2014).

Permasalahan yang sering terjadi di gardu distribusi yaitu transformator yang mengalami beban lebih atau overload. pembebanan transformator yang ideal yaitu $< 80\%$ dari kapasitas yang terpasang, jika melebihi $> 80\%$ dapat dikatakan transformator tersebut overload (Dharma, 2024). Transformator yang mengalami overload atau beban lebih dapat mempercepat kerusakan transformator, terutama memperpendek lifetime atau umur dari transformator itu sendiri karena panas berlebih yang dihasilkan dapat merusak isolasi kumparan transformator, sehingga akan berdampak terhadap kontinuitas penyaluran energi listrik dan bertambahnya pemeliharaan berdasarkan kondisi transformator yang memerlukan biaya yang cukup tinggi (Mertasana, 2015). Upaya untuk menurunkan beban transformator dapat dilakukan dengan beberapa cara yaitu menambah kapasitas (up-rating) transformator, sisip transformator dan pecah beban dengan metode pindah kopel jurusan gardu distribusi (Wahyudi Widiatmika et al., 2018).

Gardu Distribusi MOADK006 merupakan gardu berkapasitas 100 kVA yang memiliki pembebanan yang tinggi mencapai 93,72% dari kapasitas transformator yang

dapat dikatakan telah melebihi kapasitas standar transformator atau overload dengan pembebanan 93,72 kVA.

2. METODE PENELITIAN

Dalam proses penyusunan tugas akhir ini terdiri dari beberapa tahapan, sesuai diagram berikut :



Gambar 1. Diagram Perencanaan Penelitian

Metode Studi Literatur

Merupakan metode yang digunakan untuk mendapatkan teori-teori penunjang serta referensi yang memuat rumus-rumus yang berguna dalam perhitungan terkait permasalahan yang diambil. Referensi-referensi yang dimaksud yaitu dapat diambil dari buku PLN, SPLN,

buku offline ataupun online dan lain sebagainya yang nantinya dijadikan sumber pustaka dalam penulisan Tugas Akhir ini.

Metode Observasi

Merupakan metode yang digunakan untuk mendapatkan data-data pengamatan visual secara langsung kondisi di lapangan dengan melaksanakan survei. Gardu distribusi terkait yang akan dibahas dalam penulisan tugas akhir ini khususnya di Gardu Distribusi MOADK006 yang overload dan akan akan dilaksanakan penambahan Gardu Distribusi Sisipan.(Hardani, 2020)

Metode Wawancara

Merupakan metode yang digunakan untuk mencari dan mengumpulkan data dengan mendapatkan materi-materi ataupun penjelasan serta tanya-jawab atau wawancara secara langsung dengan pihak yang berkompeten dibidangnya baik itu dengan bimbingan maupun diskusi dengan pihak PT. PLN (Persero) yang khususnya berkompeten dibidangnya mengenai permasalahan yang diangkat di Tugas Akhir.

Pengolahan Data

Dalam metode ini, dilakukan pengumpulan data pada gardu distribusi terkait. Setelah data telah terkumpul, penulis akan mengolah data tersebut pada kondisi sebelum dan sesudah dilaksanakan penambahan transformator sisipan pada gardu distribusi MOADK006, menggunakan perumusan sebagai berikut :

- a. Menghitung persentase pembebanan transformator di gardu distribusi MOADK006 sebelum dan sesudah Penambahan Gardu Sisipan dengan menggunakan rumus berikut:

$$S_{\text{Beban}} = \frac{(IR \times VR - N) + (IS \times VS - N) + (IT \times VT - N)}{1000} \quad (1)$$

$$\% \text{ Beban} = \frac{S_{\text{BEBAN}}}{S_{\text{Trafo}}} \times 100\% \quad (2)$$

- b. Menghitung besar beban arus ideal transformator sebesar 80% dari arus nominal di nameplate transformator 100 kVA gardu distribusi MOADK006 dengan menggunakan rumus berikut :

$$I_{\text{Ideal}} = 80\% \times I_n \quad (3)$$

- c. Menghitung persentase kelebihan beban untuk setiap fasa di transformator gardu distribusi MOADK006 dengan menggunakan rumus berikut :

$$R_{\text{Lbh}} = \frac{I_r - (80\% \times I_n)}{(80\% \times I_n)} \times 100\% \quad (4)$$

$$S_{\text{Lbh}} = \frac{I_s - (80\% \times I_n)}{(80\% \times I_n)} \times 100\% \quad (5)$$

$$T_{\text{Lbh}} = \frac{I_t - (80\% \times I_n)}{(80\% \times I_n)} \times 100\% \quad (6)$$

- d. Menghitung persentase ketidakseimbangan beban gardu MOADK006 sebelum dan sesudah penambahan Gardu Distribusi sisipan menggunakan rumus berikut :(Irawati Bursa, 2021)

$$I_{rata-rata} = \frac{IR+IS+IT}{3} \quad (7)$$

$$I_R = a \times I_{rata-rata}, \text{ maka } a = \frac{IR}{I_{rata-rata}} \quad (8)$$

$$I_S = b \times I_{rata-rata}, \text{ maka } b = \frac{IS}{I_{rata-rata}} \quad (9)$$

$$I_T = c \times I_{rata-rata}, \text{ maka } c = \frac{IT}{I_{rata-rata}} \quad (10)$$

$$KS = \frac{\{|a-1|+|b-1|+|c-1|\}}{3} \times 100\% \quad (11)$$

- e. Menghitung persentase jatuh tegangan (drop Voltage) pada ujung jaringan di gardu distribusi MOADK006 sebelum dan sesudah Penambahan Gardu Sisipan dengan menggunakan rumus berikut(Irawati Bursa, 2021) :

$$\% \Delta V = \frac{V_s - V_t}{V_s} \times 100\% \quad (12)$$

- f. Menghitung estimasi pertumbuhan beban selama beberapa tahun kedepan, berdasarkan data konsumsi energi listrik ULP Moa selama 5 tahun kebelakang menggunakan rumus sebagai berikut:

$$PB = \frac{KEL_n - KEL_p}{KEL_p} \times 100\% \quad (13)$$

$$Rata2 \text{ KEL} = \frac{(n+(n+1)+(n+2)+(n+3)+\dots+dst)}{Y_n}$$

$$PB(n) = \% \text{ Beban ke } (n-1) + Rata^2 \text{ KEL} \times S \text{ Beban ke } (n-1) \quad (14)$$

- g. Perhitungan penempatan transformator sisipan dapat dihitung dengan rumus berikut(Armando et al., 2023):

$$L = \frac{10\% \times VF - F}{I_{rata-rata} \times R_{saluran}} \quad (15)$$

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Data Hasil Pengukuran Beban Gardu Distribusi MOADK006 sebelum penambahan transformator sisipan ditampilkan table 1 dan 2 Berikut :

Tabel 1. Data Hasil Pengukuran Beban Gardu Distribusi MOADK006 Sebelum Penambahan Transformator Sisipan Saat Pengukuran LWBP

Tgl	Jam	Fasa	Arus Induk (A)	Arus Jurusan (A)		Tegangan Induk (V)	Tegangan Ujung (V)
				A	B		

24 - 10 - 2024	12	R	138	5 4. 7 4	83.2 6	R - N	226	R -S	386	R-N	206
		S	110.9	6 0. 5 9	50.3 1	S- N	226	S- T	385	S-N	208
		T	95.7	4 2. 8 8	52.8 2	T- N	225	T- R	386	T-N	209
	13	R	144	5 7. 0 8	86.9 2	R - N	226	R -S	386	R-N	205
		S	113	6 1. 7 7	51.2 3	S- N	225	S- T	385	S-N	208
		T	98	4 3. 8 7	54.1 3	T- N	226	T- R	386	T-N	209
	14	R	141	5 5. 9	85.1	R - N	225	R -S	386	R-N	205
		S	113	6 1. 9 1	51.0 9	S- N	224	S- T	385	S-N	208
		T	96.4	4 3. 1 8	53.2 2	T- N	225	T- R	386	T-N	208

Tabel 2. Data Hasil Pengukuran Beban Gardu Distribusi MOADK006 Sebelum Penambahan Transformator Sisipan Saat Pengukuran WBP

Tgl	Jam	Fasa	Arus Induk (A)	Arus Jurusan (A)		Tegangan Induk (V)				Tegangan Ujung (V)	
				A	B						
24 - 10 - 2024	18	R	153	60.6 5	92.3 5	R-N	226	R-S	386	R-N	206
		S	110	60.1 3	49.8 7	S-N	226	S-T	386	S-N	207
		T	98.4	44.0 5	54.3 5	T-N	225	T-R	385	T-N	209

	19	R	168	66.6 1	101. 4	R-N	225	R-S	386	R-N	206
		S	120	65.7 5	54.2 5	S-N	224	S-T	385	S-N	208
		T	109	48.8 3	60.1 7	T-N	225	T-R	386	T-N	209
	20	R	177.4	70.7	106. 7	R-N	225	R-S	385	R-N	205
		S	123.6	69.7	53.9	S-N	224	S-T	385	S-N	207
		T	116.1	50	66.1	T-N	225	T-R	385	T-N	208

Data Hasil Pengukuran Beban Gardu Distribusi MOADK006 sesudah penambahan transformator sisipan ditampilkan table 3 dan 4 Berikut :

Tabel 3. Data Hasil Pengukuran Beban Gardu Distribusi MOADK006 Sesudah Penambahan Transformator Sisipan Saat Pengukuran LWBP

Tgl	Ja m	Fa sa	Arus Indu k (A)	Arus Jurusan (A)		Tegangan Induk (V)				Tegangan Ujung (V)	
				A	B						
12 - 11 - 202 4	12	R	55.9 4	22.18	33.76	R-N	221	R-S	384	R-N	215
		S	70.6 3	38.58	32.05	S-N	222	S-T	385	S-N	214
		T	38.4 7	17.23	21.24	T-N	221	T-R	384	T-N	217
	13	R	56.1 5	22.25	33.9	R-N	222	R-S	384	R-N	216
		S	73.9 7	40.43	33.54	S-N	222	S-T	384	S-N	216
		T	42.2 3	18.9	23.33	T-N	222	T-R	384	T-N	217
	14	R	54.1 5	21.46	32.69	R-N	223	R-S	385	R-N	217
		S	71.7 1	39.28	32.43	S-N	222	S-T	384	S-N	215
		T	41.4 7	18.57	22.9	T-N	222	T-R	384	T-N	216

Tabel 4. Data Hasil Pengukuran Beban Gardu Distribusi MOADK006 Sesudah Penambahan Transformator Sisipan Saat Pengukuran WBP

Tgl	Ja m	Fa sa	Arus Indu k (A)	Arus Jurusan (A)		Tegangan Induk (V)				Tegangan Ujung (V)	
				A	B						
12 - 11 - 202 4	18	R	55.15	21.8 6	33.29	R-N	222	R-S	384	R-N	216
		S	73.97	40.4 3	33.54	S-N	222	S-T	384	S-N	215
		T	42.23	18.9	23.33	T-N	222	T-R	384	T-N	216

	19	R	58.71	23.2 7	35.44	R-N	222	R-S	384	R-N	215
		S	78.67	43.1	35.57	S-N	221	S-T	383	S-N	215
		T	44.51	19.9 3	24.56	T-N	222	T-R	385	T-N	215
	20	R	64.58	25.6	38.98	R-N	222	R-S	384	R-N	216
		S	88.17	48.3 1	39.86	S-N	221	S-T	384	S-N	214
		T	50.43	22.5 9	27.84	T-N	222	T-R	385	T-N	217

Data Hasil Pengukuran Beban Gardu Distribusi Sisipan ditampilkan table 3 dan 4 Berikut :

Tabel 5. Data Hasil Pengukuran Beban Gardu Distribusi Sisipan Saat Pengukuran LWBP

Tgl	Jam	Fasa	Arus Induk (A)	Arus Jurusan (A)		Tegangan Induk (V)				Tegangan Ujung (V)	
				A	B						
12 - 11 - 2024	12	R	80.8	32.05	48.75	R-N	222	R-S	385	R-N	214
		S	44.31	24.21	20.1	S-N	222	S-T	385	S-N	216
		T	59.74	26.77	32.97	T-N	222	T-R	385	T-N	215
	13	R	82.34	32.64	49.7	R-N	221	R-S	384	R-N	214
		S	45.88	25.08	20.8	S-N	222	S-T	384	S-N	216
		T	61.9	27.71	34.19	T-N	222	T-R	384	T-N	215
	14	R	81.55	32.33	49.22	R-N	223	R-S	385	R-N	216
		S	43.64	23.91	19.73	S-N	222	S-T	384	S-N	215
		T	60.37	27.04	33.33	T-N	222	T-R	384	T-N	215

Tabel 6. Data Hasil Pengukuran Beban Gardu Distribusi Sisipan Saat Pengukuran LWBP

Tgl	Jam	Fasa	Arus Induk (A)	Arus Jurusan (A)		Tegangan Induk (V)				Tegangan Ujung (V)	
				A	B						
12 - 11 - 2024	18	R	82.93	33.27	50.66	R-N	222	R-S	384	R-N	214
		S	47.77	25.57	21.2	S-N	221	S-T	383	S-N	216
		T	62.12	27.81	34.31	T-N	222	T-R	385	T-N	215
	19	R	88.43	35.46	53.97	R-N	222	R-S	384	R-N	214
		S	50.73	28.34	25.39	S-N	221	S-T	383	S-N	216
		T	64.64	28.96	35.68	T-N	222	T-R	385	T-N	215
	20	R	94.72	37.75	56.97	R-N	222	R-S	385	R-N	213
		S	55.65	31.38	24.27	S-N	222	S-T	385	S-N	215
		T	69.19	29.8	39.39	T-N	223	T-R	386	T-N	215

Perhitungan Persentase Pembebanan Transformator Gardu Distribusi MOADK006 Sebelum Penambahan Transformator Sisipan

Berdasarkan tabel 1 dan 2 data hasil pengukuran pembebanan MOADK006 sebelum penambahan transformator sisipan, pembebanan di tanggal 24 Oktober 2024 pukul 20.00 WIT dengan rumus sebagai berikut:

$$S_{\text{BEBAN}} = \frac{(IR \times VR - N) + (IS \times VS - N) + (IT \times VT - N)}{1000}$$

$$S_{\text{BEBAN}} = \frac{(177,4 \times 225) + (123,6 \times 224) + (116,1 \times 225)}{1000}$$

$$S_{\text{BEBAN}} = 93,72 \text{ kVA}$$

Kemudian dapat dihitung persentase pembebanan transformator sebagai berikut:

$$\% \text{ Beban} = \frac{S_{\text{BEBAN}}}{S_{\text{TRAFO}}} \times 100\%$$

$$\% \text{ Beban} = \frac{93,72}{100} \times 100\%$$

$$\% \text{ Beban} = 93,72 \%$$

Dengan menggunakan perumusan yang sama seperti diatas, maka persentase pembebanan transformator gardu distribusi MOADK006 dilihat pada table 5 dan 6 berikut:

Tabel 7. Data Hasil Perhitungan Pembebanan dan Persentase Pembebanan Gardu Distribusi MOADK006 Sebelum Penambahan Transformator Sisipan Saat Pengukuran LWBP

Tanggal	Waktu WBP (WIT)	Beban Transformator (kVA)	Persentase Beban Transformator (%)
Kamis, 24 Oktober 2024	12.00	77,78	77,78
	13.00	80,12	80,12
	14.00	78,73	78,73

Tabel 8. Data Hasil Perhitungan Pembebanan dan Persentase Pembebanan Gardu Distribusi MOADK006 Sebelum Penambahan Transformator Sisipan Saat Pengukuran WBP

Tanggal	Waktu WBP (WIT)	Beban Transformator (kVA)	Persentase Beban Transformator (%)
Kamis, 24 Oktober 2024	18.00	81,58	81,58
	19.00	89,21	89,21
	20.00	93,72	93,72

Perhitungan Persentase Kelebihan Beban Di Transformator Gardu Distribusi MOADK006 Sebelum Penambahan Transformator Sisipan

Dihitung batas arus beban ideal transformator gardu distribusi MOADK006 melalui persamaan rumus sebagai berikut:

$$I_{\text{ideal}} = 80\% \times I_n$$

$$I_{\text{ideal}} = 80\% \times 144,34$$

$$I_{\text{ideal}} = 115,47 \text{ A}$$

Pada tanggal 24 Oktober 2024 didapatkan pembebanan terbesar pada pukul 20.00 WIT di masing-masing fasa adalah sebesar 177,4 A di fasa R, sebesar 123,6 A di fasa S, sebesar 116,1 A di fasa T. Kemudian dihitung besar persentase kelebihan beban dari pembebanan terbesar tersebut dari ketentuan 80% pembebanan dari arus nominal transformator menggunakan persamaan rumus berikut :

$$\begin{aligned} R_{\text{Lbh}} &= \frac{I_R - (80\% \times I_n)}{(80\% \times I_n)} \times 100\% \\ &= \frac{177,4 - 115,47}{115,47} \times 100\% \\ &= 53,63\% \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} S_{\text{Lbh}} &= \frac{I_S - (80\% \times I_n)}{(80\% \times I_n)} \times 100\% \\ &= \frac{123,6 - 115,47}{115,47} \times 100\% \\ &= 7,04\% \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} T_{\text{Lbh}} &= \frac{I_T - (80\% \times I_n)}{(80\% \times I_n)} \times 100\% \\ &= \frac{116,1 - 115,47}{115,47} \times 100\% \\ &= 0,55\% \end{aligned}$$

Perhitungan Persentase Ketidakseimbangan Beban Gardu Distribusi MOADK006 Sebelum Penambahan Transformator Sisipan

Menghitung arus rata-rata pembebanan gardu distribusi MOADK006 dengan persamaan rumus berikut:

$$\begin{aligned} I_{\text{rata-rata}} &= \frac{I_R + I_S + I_T}{3} \\ &= \frac{177,4 + 123,6 + 116,1}{3} \\ &= 139,03 \text{ A} \end{aligned}$$

Kemudian menghitung ketidakseimbangan beban tiap fasa di gardu distribusi MOADK006 menggunakan persamaan rumus berikut:

$$\begin{aligned} I_R &= a \times I_{\text{rata-rata}}, \\ \text{maka } a &= \frac{I_R}{I_{\text{rata-rata}}} = \frac{177,4}{139,03} = 1,28 \\ I_S &= a \times I_{\text{rata-rata}}, \\ \text{maka } b &= \frac{I_S}{I_{\text{rata-rata}}} = \frac{123,6}{139,03} = 0,89 \\ I_T &= a \times I_{\text{rata-rata}}, \end{aligned}$$

$$\text{maka } c = \frac{IT}{I_{rata-rata}} = \frac{116,1}{139,03} = 0,84$$

Dengan menggunakan koefisien keseimbangan beban yaitu $a=b=c=1$, dapat dikatakan arus rata-rata adalah arus fasa yang dalam keadaan seimbang. Sehingga menghitung persentase rata-rata ketidakseimbangan beban menggunakan persamaan rumus berikut:

$$\begin{aligned} KS &= \frac{\{|a-1|+|b-1|+|c-1|\}}{3} \times 100 \% \\ &= \frac{\{|1,28-1|+|0,89-1|+|0,84-1|\}}{3} \times 100 \% \\ &= 18,40\% \end{aligned}$$

Perhitungan Persentase Jatuh Tegangan (Drop Voltage) Pada Ujung Jaringan di Gardu Distribusi MOADK006 Sebelum Penambahan Transformator Sisipan

Berdasarkan tabel 1 dan 2 data hasil pengukuran pembebanan MOADK006 sebelum penambahan transformator sisipan, persentase jatuh tegangan (Drop Voltage) di tanggal 24 Oktober 2024 pukul 20.00 WIT dengan persamaan rumus sebagai berikut:

Jatuh Tegangan (*Drop Voltage*) Fasa R

$$\% \Delta V = \frac{V_s - V_t}{V_s} \times 100\%$$

$$\% \Delta V = \frac{225 - 205}{225} \times 100\%$$

$$\% \Delta V = 8,88 \%$$

Jatuh Tegangan (*Drop Voltage*) Fasa S

$$\% \Delta V = \frac{V_s - V_t}{V_s} \times 100\%$$

$$\% \Delta V = \frac{224 - 207}{224} \times 100\%$$

$$\% \Delta V = 7,59 \%$$

Jatuh Tegangan (*Drop Voltage*) Fasa T

$$\% \Delta V = \frac{V_s - V_t}{V_s} \times 100\%$$

$$\% \Delta V = \frac{225 - 208}{225} \times 100\%$$

$$\% \Delta V = 7,55 \%$$

Perhitungan Persentase Pembebanan Transformator Gardu Distribusi MOADK006 Sesudah Penambahan Transformator Sisipan

Berdasarkan tabel 3 dan 4 data hasil pengukuran pembebanan MOADK006 sesudah penambahan transformator sisipan, pembebanan di tanggal 12 November 2024 pukul 20.00 WIT dengan rumus sebagai berikut:

$$S_{\text{BEBAN}} = \frac{(IR \times VR - N) + (IS \times VS - N) + (IT \times VT - N)}{1000}$$

$$S_{\text{BEBAN}} = \frac{(64,58 \times 222) + (88,17 \times 221) + (50,43 \times 222)}{1000}$$

$$S_{\text{BEBAN}} = 45,02 \text{ kVA}$$

Kemudian dapat dihitung persentase pembebanan transformator di tanggal 12 November 2024 pukul 20.00 WIT sebagai berikut:

$$\% \text{ Beban} = \frac{S_{\text{BEBAN}}}{S_{\text{TRAFO}}} \times 100\%$$

$$\% \text{ Beban} = \frac{45,02}{100} \times 100\%$$

$$\% \text{ Beban} = 45,02 \%$$

Dengan menggunakan perumusan yang sama seperti diatas, maka persentase pembebanan transformator gardu distribusi MOADK006 dilihat pada tabel 9 dan 10 serta gardu distribusi sisipan pada tabel 11 dan 12 berikut :

Tabel 9. Data Hasil Perhitungan Pembebanan dan Persentase Pembebanan Gardu Distribusi MOADK006 Sesudah Penambahan Transformator Sisipan Saat Pengukuran LWBP

Tanggal	Waktu WBP (WIT)	Beban Transformator (kVA)	Persentase Beban Transformator (%)
Selasa, 12	12.00	36,54	36,54
November	13.00	38,26	38,26
2024	14.00	37,20	37,20

Tabel 10. Data Hasil Perhitungan Pembebanan dan Persentase Pembebanan Gardu Distribusi MOADK006 Sesudah Penambahan Transformator Sisipan Saat Pengukuran WBP

Tanggal	Waktu WBP (WIT)	Beban Transformator (kVA)	Persentase Beban Transformator (%)
Selasa, 12	18.00	38,04	38,04
November	19.00	40,03	40,03
2024	20.00	45,02	45,02

Tabel 11. Data Hasil Perhitungan Pembebanan dan Persentase Pembebanan Gardu Distribusi Sisipan Saat Pengukuran LWBP

Tanggal	Waktu WBP (WIT)	Beban Transformator (kVA)	Persentase Beban Transformator (%)
Selasa, 12	12.00	41,04	41,04
November	13.00	42,12	42,12
2024	14.00	41,28	41,28

Tabel 12. Data Hasil Perhitungan Pembebanan dan Persentase Pembebanan Gardu Distribusi Sisipan Saat Pengukuran WBP

Tanggal	Waktu WBP (WIT)	Beban Transformator (kVA)	Persentase Beban Transformator (%)
Selasa, 12 November 2024	18.00	42,76	42,76
	19.00	45,19	45,19
	20.00	48,81	48,81

Perhitungan Persentase Ketidakseimbangan Beban Gardu Distribusi MOADK006 Sebelum Penambahan Transformator Sisipan

Menghitung arus rata-rata pembebanan gardu distribusi MOADK006 dengan persamaan rumus berikut:

$$\begin{aligned}
 I_{\text{rata-rata}} &= \frac{I_R + I_S + I_T}{3} \\
 &= \frac{64,58 + 88,17 + 50,43}{3} \\
 &= 67,73 \text{ A}
 \end{aligned}$$

Kemudian menghitung ketidakseimbangan beban tiap fasa di gardu distribusi MOADK006 menggunakan persamaan rumus berikut:

$$I_R = a \times I_{\text{rata-rata}},$$

$$\text{maka } a = \frac{I_R}{I_{\text{rata-rata}}} = \frac{64,58}{67,73} = 0,95$$

$$I_S = a \times I_{\text{rata-rata}},$$

$$\text{maka } b = \frac{I_S}{I_{\text{rata-rata}}} = \frac{88,17}{67,73} = 1,30$$

$$I_T = a \times I_{\text{rata-rata}},$$

$$\text{maka } c = \frac{I_T}{I_{\text{rata-rata}}} = \frac{50,43}{67,73} = 0,74$$

Dengan menggunakan koefisien keseimbangan beban yaitu $a=b=c=1$, dapat dikatakan arus rata-rata adalah arus fasa yang dalam keadaan seimbang. Sehingga menghitung persentase rata-rata ketidakseimbangan beban menggunakan persamaan rumus berikut:

$$\begin{aligned}
 \text{KS} &= \frac{\{|a-1|+|b-1|+|c-1|\}}{3} \times 100 \% \\
 &= \frac{\{|0,95-1|+|1,30-1|+|0,74-1|\}}{3} \times 100 \% \\
 &= 20,12\%
 \end{aligned}$$

Perhitungan Persentase Jatuh Tegangan (*Drop Voltage*) Pada Ujung Jaringan di Gardu Distribusi MOADK006 Sesudah Penambahan Transformator Sisipan

Berdasarkan tabel 3 dan 4 data hasil pengukuran pembebanan MOADK006 sesudah penambahan transformator sisipan, persentase jatuh tegangan (*Drop Voltage*) di tanggal 12 November 2024 pukul 20.00 WIT dengan persamaan rumus sebagai berikut:

Jatuh Tegangan (*Drop Voltage*) Fasa R

$$\% \Delta V = \frac{V_s - V_t}{V_s} \times 100\%$$

$$\% \Delta V = \frac{222 - 216}{222} \times 100\%$$

$$\% \Delta V = 2,70 \%$$

Jatuh Tegangan (*Drop Voltage*) Fasa S

$$\% \Delta V = \frac{V_s - V_t}{V_s} \times 100\%$$

$$\% \Delta V = \frac{221 - 214}{221} \times 100\%$$

$$\% \Delta V = 3,16 \%$$

Jatuh Tegangan (*Drop Voltage*) Fasa T

$$\% \Delta V = \frac{V_s - V_t}{V_s} \times 100\%$$

$$\% \Delta V = \frac{222 - 217}{222} \times 100\%$$

$$\% \Delta V = 2,25 \%$$

Perhitungan Estimasi Pertumbuhan Beban Berdasarkan Konsumsi Energi Listrik

Data penjualan energi listrik wilayah ULP Moa dalam kurun waktu lima tahun terakhir dapat dilihat pada tabel dibawah ini :

Tabel 13. Data Hasil Perhitungan Pembebanan dan Persentase Pembebanan Gardu Distribusi MOADK006 Sebelum Penambahan Transformator Sisipan Saat Pengukuran WBP

DATA PENJUALAN ENERGI LISTRIK ULP MOA 5 TAHUN TERKHIR		
No	Tahun	Penjualan Listrik (kWh)
1	2019	12.446.630
2	2020	13.067.840
3	2021	14.278.421
4	2022	15.116.392
5	2023	16.231.541

Menentukan persentase peningkatan penjualan energi listrik dirumuskan dengan persamaan berikut:

Persentase konsumsi energi listrik di ULP Moa tahun 2019-2020 :

$$PB = \frac{KEL_n - KEL_p}{KEL_p} \times 100\%$$

$$= \frac{13.067.840 - 12.446.630}{12.446.630} \times 100\%$$

$$= 4,99 \%$$

Dihitung juga dengan persamaan yang sama untuk tahun 2020-2021, 2021-2022, dan 2022-2023. Sehingga dapat dihitung presentase konsumsi energi listrik per tahun sebagai berikut :

$$\text{Rata2 KEL} = \frac{(4,99 + 9,26 + 5,86 + 7,37)}{4}$$

$$= 6,87\%$$

Perhitungan estimasi pertumbuhan pembebanan gardu distribusi MOADK006 pada tahun 2025 sebagai berikut:

$$\text{PB (n)} = \% \text{ Beban ke (n-1)} + \text{Rata}^2 \text{ KEL} \times \text{S Beban ke (n-1)}$$

$$\text{PB (2025)} = 45,02\% + (6,87\% \times 45,02)$$

$$= 45,02\% + 3,09\%$$

$$= 48,11\%$$

Perhitungan estimasi pertumbuhan pembebanan gardu distribusi sisipan pada tahun 2025 sebagai berikut:

$$\text{PB (n)} = \% \text{ Beban ke (n-1)} + \text{Rata}^2 \text{ KEL} \times \text{S Beban ke (n-1)}$$

$$\text{PB (2025)} = 48,81\% + (6,87\% \times 48,81)$$

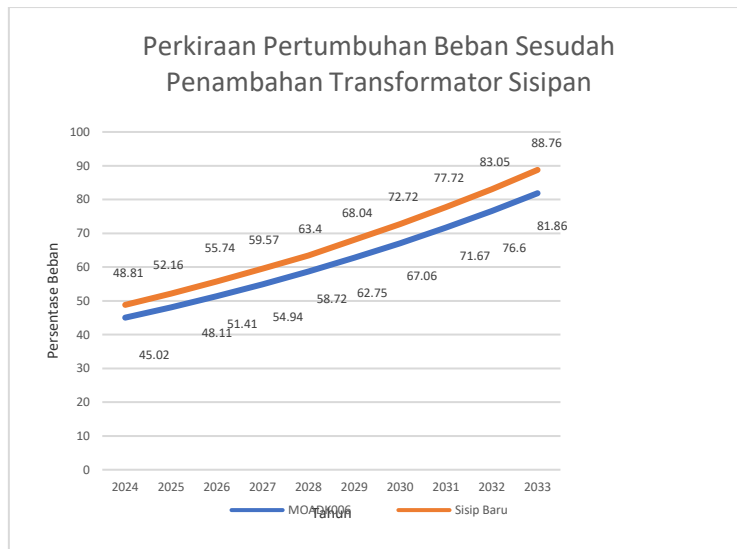
$$= 48,81\% + 3,35\%$$

$$= 52,12\%$$

Perhitungan tahun berikutnya digunakan rumus yang sama. Sehingga asumsi peningkatan persentase pembebanan pada transformator gardu distribusi MOADK006 dan Gardu Distribusi sisipan untuk 8 tahun kedepan dapat dilihat pada tabel 14 berikut:

Tabel 14. Estimasi Peningkatan Persentase Pembebanan Gardu Distribusi MOADK006 dan Gardu Distribusi Sisipan

Tahun	Estimasi Pertumbuhan	Pembebanan
	MOADK006 Sesudah Penambahan Transformator	Gardu Sisipan
2024	45,02%	48,81%
2025	48,11%	52,16%
2026	51,41%	55,74%
2027	54,94%	59,57%
2028	58,72%	63,4\%
2029	62,75%	68,04%
2030	67,06%	72,72%
2031	71,67%	77,72%
2032	76,60%	83,05%
2033	81,86%	88,76%



Gambar 2. Grafik Perkiraan Peningkatan Persentase Pembebanan Gardu Distribusi MOADK006 dan Gardu Distribusi Sisipan

Analisis

Mengacu pada hasil dan pembahasan perhitungan data, seperti yang telah diuraikan di atas, berikut dapat analisis gardu distribusi MOADK006 Sebelum Penambahan Transformator Sisipan

Analisis Pembebanan Transformator Gardu Distribusi MOADK006 Sebelum Penambahan Transformator Sisipan

Berdasarkan hasil perhitungan pembebanan dan persentase pembebanan gardu distribusi MOADK006 sebelum penambahan transformator distribusi, didapatkan pembebanan tertinggi pada gardu distribusi MOADK006 terjadi saat WBP pukul 20.00 WIT dengan pembebanan 93,72 kVA dan persentase pembebanan 93,72%, dari kapasitas transformator 100 kVA. Berdasarkan Surat Edaran Direksi PT. PLN (Persero) No. 0017.E/DIR/2014 tentang metode pemeliharaan transformator distribusi berbasis kaidah manajemen asset hal 8, Pembebanan transformator yang ideal disarankan dibawah <80% dari kapasitas yang terpasang. Pembebanan transformator gardu distribusi MOADK006 dikategorikan Kurang, melihat besar pembebanan transformator tersebut dapat dikatakan transformator gardu distribusi MOADK006 mengalami beban lebih atau overload.

Analisis Besar Kelebihan Beban Gardu Distribusi MOADK006 Sebelum Penambahan Transformator Sisipan

Spesifikasi gardu distribusi MOADK006 dengan kapasitas transformator 100 kVA, arus nominal transformator tersebut dilihat pada nameplate transformator dapat dibebani sebesar 144,34 A di sisi skunder. Standar PLN, pembebanan ideal untuk arus maksimal

transformator yaitu 80% dari kapasitas atau arus nominal. Idealnya transformator 100 kVA gardu distribusi MOADK006 dibebani arus untuk tiap fasa yaitu 115,47 A. Pembebanan terbesar pada masing-masing fasa adalah 177,4 A di fasa R dengan persentase kelebihan pembebanan sebesar 53,63%. 123,6 A di fasa S mengalami persentase kelebihan pembebanan sebesar 7,04%. Dan 116,1 A di fasa T mengalami persentase kelebihan pembebanan sebesar 0,55% dari 80% arus nominal transformator 100 kVA gardu distribusi MOADK006.

Analisis Pembebanan Transformator Gardu Distribusi MOADK006 Setelah Penambahan Transformator Sisipan

Berdasarkan hasil perhitungan pembebanan dan persentase pembebanan gardu distribusi MOADK006 setelah penambahan transformator sisipan, didapatkan pembebanan tertinggi pada gardu distribusi MOADK006 terjadi saat WBP pukul 20.00 WIT dengan pembebanan 45,02 kVA dan persentase pembebanan 45,02%, dari kapasitas transformator 100 kVA.

Besar persentase pembebanan transformator gardu distribusi MOADK006 sudah sesuai dengan Surat Edaran Direksi PT. PLN (Persero) No. 0017.E/DIR/2014 tentang metode pemeliharaan transformator distribusi berbasis kaidah manajemen asset hal 8. Sehingga masalah overload di gardu distribusi MOADK006 sudah teratasi dengan penambahan transformator sisipan dengan kategori baik.

Analisis Ketidakseimbangan Beban Gardu Distribusi MOADK006

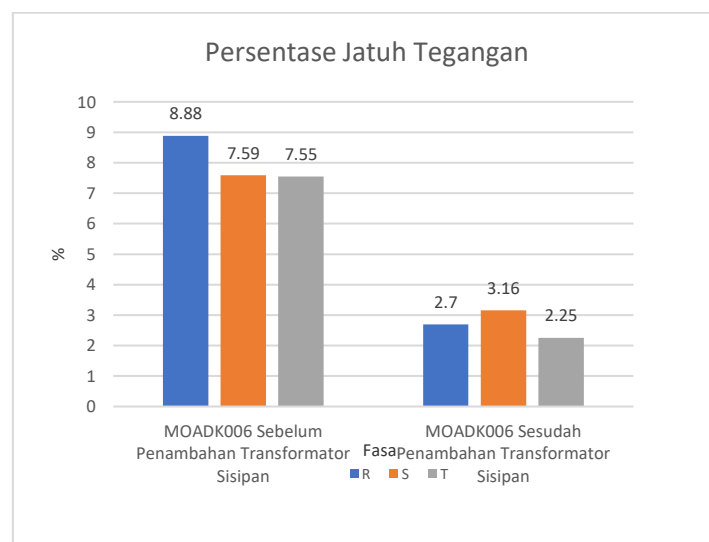
Ketidakseimbangan beban pada transformator distribusi dapat menimbulkan arus di netral transformator, arus yang mengalir di netral transformator ini mengakibatkan terjadinya rugi-rugi yaitu rugi-rugi arus netral di penghantar netral transformator dan rugi-rugi arus netral yang mengalir ke bumi. Persentase ketidakseimbangan beban gardu distribusi MOADK006 sebelum penambahan gardu sisipan yaitu 18,40%, hasil berikut dalam kategori cukup (10%-<20%). Untuk Persentase ketidakseimbangan beban gardu distribusi MOADK006 setelah penambahan gardu sisipan yaitu 20,12% hasil berikut dikategorikan kurang (20%-<25%). Hal demikian disarankan untuk dilakukan manajemen beban Gardu distribusi MOADK006 dengan pemerataan beban antar fasa agar beban gardu dapat seimbang.

Analisis Jatuh Tegangan (Drop Voltage) Pada Ujung Jaringan di Gardu Distribusi MOADK006

Berdasarkan hasil perhitungan persentase jatuh tegangan (drop voltage) pada ujung jaringan di Gardu Distribusi MOADK006 sebelum dan sesudah penambahan transformator sisipan dapat dilihat tabel berikut:

Tabel 15. Persentase Jatuh Tegangan (Drop Voltage) Pada Ujung Jaringan di Gardu Distribusi MOADK006

Fasa	Persentase Jatuh Tegangan	
	MOADK006 Sebelum Penambahan Transformator Sisipan	MOADK006 Sesudah Penambahan Transformator Sisipan
R	8,88%	2,70%
S	7,59%	3,16%
T	7,55%	2,25%



Gambar 3. Grafik Persentase Jatuh Teganagn Gardu Distribusi MOADK006 Sebelum dan Sesudah Penambahan Transformator Sisipan

Berdasarkan hasil pengukuran tegangan ujung jaringan pada gardu distribusi MOADK006 sebelum penamabahn transformator sisipan didapatkan nilai persentase jatuh tegangan sebesar 8,88% untuk fasa R, 7,59% untuk fasa S, dan 7,55% untuk fasa T. Nilai tersebut masih memenuhi standar menurut SPLN T6.001:2013, dimana standar tegangan sistem yang diterapkan pada sistem distribusi tegangan rendah adalah -10% dan +5% dari tegangan nominal(PT PLN (Persero), 2003).

Untuk hasil pengukuran tegangan ujung jaringan pada gardu distribusi MOADK006 sesudah penamabahn transformator sisipan didapatkan jatuh tegangan (drop

voltage) telah berukurang dimana nilai persentase jatuh tegangan sebesar 2,7% untuk fasa R, 3,16% untuk fasa S, dan 2,25% untuk fasa T. Hasil tersebut sesuai standar dan penambahan transformator sisip ini akan berdampak baik pada penyaluran energi listrik dan penekanan losses

Analisis Estimasi Pertumbuhan Pembebanan Gardu Distribusi MOADK006

Berdasarkan perhitungan hasil rata-rata pertumbuhan beban pertahun berdasarkan persentase konsumsi energi listrik selama 5 tahun terakhir di wilayah kerja PT. PLN (persero) ULP Moa kenaikan rata-rata pertahun sebesar 6,87%. Hasil perhitungan prediksi perkembangan pembebanan hingga 2032 sebesar 76,60% pada saat WBP, perhitungan tersebut diambil dari peningkatan beban sebesar 6,87% tiap tahunnya. Dapat dilihat hingga 8 tahun mendatang tahun 2032, gardu distribusi MOADK006 mampu menopang beban dengan persentase dibawah <80% dari kapasitas yang terpasang.

Analisis Faktor Yang Mempengaruhi Terjadinya Beban Lebih Pada Transformator Distribusi

Transformator distribusi dapat mengalami beban berlebih yang diakibatkan oleh faktor usia atau jangka lama transformator dioperasikan, seiring dengan bertambahnya jumlah pelanggan serta beban yang mengalir pada transformator tersebut, Adapun faktor-faktor penyebab terjadinya beban lebih pada transformator :

- a. Arus beban listrik melebihi arus nominal transformator
- b. Peningkatan suhu transformator
- c. Ketidakseimbangan beban antar fasa terlalu besar (>25%)
- d. Kurangnya pemeliharaan pada transformator
- e. Gangguan Eksternal

Transformator distribusi yang mengalami beban lebih tersebut perlu diatasi segera mungkin, adapun langkah-langkah yang dapat dilakukan antara lain:

- a. Mengurangi beban transformator
- b. Ketidakseimbangan beban diperbaiki
- c. Menambah kapasitas transformator
- d. Penambahan transformator sisipan

KESIMPULAN DAN SARAN

Berdasarkan analisis pembebanan transformator gardu distribusi MOADK006 kapasitas 100 kVA, Penyulang Dalam Kota ULP Moa. Didapatkan pembebanan tertinggi saat WBP pukul 20.00 WIT dengan pembebanan 93,72 kVA dan persentase pembebanan 93,72%.

Berdasarkan Surat Edaran Direksi PT. PLN (Persero) No. 0017.E/DIR/2014, masuk ke dalam kondisi kurang ($80\% - <100\%$) dan mengalami beban lebih atau overload. Setelah dilakukan penambahan transformator sisipan, didapatkan pembebanan tertinggi saat WBP pukul 20.00 WIT dengan pembebanan 45,02 kVA dan persentase pembebanan 45,02%. Kondisi beban lebih pada gardu distribusi telah teratasi dalam standar baik (dibawah $<60\%$), sesuai dengan Surat Edaran Direksi PT. PLN (Persero) No. 0017.E/DIR/2014.

Kelebihan beban transformator gardu distribusi MOADK006 kapasitas 100 kVA, Penyulang Dalam Kota ULP Moa sebelum dilaksanakan penambahan transformator sisipan diperoleh pembebanan tertinggi pada saat WBP hari Kamis, tanggal 24 Oktober 2024, pembebanan terbesar di fasa R sebesar 177,4 A dengan persentase kelebihan pembebanan sebesar 53,63%, di fasa S sebesar 123,6 A dengan persentase kelebihan pembebanan sebesar 7,04%, dan di fasa T sebesar 116,1 A dengan persentase kelebihan pembebanan sebesar 0,55% berpatokan 80% dari arus nominal transformator 100 kVA.

Ketidakseimbangan pembebanan gardu distribusi MOADK006 sebelum penambahan transformator sisipan yaitu 18,40% yang dikategorikan cukup. Untuk Persentase ketidakseimbangan beban gardu distribusi MOADK006 sesudah penambahan gardu sisipan yaitu 20,12% hasil berikut dikategorikan kurang 20% - $< 25\%$). Hal demikian disarankan untuk dilakukan manajemen beban Gardu distribusi MOADK006 dengan pemerataan beban antar fasa agar beban gardu dapat seimbang.

Faktor yang mempengaruhi transformator dalam kondisi overload adalah arus beban listrik atau pembebanan telah melebihi kapasitas dari transformator, peningkatan suhu transformator, ketidakseimbangan beban antar fasa terlalu besar ($>25\%$), dan kurangnya pemeliharaan pada transformator. Langkah-langkah untuk mengatasi overload pada transformator distribusi yaitu mengurangi beban transformator, menambah kapasitas transformator dengan kapasitas yang lebih besar, dan penambahan transformator sisipan. Metode penambahan transformator sisipan digunakan untuk mengatasi kondisi beban lebih (overload) pada gardu distribusi MOADK006 dengan melihat pertumbuhan perkembangan beban.

Dengan Penambahan transformator sisipan diharapkan mampu menjaga keandalan dan kontinuitas penyaluran energi listrik pada PT. PLN (Persero) ULP Moa dan Gardu distribusi MOADK006 diperkirakan dapat menopang pertumbuhan beban hingga tahun 2032.

UCAPAN TERIMA KASIH

Terima kasih kepada semua pihak yang telah berkontribusi dalam penyusunan jurnal "Optimasi Penambahan Transformator Sisipan Terhadap Keandalan Jaringan di Gardu Distribusi". Penghargaan setinggi-tingginya kami sampaikan kepada para pembimbing, rekan peneliti, serta pihak industri yang telah memberikan wawasan, dukungan, dan data yang diperlukan dalam penelitian ini. Tak lupa, kami juga berterima kasih kepada institusi dan pihak terkait yang telah memfasilitasi penelitian ini sehingga dapat berjalan dengan baik. Semoga hasil penelitian ini dapat memberikan manfaat bagi pengembangan sistem distribusi listrik yang lebih andal dan efisien.

DAFTAR REFERENSI

- Angely, P. (2019). Hukum Kirchoff. *Electrics*, 2.
- Ardilla, M. (2019). Analisis pengaruh pemindahan beban jaringan tegangan rendah terhadap pembebanan transformator gardu distribusi DB 0279 penyulang Padang Sambian.
- Armando, W., Wartana, I. M., & S, I. B. (2023). Perencanaan pemasangan gardu sisipan pada gardu distribusi MNK 008 penyulang Kasuari di PT PLN (Persero) ULP Manokwari Kota. 07, 288–293.
- Daman, S. (2010). *Sistem distribusi tenaga listrik* (pp. 1–35). Universitas Indonesia.
- Dharma, I. P. A. A. W. (2024). Analisis pemasangan gardu sisip KD0261 pada gardu distribusi KD0096 penyulang Ir. Soekarno PT PLN (Persero) ULP Tabanan (pp. 1–23).
- Hardani. (2020). *Metode penelitian kualitatif & kuantitatif*.
- Irawati Bursa. (2021). Analisis rugi-rugi daya akibat ketidakseimbangan beban pada jaringan distribusi sekunder di PT PLN (Persero) ULP Watang Sawitto. 58.
- Kementerian ESDM RI. (2016). Listrik kebutuhan pokok yang harus dijaga volume, kualitas, dan kesinambungannya. *Arsip Berita Kementerian ESDM RI*. Retrieved from <https://www.esdm.go.id/id/media-center/arsip-berita/listrik-kebutuhan-pokok-yang-harus-dijaga-volume-kualitas-dan-kesinambungannya>.
- Kho, D. (2019). Pengertian transformator (trafo) dan prinsip kerjanya.
- Susanto, M. R. W. (2020). Studi analisis dampak overload transformator terhadap kualitas daya di PT PLN (Persero) ULP Pangkep. *Universitas Muhammadiyah Makassar*, 2(1), 1–12.
- Mertasana, A. (2015). Upaya mengatasi beban lebih pada gardu distribusi 160 kVA pada penyulang Kelan Tuban di PT PLN (Persero) ULP Kuta.
- PT PLN (Persero). (2003). *Tegangan standar* (Vol. 391, p. 5).

- PT PLN (Persero). (2007). *Spesifikasi transformator distribusi bagian 1: Transformator fase tiga PT PLN (Persero)* (pp. 1–50).
- PT PLN (Persero). (2010a). *Buku 1 kriteria enjinering konstruksi jaringan distribusi tenaga listrik* (p. 170).
- PT PLN (Persero). (2010b). *Buku 4 standar konstruksi gardu distribusi dan gardu hubung tenaga listrik* (pp. 1–143).
- PT PLN (Persero). (2010c). *Standar kontruksi sambungan tenaga listrik. Angewandte Chemie International Edition*, 6(11), 951–952., Mi, 5–24.
- PT PLN (Persero). (2014). *Metode pemeliharaan trafo distribusi berbasis kaidah manajemen aset. Edaran Direksi PT PLN (Persero)*.
- Renaldi, O. (2022). Analisis keandalan saluran udara tegangan menengah (SUTM) 20 kV berdasarkan SAIDI dan SAIFI pada PT PLN (Persero) Rayon Duri Riau. *Jurnal Ekonomi*, 18(1), 2(1).
- Samsurizal, S., & Hadinoto, B. (2020). Studi analisis dampak overload transformator terhadap kualitas daya di PT PLN (Persero) UP3 Pondok Gede. *Kilat*, 9(1), 136–142. <https://doi.org/10.33322/kilat.v9i1.784>.
- Sukamdi, H. M. K., Farizan, M. H., & Firmansyah, M. R. F. (2023). Analisis rencana pemasangan transformator sisipan untuk mengatasi overload dan drop voltage pada penyulang Selogabus PT PLN (Persero) ULP Bojonegoro Kota. *Elposys: Jurnal Sistem Kelistrikan*, 9(3), 127–133. <https://doi.org/10.33795/elposys.v9i3.646>.
- Sumardjati, P. (2013). Jenis hubungan pada belitan pada trafo 3 fasa. Retrieved from <https://electric-mechanic.blogspot.com/2013/10/jenis-hubungan-pada-belitan.html>.
- Widiatmika, K. W., Wijaya, I. A., & Setiawan, I. N. (2018). Analisis penambahan transformator sisipan untuk mengatasi overload pada transformator DB0244 di penyulang Sebelanga. *Jurnal SPEKTRUM*, 5(2), 19. <https://doi.org/10.24843/spektrum.2018.v05.i02.p03>.
- Pelawi, Y. Z. (2018). Analisis rugi-rugi daya pada penghantar netral jaringan distribusi sekunder akibat ketidakseimbangan beban. *Buletin Utama Teknik*, 13(2), 1410–4520.