

Analisis Rencana Pemasangan Transformator Sisipan Untuk Mengatasi *Overload* dan *Drop Voltage* pada Penyulang Selogabus PT. PLN (Persero) ULP Bojonegoro Kota

Harrij Mukti K^{a)}, Sukamdi^{a)}, Muhammad Hadyan Farizan^{b)}, Muhammad Rafid Faiz Firmansyah^{b)}

(Artikel diterima:Agustus 2022, direvisi:Oktober 2022)

Abstract:The Selogabus supplier is located at the Bojonegoro City ULP which has 111 transformers and is supplied by the Bojonegoro Substation. Transformers MA164 (250 kVA) and MA267 (250 kVA) have experienced overload ($Load_{MA164} = 102\%$ and $Load_{MA267} = 111\%$) based on the loading standardization, namely SE DIR PT. PLN (Persero) No.0017/2014 ($\leq 80\%$). The MA164 and MA267 transformers also have the farthest customer end voltages of 187 V ($\Delta V_{MA164} = 23\%$) and 189 V ($\Delta V_{MA267} = 22\%$) which do not comply with SPLN standard No. 1 Th. 1995 (+5% and -10%). An effective solution is to install an insert transformer because MA164 and MA267 cannot be uprated and cannot be broken by the JTR load. For planning the installation of the insert transformer it is necessary to carry out load forecasting, determination of the capacity of the insert transformer, division of the line of the farthest customer parts, determination of the location and selection of distribution substation accessories.The MA164 insert transformer (160 kVA) is installed at a distance of 416 m from the MA164 Transformer with a loading of 47%, while the MA267 insert transformer (200 kVA) is installed at a distance of 255 m from the MA164 Transformer with a loading of 47%. After installation the insert transformer MA164 transformer has a load of 77% and a end voltage of 211.9 V ($\Delta V_{MA164} = 9\%$), while the MA267 Transformer has a loading of 62% and an end voltage of 212.7 V ($\Delta V_{MA267} = 8\%$). With the appropriate conditions, the transformer can function properly and the customer's electrical equipment can function normally.

Keywords : *Selogabus Feeder, Overload, Drop Voltage, Insert Transformer*

1. Pendahuluan

Unit Layanan Pelanggan (ULP) Bojonegoro Kota adalah unit yang bergerak di bidang distribusi tenaga listrik, melayani penyaluran dan penjualan listrik ke pelanggan dari tegangan menengah 20 KV sampai tegangan rendah 400/230 V.ULP Bojonegoro Kota mempunyai 12 penyulang yang disuplai dari Gardu Induk Bojonegoro dan Gardu Induk Caruban. Salah satu contohnya adalah Penyulang Selogabus.

Penyulang Selogabus adalah penyulang terpanjang di ULP Bojonegoro Kota, dengan pangan JTM mencapai 137 kms. Penyulang ini mensuplai tenaga listrik ke dua kabupaten yaitu Kabupaten Bojonegoro dan Tuban dengan jumlah gardu distribusi mencapai 111 unit.

Berdasarkan SE DIR PT. PLN (Persero) No.0017/2014, 2014diketahui bahwa pembebanan transformator 80% - <100% terhadap kapasitas transformator, termasuk dalam kondisi *overload* atau kondisi kurang, sehingga beracuan pada standar tersebut dari 111 transformator pada Penyulang Selogabus terdapat 32 unit transformator *overload*, contohnya adalah transformator MA164 dengan pembebanan 101% dari kapasitas transformator 250 kVA dan MA267 dengan pembebanan 111% dari kapasitas transformator 250 kVA.

Masalah selanjutnyayang terjadi adalah bertambahnya panjang jaringan tegangan rendah (JTR) yang menimbulkan *drop voltage* lebih dari +5% dan -10% dari tegangan nominal 230 V (SPLN 1, 1995). Sehingga banyak pelanggan melaporkan bahwa peralatan elektronik pelanggan tidak dapat berfungsi dengan baik,

contoh *drop voltage* yang terjadi yaitu pada gardu MA 164 dan MA267. Pada gardu MA164 tegangan pada pelanggan terjauh terukur sebesar 187 V (23%) dengan jarak 1.189 m sedangkan pada gardu MA267 tegangan pada pelanggan terjauh terukur sebesar 189 V (22%) dengan jarak 1.1036 m.

Ada beberapa metode yang dapat dilakukan untuk mengatasi *overload* dan *drop voltage* pada transformator, yaitu dengan peningkatan atau *uprating* daya transformator, pemecahan beban JTR, dan pemasangan transformator sisipan. Berdasarkan SK GM PT. PLN (Persero) UID Jatim No.0026.K, 2021 diketahui bahwa kapasitas maksimal transformator distribusi pasangan luar adalah 250 kVA, sehingga opsi *uprating* daya transformator tidak bisa dilakukan. Opsi kedua adalah pemecahan beban JTR, opsi ini tidak efektif untuk dilakukan karena besarnya beban yang harus dialihkan transformator MA164 ataupun MA267, selain itu pembebanan transformator sekitarnya yang sudah diatas 60%. Sehingga opsi yang paling efektif untuk mengatasi kedua masalah yang terjadi yaitu pemasangan transformator sisipan.

Untuk melakukan simulasi pemasangan transformator sisipan tersebut, maka digunakan aplikasi ETAP 12.6. Aplikasi tersebut membantu dalam menentukan dimana lokasi pemasangan transformator sisipan yang paling efektif berdasarkan beban dan panjang penghantar yang ada. Selain itu, ETAP 12.6 digunakan untuk mengetahui berapa nilai tegangan ujung pada pelanggan terjauh dari transformator dan presentase pembebanan pada transformator.

2. Tinjauan Pustaka

2.1 Gardu Distribusi

Dalam pembangunan gardu distribusi ada beberapa aspek

* Korespondensi: harrij@polinema.ac.id

a) Prodi Sistem Kelistrikan, Jurusan Teknik Elektro, Polinema.
Jalan Soekarno-Hatta No. 9 Malang 65141

b) Prodi Teknik Listrik, Jurusan Teknik Elektro, Polinema.
Jalan Soekarno-Hatta No. 9 Malang 65141

yang harus diperhatikan, antara lain optimalisasi biaya, permintaan pelanggan, dan peraturan pemerintah daerah setempat. Selain itu, aspek estetika keindahan juga bisa menjadi dasar bagi pelanggan untuk memilih jenis gardu distribusi yang akan dipasang. Gardu distribusi dibedakan menjadi dua yaitu gardu pasangan luar dan pasangan dalam.

2.1.1 Transformator Distrbusi

Transformator distribusi adalah peralatan tenaga listrik yang mempunyai fungsi menyalurkan tenaga listrik dari suatu level tegangan menuju level tegangan dibawahnya, pada frekuensi yang sama. Transformator distribusi yang digunakan adalah transformator *step down*, transformator ini mengubah tegangan menengah 20 kV menjadi tegangan rendah 400/230 V.

2.1.2 Pembebanan Transformator

Menurut SE DIR PT. PLN (Persero) No.0017/2014, 2014 diketahui bahwa pembebanan transformator <80% dari kapasitas transformator masuk dalam kondisi cukup, transformator dengan pembebanan 80%-<100% termasuk dalam kondisi *overload* atau kondisi kurang, dan apabila pembebanan $\geq 100\%$ maka termasuk dalam kondisi buruk. Persamaan berikut dapat digunakan untuk melihat besar kapasitas transformator yang ada.

$$\text{Kapasitas trafo (kVA)} = \frac{(I_R \times V_R - N) + (I_S \times V_S - N) + (I_T \times V_T - N)}{1000}$$

$$\text{Pembebanan trafo (\%)} = \frac{\text{kVA Beban}}{\text{kVA Transformator}} \times 100\%$$

2.1.3 Peramalan Beban

Peramalan beban adalah perhitungan mengenai prediksi suatu nilai dimasa yang akan datang dengan memperhatikan data masa lalu atau saat ini baik secara matematik maupun statistik. Metode peramalan beban yang digunakan dalam penelitian ini adalah metode *Least Square*, karena metode ini dapat dipakai untuk memperkirakan beban puncak yang akan terjadi beberapa tahun yang akan datang serta berdasarkan keberagaman jenis konsumen yang disuplai oleh gardu distribusi, yaitu tidak hanya konsumen rumah tangga, tetapi juga konsumen industri dan komersial. Persamaan penentuan parameter metode Least Square sebagai berikut:

$$Y_n = a + bx$$

a dan b= koefisien

Y = diasumsikan Jumlah Beban (kVA)

n = banyak tahun

x = waktu tertentu dalam bentuk kode

2.2 Transformator Sisipan

Transformator sisipan merupakan gardu tambahan yang dipasang untuk mengatasi *overload* dan *drop voltage* yang ditimbulkan oleh transformator pada gardu sebelumnya. Transformator sisipan menjadi alternatif untuk mengalihkan sebagian beban dari transformator yang sudah *overload* ke transformator baru yang akan disisipkan. Selain itu, dengan menyisipkan transformator baru ke dalam jaringan dapat mengurangi jarak pelayanan dari transformator distribusi yang sudah ada, sehingga jaringan tegangan rendah semakin pendek

dan rugi tegangan juga akan semakin rendah.

2.2.1 Letak Transformator Sisipan

Transformator yang letaknya terlalu jauh dengan beban yang dilayaninya menyebabkan rugi tegangan yang besar. Sehingga perlu diperhatikan jarak maksimum dari transformator distribusi tersebut terhadap pelanggan.

$$l = \frac{10\% \times V}{I_{WBP} \times R} \quad (2.11)$$

Keterangan:

l = Jarak penempatan (km)

R = Tahanan penghantar (Ω/m)

I = Arus yang mengalir penghantar (A)

V = Tegangan pada penghantar (V)

10% = Efisiensi saluran

2.3 Kualitas Daya Listrik

Secara umum, baik buruknya sistem penyaluran dan distribusi tenaga listrik terutama adalah ditinjau dari kualitas daya yang diterima oleh konsumen yang meliputi kapasitas daya yang memenuhi dan tegangan yang selalu konstan dan nominal.

2.3.1 Resistansi Penghantar

Resistansi adalah tahanan suatu penghantar baik itu pada saluran transmisi maupun distribusi yang menyebabkan kerugian daya. Semakin panjang sebuah jaringan, nilai resistansinya akan semakin besar. Sehingga *drop voltage* yang terjadi juga semakin besar. Maka:

$$R = \rho \frac{l}{a}$$

ρ = Hambatan Jenis ($CM\Omega/ft$)

L = Panjang penghantar (ft)

A = Luas Penampang (CM)

2.3.2 Drop Voltage

Berdasarkan SPLN 1, 1995, tentang ketentuan variasi tegangan pelayanan bahwa variasi tegangan pelayanan ditetapkan maksimum +5% minimum -10% terhadap tegangan nominal. Tegangan jatuh atau *drop voltage* atau juga rugi tegangan adalah perbedaan tenaga kirim dan tenaga terima karena adanya impedansi pada penghantar. Menurut (Rizki & Ervianto, 2019) adapun penyebab jatuh tegangan adalah: beban (A) yang mengalir pada saluran, rendahnya tegangan yang diberikan dari transformator distribusi, nilai tahanan (R) dan reaktansi (X_L) pada saluran, panjang saluran dan faktor daya

Drop voltage dalam persentase:

$$\Delta V (\%) = \frac{V_S - V_R}{V_R} \times 100\%$$

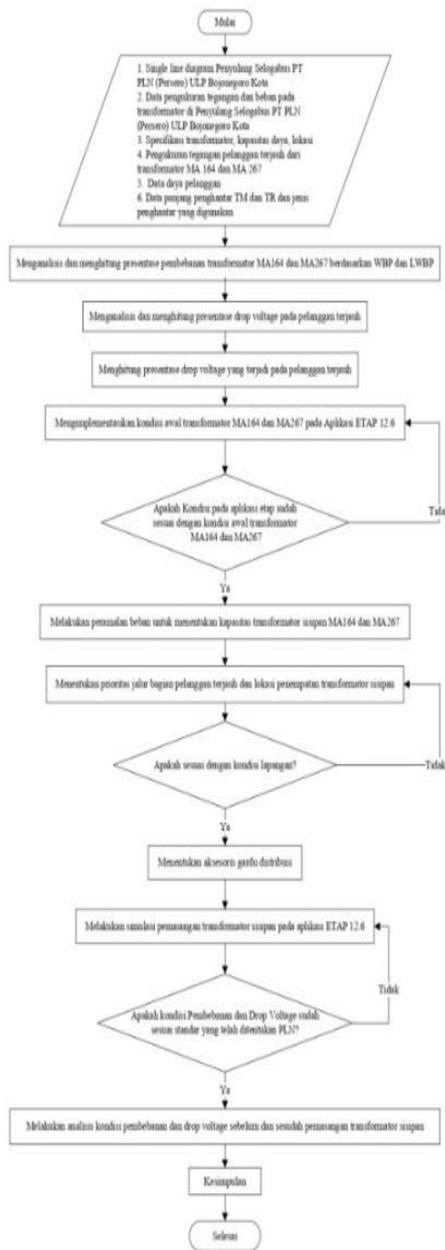
Keterangan:

ΔV = *Drop voltage* (V)

V_S = Tegangan awal (V)

V_R = Tegangan akhir (V)

3. Metode Penelitian



Gambar 3.1 Langkah Analisis Data

4. Pembahasan

4.1 Keadaan Pembebanan dan Tegangan Ujung Transformator MA164 dan MA267

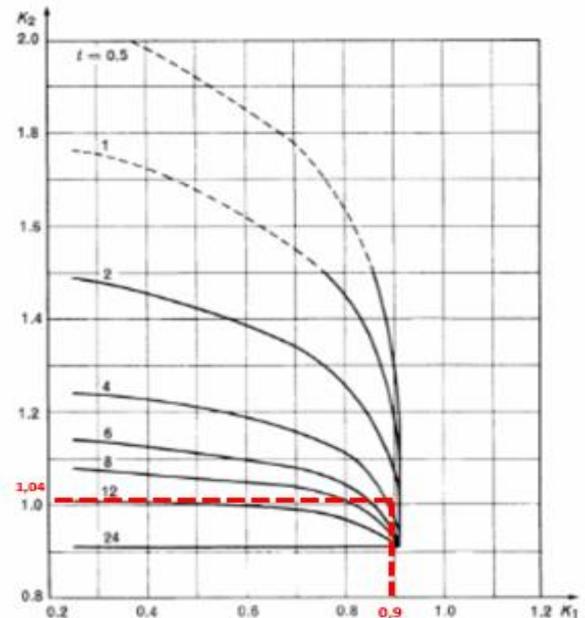
4.2.1 Transformator MA164

Gardu MA164 adalah gardu distribusi dengan transformator berkapasitas 250 kVA yang mensuplai pelanggan terbesar yaitu pelanggan rumah tangga, selain itu terdapat juga pelanggan komersil berupa perkantoran, rumah makan dan rumah ibadah, dan pelanggan bisnis berupa pasar dan peternakan.

Tabel 4. 1 Hasil Pengukuran LWBP dan WBP Trafo MA164

Waktu Pengukuran	Hasil Pengukuran							Pembebanan Transformator (%)	
	Tegangan Panel (V)			Arus (A)					
	V_{R-N}	V_{S-N}	V_{T-N}	I_R	I_S	I_T	I_N		
LWBP	06/05/2019 12:01	230	233	231	266	245	248	89	70%
	14/07/2020 11:54	232	230	233	282	265	290	101	78%
	16/10/2021 12:40	231	234	232	320	318	334	126	90%
WBP	28/05/2019 19:38	228	230	229	302	291	290	137	81%
	14/07/2020 18:25	229	230	230	322	340	318	147	90%
	16/10/2021 18:30	229	231	230	370	374	368	135	102%

Setelah mengetahui pembebanan transformator terbesar terjadi saat WBP (18:00-22:00), maka perlu dipertimbangkan apakah pembebanan lebih yang terjadi masih diizinkan atau tidak. Berdasarkan Gambar 4.2, diketahui bahwa dengan nilai $K_1 = 0,9$ maka nilai K_2 maksimal yang diizinkan adalah sebesar 1,04 (104% dari kapasitas transformator) dengan waktu operasi selama 4 jam. Jadi dengan rata-rata pembebanan WBP (K_2) yang terjadi pada transformator MA164 sebesar 1,02 maka pembebanan transformator tersebut masih memenuhi standar dan sesuai SPLN 17: 1979, namun sudah relatif mendekati batas standar sehingga dapat dilakukan pemasangan transformator sisipan untuk mengurangi pembebanan lebih yang terjadi.



Gambar 4. 1 Grafik Pembebanan Transformator ONAN/ONAF MA164 dengan Suhu Lingkungan 30°C

Transformator MA164 memiliki 2 Jurusan yang memiliki pelanggan terjauh dengan jarak 1.189 m. Penghantar yang digunakan adalah jenis kabel NFA2X 70 mm². Berdasarkan pengukuran yang dilakukan pada Waktu Beban Puncak (WBP) diketahui bahwa tegangan yang terukur sebesar 187 V, sedangkan pada Luar Waktu Beban Puncak (LWBP) diketahui bahwa tegangan yang terukur sebesar 190 V. Sesuai dengan SPLN 1, 1995 maka *drop voltage* yang terjadi sudah melebihi batas -10%

dari tegangan nominal.

$$\begin{aligned} \text{Drop voltage (\%)} &= \frac{V_s - V_r}{V_r} \times 100\% \\ &= \frac{230 - 187}{187} \times 100\% \\ &= 23\% \end{aligned}$$

Tabel 4. 2 Hasil Perhitungan Drop Voltage MA164 (%)

Waktu Pengukuran	Hasil Pengukuran				V Drop (%)
	Tegangan Panel (V)		Tegangan pelanggan terjauh (V)		
	V _{R-N}	V _{S-N}	V _{T-N}	V _{T-N}	
WBP	229	231	230	187	23%
LWBP	231	234	232	190	22%

4.2.2 Transformator MA267

Gardu MA267 adalah gardu distribusi dengan transformator berkapasitas 250 kVA yang mensuplai pelanggan terbesar yaitu pelanggan rumah tangga, selain itu terdapat juga pelanggan komersil berupa kantor desa, sekolah, rumah makan dan rumah ibadah, dan pelanggan bisnis berupa pasar, UMKM dan pabrik.

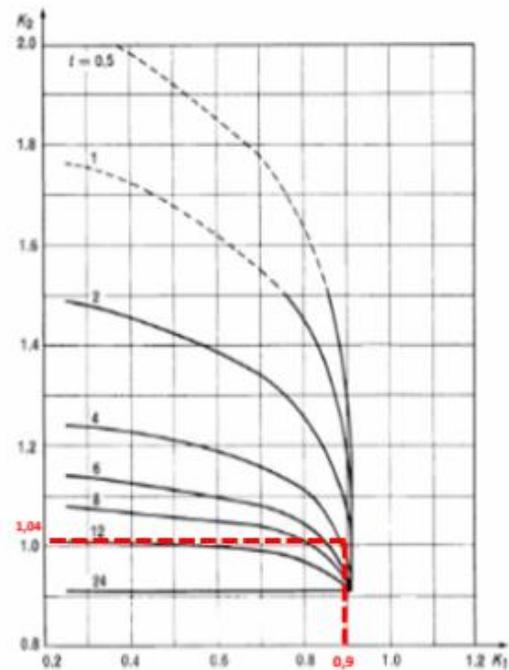
Tabel 4. 3 Hasil Pengukuran LWBP dan WBP Trafo MA267

Waktu Pengukuran	Hasil Pengukuran							Pembebanan Transformator (%)
	Tegangan Panel (V)			Arus (A)				
	V _{R-N}	V _{S-N}	V _{T-N}	I _R	I _S	I _T	I _N	
16/01/2019 11:04	233	231	230	215	244	298	96	70%
LWBP 01/09/2020 11:34	231	232	234	278	314	320	114	85%
29/08/2021 12:30	234	235	235	310	350	367	144	96%
10/02/2019 19:01	228	228	230	299	340	362	132	92%
WBP 07/09/2020 19:46	231	231	230	330	379	399	172	102%
15/10/2021 20:11	230	231	231	370	404	437	165	111%

Setelah mengetahui pembebanan transformator terbesar terjadi saat WBP (18:00-22:00), maka perlu dipertimbangkan apakah pembebanan lebih yang terjadi masih diizinkan atau tidak. Berdasarkan Gambar 4.2, diketahui bahwa dengan nilai K₁ = 0,96 maka nilai K₂ maksimal yang diizinkan adalah sebesar 1,04 (104% dari kapasitas transformator) dengan waktu operasi selama 4 jam. Jadi dengan rata-rata pembebanan WBP (K₂) yang terjadi pada transformator MA267 sebesar 1,11 maka pembebanan transformator tersebut sudah melebihi standar dan sesuai SPLN 17: 1979, sehingga dapat dilakukan pemasangan transformator sisipan untuk mengurangi pembebanan lebih yang terjadi.

Transformator MA267 memiliki 2 Jurusan yang memiliki pelanggan terjauh dengan jarak 1.036 m. Penghantar yang digunakan adalah jenis kabel NFA2X 70 mm². Untuk mengetahui drop voltage yang terjadi, dilakukan pengukuran tegangan pada kWh meter pelanggan terjauh dari titik lokasi transformator MA267. Berdasarkan pengukuran yang dilakukan pada Waktu Beban Puncak (WBP) diketahui bahwa tegangan yang terukur sebesar 189 V, sedangkan pada Luar Waktu Beban Puncak (LWBP) diketahui bahwa tegangan yang terukur sebesar 192 V. Sesuai dengan SPLN 1, 1995 maka *drop voltage* yang terjadi sudah

melebihi batas -10% dari tegangan nominal.



Gambar 4. 2 Grafik Pembebanan Transformator ONAN/ONAF MA267 Dengan Suhu Lingkungan 30°C

$$\begin{aligned} \text{Drop voltage (\%)} &= \frac{V_s - V_r}{V_r} \times 100\% \\ &= \frac{230 - 189}{189} \times 100\% \\ &= 22\% \end{aligned}$$

Tabel 4. 4 Hasil Perhitungan Drop Voltage MA267 (%)

Waktu Pengukuran	Hasil Pengukuran				V Drop (%)
	Tegangan Panel (V)		Tegangan pelanggan terjauh (V)		
	V _{R-N}	V _{S-N}	V _{T-N}	V _{T-N}	
WBP	230	231	231	189	22%
LWBP	234	235	235	192	22%

4.2 Perencanaan Pemasangan Transformator Sisipan

4.3.1 Peramalan Beban dan Penentuan Kapasitas Trafo

Peramalan beban dilakukan untuk menentukan kapasitas transformator sisipan yang digunakan. Metode peramalan beban yang digunakan adalah metode *least square*.

1. Transformator MA164

Tabel 4. 5 Beban Puncak di Gardu MA164

Tahun	2019	2020	2021
Beban Puncak (kVA)	202,20	225,08	255,76
Beban Puncak (%)	81	90	102

Tabel 4. 6 Peramalan Beban MA164 dengan Metode *Least Square*

No	Tahun	Beban Puncak (kVA)	X	XY	X ²
1	2019	202,20	-1	-202,2	1
2	2020	225,08	0	0	0
3	2021	255,76	1	255,76	1
n = 3		ΣY = 683,04	0	ΣXY = 53,56	ΣX ² = 2

Berdasarkan tabel 4.7 dapat dilihat hasil dari peramalan beban untuk transformator MA164 setelah dipasang transformator sisipan, sehingga dipilih transformator berkapasitas 160 kVA untuk transformator sisipan MA164 karena akan mengalami pembebanan transformator yang sesuai dengan standar SE DIR 0017E/2014 kurang lebih hingga Tahun 2024.

Tabel 4. 7 Peramalan Beban MA164 Sesuai Dengan Kapasitas Trafo Sisipan

Kapasitas Transformator Sisipan (kVA)	X	Tahun	Perkiraan Beban (kVA)	Pertumbuhan Beban (%)	Pembebanan Transformator MA164 (%)		Pembebanan Transformator Sisipan (%)
					Sebelum Pemasangan Transformator Sisipan (%)	Sesudah Pemasangan Transformator Sisipan (%)	
100 kVA	2	2022	281,24	9,96	112	80	32
	3	2023	308,02	9,52	123	88	35
	4	2024	334,8	8,69	134	96	38
	5	2025	361,58	8,00	145	103	41
	6	2026	388,36	7,41	155	111	44
160 kVA	2	2022	281,24	9,96	112	69	44
	3	2023	308,02	9,52	123	75	48
	4	2024	334,8	8,69	134	82	52
	5	2025	361,58	8,00	145	88	56
	6	2026	388,36	7,41	155	95	61

2. Transformator MA267

Tabel 4. 8 Beban Puncak di Gardu MA164

Tahun	2019	2020	2021
Beban Puncak (kVA)	228,95	255,55	279,37
Beban Puncak (%)	92	102	111

Tabel 4. 9 Peramalan Beban MA267 dengan Metode *Least Square*

No	Tahun	Beban Puncak (kVA)	X	XY	X ²
1	2019	228,95	-1	-228,95	1
2	2020	255,55	0	0	0
3	2021	279,37	1	279,37	1
n = 3		ΣY = 763,87	0	ΣXY = 50,42	ΣX ² = 2

Berdasarkan tabel 4.10 dapat dilihat hasil dari peramalan beban untuk transformator MA267 setelah dipasang transformator sisipan, sehingga dipilih transformator berkapasitas 200 kVA untuk transformator sisipan MA164 karena akan mengalami pembebanan transformator yang sesuai dengan standar SE DIR 0017E/2014 kurang lebih hingga Tahun 2024 sebesar 79%.

Tabel 4. 10 Peramalan Beban MA267 Sesuai Dengan Kapasitas Trafo Sisipan

Kapasitas Transformator Sisipan (kVA)	X	Tahun	Perkiraan Beban (kVA)	Pertumbuhan Beban (%)	Pembebanan Transformator MA267 (%)		Pembebanan Transformator Sisipan
					Sebelum Pemasangan Transformator Sisipan	Sesudah Pemasangan Transformator Sisipan	
160 kVA	2	2022	305,043	9,19	122	74	48
	3	2023	330,253	8,26	132	81	52
	4	2024	355,463	7,63	142	87	55
	5	2025	380,673	7,09	152	93	59
	6	2026	405,883	6,62	162	99	63
	200 kVA	2	2022	305,043	9,19	122	68
3		2023	330,253	8,26	132	73	59
4		2024	355,463	7,63	142	79	63
5		2025	380,673	7,09	152	85	68
6		2026	405,883	6,62	162	90	72

4.3.2 Pembagian Jalur Bagian Pelanggan Terjauh Transformator MA164 dan MA267

Pembagian jalur bagian pelanggan terjauh dilakukan untuk melihat kondisi tegangan ujung masing masing jalur bagian dan memprioritaskan jalur bagian dengan kondisi drop voltage terbesar.

1. Transformator MA164

Tabel 4. 11 Tegangan Ujung Setiap Jalur Bagian MA164

Jalur Bagian	Beban Pelanggan (kVA)	Panjang Penghantar (m)	Tegangan Ujung (V)			Drop Voltage (%)
			R	S	T	
A	124,94	692	199,2			15
B	46,69	1.013	198,4			15,4
C	37,78	1.189			187,2	23
D	46,29	1.078		186,4		24

Jalur bagian A, B, C dan D memiliki drop voltage yang tidak sesuai dengan standar dan harus diperbaiki. Namun, jalur bagian C dan D menjadi prioritas utama untuk lokasi pemasangan transformator sisipan karena drop voltage yang terjadi pada kedua jalur bagian tersebut memiliki nilai tertinggi dibandingkan jalur bagian A dan B.

2. Transformator MA267

Tabel 4. 12 Tegangan Ujung Setiap Jalur Bagian

Jalur Bagian	Beban Pelanggan (kVA)	Panjang Penghantar (m)	Tegangan Ujung (V)			Drop Voltage (%)
			R	S	T	
A	98,47	589		204,9		13
B	38,57	536	201,6			14
C	52,52	506			200,1	15
D	94,82	1.036	189,1			22

Berdasarkan *drop voltage* yang terjadi, maka penempatan transformator sisipan diprioritaskan pada beban jalur bagian D karena drop voltage yang terjadi pada jalur bagian tersebut memiliki nilai tertinggi apabila dibandingkan jalur bagian A, B, dan C.

4.3.3 Penentuan Lokasi Pemasangan Transformator Sisipan

Penentuan lokasi pemasangan transformator sisipan menjadi faktor penting yang diperlukan untuk merencanakan pemasangan transformator sisipan yang dapat menggunakan rumus berikut.

$$L = \frac{V_{vc} \times 10\%}{i \text{ beban puncak} \times R \text{ saluran}}$$

Untuk mencari I beban puncak pada transformator dapat digunakan arus rata rata dengan rumus berikut.

$$I_{Rata\ Rata} = \frac{I_R + I_S + I_T}{3}$$

Untuk R saluran menggunakan rumus berikut.

$$R = \rho \frac{L}{A}$$

Sehingga didapatkan hasil perhitungan jarak lokasi pemasangan transformator sisipan MA164 dan MA267 pada Tabel 4.13.

Tabel 4. 13 Hasil Perhitungan Lokasi Pemasangan Trafo Sisip

Transformator	Arus Rata Rata (A)	ρ (Ωm)	L Saluran (m)	A (mm^2)	R (Ω)	Jarak Penempatan Trafo Sisip (m)
MA164	370,6	$2,852 \times 10^{-8}$	1.189	70	0,484	223
MA267	403,6	$2,852 \times 10^{-8}$	1.036	70	0,422	255

Berdasarkan Tabel 4.13 didapatkan lokasi pemasangan transformator sisipan MA164 berada pada jarak 223 m di jalur bagian C dan D dari Transformator MA164 yaitu pada lokasi Tiang A04030. Namun berdasarkan survei lokasi, Tiang A04033 lebih sesuai untuk pemasangan transformator sisipan yaitu berjarak 416 m dari Transformator MA164. Sedangkan transformator sisipan MA267 berada pada jarak 255 m di jalur bagian D dari Transformator MA267 yaitu pada lokasi Tiang D09087.

4.3 Analisis Pemasangan Transformator Sisipan

4.4.2 Pembebanan MA164 dan MA267 setelah Pemasangan Transformator Sisipan

Pada Tabel 4.14 dapat membuktikan bahwa Transformator MA164 dan MA267 sudah tidak mengalami *overload* setelah dipasang transformator sisipan. Transformator MA164 memiliki pembebanan sebesar 78% dan pembebanan transformator sisipan sebesar 45% pada lokasi tiang A04033. Pada lokasi tiang D09087, Transformator MA267 memiliki pembebanan sebesar 62% dan pembebanan transformator sisipan sebesar 67%. Berdasarkan SE DIR PT. PLN (Persero) No.0017, 2014, seluruh hasil pembebanan sesudah pemasangan transformator sisipan sudah sesuai.

Tabel 4. 14 Kondisi Pembebanan Transformator MA164 dan MA267 Sebelum dan Sesudah Pemasangan Transformator Sisipan

Transformator	Lokasi Tiang	Kondisi Pembebanan Transformator (%)			Kondisi Pembebanan Transformator Sisipan (%)	Kapasitas Transformator Sisipan (kVA)	Kesesuaian
		Standar PLN (SE DIR 0017/E/2014)	Sebelum	Sesudah			
MA164	A04033	80	102	77	47	160	Sesuai
MA267	D09087	80	111	62	67	200	Sesuai

4.4.3 Kondisi Drop Voltage MA164 dan MA267 setelah Pemasangan Transformator Sisipan

Pada Tabel 4.15 diketahui bahwa terjadi perubahan drop voltage pada pelanggan terjauh dari Transformator MA164 dan

MA267. Pelanggan terjauh dari Transformator MA164 yaitu Jalur Bagian C memiliki perubahan drop voltage dari 23% menjadi 9%. Untuk Transformator MA267 memiliki perubahan drop voltage dari 22% menjadi 8% pada pelanggan terjauh yaitu di Jalur Bagian D. Berdasarkan SPLN 1, 1995, seluruh hasil tegangan ujung sesudah pemasangan transformator sisipan sudah sesuai yaitu + 5% dan - 10% dari tegangan nominal.

Tabel 4. 15 Hasil *drop voltage* Transformator MA164 dan MA267 Sesudah Pemasangan Transformator Sisipan

Transformator	Lokasi	Jalur Bagian	Tegangan Ujung (V)		Drop voltage (%)		Standar PLN (SPLN No.1 tahun 1995)	Kesesuaian
			Sebelum	Sesudah	Sebelum	Sesudah		
MA164	A04033	A	199,2	208,1	15	10	+5 s.d. -10	Sesuai
		B	198,4	209,5	15,4	10	+5 s.d. -10	Sesuai
		C	187	211,9	23	9	+5 s.d. -10	Sesuai
		D	186,4	211,3	24	9	+5 s.d. -10	Sesuai
MA267	D09087	A	204,9	208,3	13	10	+5 s.d. -10	Sesuai
		B	201,6	216,1	14	6	+5 s.d. -10	Sesuai
		C	200,1	212,3	15	8	+5 s.d. -10	Sesuai
		D	189	212,7	22	8	+5 s.d. -10	Sesuai

5. Kesimpulan

Dari hasil analisis dan pembahasan, dapat disimpulkan bahwa :

- 1) Kondisi awal pembebanan Transformator MA164 dan MA267 sebelum dilakukan pemasangan transformator sisipan adalah 102% dan 111%. Hal tersebut tidak sesuai dengan SE DIR PT. PLN (Persero) No.0017, 2014 (<80%). Pembebanan lebih MA164 ($K_2 = 1,02$) relatif mendekati batas yang diizinkan ($K_2 = 1,04$) dengan waktu operasi selama 4 jam dan MA267 ($K_2 = 1,11$) yang sudah melewati batas yang diizinkan.
- 2) Kondisi *drop voltage* pada pelanggan terjauh Transformator MA164 dan MA267 sebelum pemasangan transformator sisipan adalah 23% (187 V) dan 22% (189 V) yang tidak sesuai dengan SPLN No 1 Tahun 1995 (+5% dan -10%).
- 3) Pemasangan transformator sisipan dapat direncanakan dengan beberapa tahapan yaitu melakukan peramalan beban, penentuan kapasitas transformator sisipan, penentuan lokasi transformator sisipan dan penentuan aksesoris gardu sisipan.
- 4) Lokasi pemasangan transformator sisipan yang didapatkan adalah Tiang A04033 dengan jarak 416 m dari Transformator MA164 dan Tiang D09087 dengan jarak 225 m dari Transformator MA267.
- 5) Kapasitas transformator yang digunakan pada transformator sisipan MA164 adalah 160 kVA dengan peramalan beban ± 3 tahun. Untuk transformator sisipan MA267 adalah 200 kVA dengan peramalan beban ± 4 tahun.
- 6) Kondisi pembebanan transformator sisipan setelah pemasangan adalah 47% (TS MA164) dan 67% (TS MA267) yang sudah sesuai dengan SE DIR PT. PLN (Persero) No.0017, 2014 (<80%). Kondisi pembebanan transformator MA164 dan MA267 berubah menjadi 77% dan 62%.
- 7) Setelah pemasangan transformator sisipan, kondisi *drop voltage* pada Transformator MA164 dan MA267 adalah

9%(211.9 V) and 8% (212.7 V) yang sudah sesuai dengan SPLN No 1 Tahun 1995 (+5% dan -10%).

- 8) Keuntungan pemasangan transformator sisipan adalah memperbaiki nilai tegangan ujung dan pembebanan transformator. Transformator sisipan juga dapat dijadikan sebagai opsi pecah beban JTR dan perluasan jaringan.

Daftar Pustaka

- [1] Badrudin. (2013). Modul II Sistem Distribusi. Pusat Pengembangan Bahan Ajar.
- [2] Dijiteng Marsudi. (2006). Operasi Sistem Tenaga Listrik. In 2006 (hal. 32–36).
- [3] Husodo, B. Y. dan F. (2016). Analisis Vector Group pada Hubungan Paralel Transformator Unit Gardu Bergerak. 7(3), 130–139.
- [4] IEC 60076-1. (1977). Power Transformer. Nature, 268(5620), 482. <https://doi.org/10.1038/268482a0>
- [5] PUIL 2000. (2000). Persyaratan Umum Instalasi Listrik 2000 (PUIL 2000). DirJen Ketenagalistrikan, 2000(Puil), 1–133.
- [6] SE DIR PT. PLN (Persero) No.0017. (2014). Surat Edaran Direksi PT. PLN (Persero) No. 0017.E/DIR/2014 Tentang Metode Pemeliharaan Trafo Distribusi Berbasis Kaidah manajemen Aset Halaman 8 Bagian 6.6.2.6 Matriks Online Assessment Tier-1. 8 Bagian 6.6.2.6.
- [7] SK DIR PT. PLN (Persero) No.475.K. (2010). Buku 1 Kriteria Enjinering Konstruksi Jaringan Distribusi Tenaga Listrik. PT PLN (Persero), 170.