

STUDI PENENTUAN JARAK OPTIMAL ARRESTER PADA TRANSFORMATOR DAYA DI GARDU INDUK 150 kV SIANTAN

Michael Lordian Tarihoran¹, Danial², Managam Rajagukguk³

mikaellordian@gmail.com¹, danial.noah@ee.untan.ac.id²,

managam.rajagukguk@ee.untan.ac.id³

Universitas Tanjungpura

ABSTRAK

Energi listrik merupakan faktor penting dalam menunjang kehidupan dan aktivitas masyarakat, terutama untuk penerangan serta sebagai sumber utama di sektor industri. Saluran transmisi listrik berperan dalam menyalurkan energi listrik secara efisien dan stabil kepada konsumen. Salah satu komponen utama dalam sistem transmisi adalah Arrester, yang berfungsi melindungi peralatan dari kerusakan akibat lonjakan tegangan petir dan gangguan hubung singkat. Arrester membatasi tegangan lebih agar tetap berada di bawah tingkat isolasi dasar peralatan. Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi penempatan arrester terhadap transformator pada Gardu Induk 150 kV Siantan. Evaluasi dilakukan dengan menganalisis data sambaran petir, spesifikasi transformator, spesifikasi arrester, serta spesifikasi kabel transmisi. Hasil perhitungan menunjukkan bahwa jarak arrester dengan transformator sebesar 3 meter masih sesuai standar, dengan jarak minimum 2,1 meter dan jarak maksimum 5,44 meter. Standar SPLN T5.007:2014 menetapkan jarak minimum 2,6 meter dan maksimum 7,2 meter, sehingga penempatan yang digunakan masih berada dalam batas toleransi. Dari hasil analisis ini, dapat disimpulkan bahwa penempatan arrester pada Gardu Induk 150 kV Siantan telah sesuai dengan standar dan mampu memberikan proteksi optimal terhadap gangguan tegangan lebih.

Kata Kunci: Arrester, Jarak Minimal, Jarak Maksimum, Transformator, SPLN T5.007:2014.

ABSTRACT

Electrical energy is an essential factor in supporting human life and activities, particularly for lighting and as a primary power source in the industrial sector. Transmission lines play a crucial role in efficiently and stably delivering electrical energy to consumers. One of the key components in the transmission system is the arrester, which functions to protect equipment from damage caused by lightning overvoltage and short-circuit faults. Arresters limit overvoltage to remain below the basic insulation level of the equipment. This study aims to evaluate the placement of arresters in relation to transformers at the 150 kV Siantan Substation. The evaluation was conducted by analyzing lightning strike data, transformer specifications, arrester specifications, and transmission cable specifications. The calculation results show that the arrester placement at a distance of 3 meters from the transformer remains within standard limits, with a minimum distance of 2.1 meters and a maximum distance of 5.44 meters. According to SPLN T5.007:2014, the standard minimum distance is 2.6 meters, and the maximum distance is 7.2 meters, indicating that the placement used remains within the allowable tolerance range. Based on this analysis, it can be concluded that the placement of arresters at the 150 kV Siantan Substation complies with standards and is capable of providing optimal protection against overvoltage disturbances.

Keywords: Arrester, Minimum Distance, Maximum Distance, Transformer, SPLN T5.007:2014.

PENDAHULUAN

Energi listrik merupakan faktor penting untuk menunjang kehidupan dan kegiatan masyarakat terutama untuk keperluan penerangan, serta sebagai sumber utama dalam sektor industri [1]. Kebutuhan energi listrik yang semakin besar harus diikuti stabilitas yang semakin baik agar keselamatan produksi dan konsumsi energi listrik dapat terjamin baik dari segi teknis maupun parameter kebaikan energi listrik yaitu tegangan, frekuensi dan kehandalan. Adanya gangguan yang terjadi pada sistem akan mengakibatkan turunnya

kontinuitas penyaluran energi listrik.

Gangguan yang terjadi pada penyaluran energi listrik dapat diakibatkan bila sambaran pada kawat penghantar di saluran transmisi yang menyebabkan gelombang surja petir dan surja hubung merambat menuju peralatan di gardu induk. Dimana besar tagangan puncaknya dapat menggagalkan isolasi peralatan [2]. Untuk itu dalam melindungi peralatan-peralatan tersebut dalam gardu induk dikenal “Koordinasi Isolasi”.

Koordinasi isolasi adalah pemilihan kekuatan isolasi. Koordinasi isolasi pada gardu induk dapat didefinisikan sebagai korelasi antara tahanan-tahanan isolasi pada setiap peralatan penting di gardu induk. Faktor Perlindungan merupakan parameter dalam menentukan tingkat kualitas koordinasi isolasi pada peralatan-peralatan pada gardu induk. Faktor perlindungan pada umumnya bernilai 20% dan faktor perlindungan yang baik tidak boleh berada di bawah 20%. Tujuan koordinasi isolasi adalah untuk melindungi peralatan dan penghematan (ekonomis). Perlindungan peralatan pada gardu induk biasa menggunakan arrester yang dapat membatasi tegangan surja di bawah tingkat isolasi dasar peralatan. Setiap isolasi memiliki BIL (Basic Isolation Level) dari peralatan, dimana BIL merupakan tingkat isolasi suatu peralatan yang diperoleh dari tegangan puncak impuls standar, dimana kekuatan isolasi dari peralatan harus sama atau lebih besar dari BIL [3]. Penelitian koordinasi isolasi ini dilakukan pada gardu induk 150 kV Siantan karena adanya gangguan akibat petir yang sering terjadi pada isolasi, seperti tegangan lebih petir (Lightning over voltage) dan tegangan lebih surja hubung (Switching over voltage). Untuk itu perlu dilakukan analisa untuk menghitung tingkat isolasi serta penentuan BIL dari setiap peralatan untuk menghindari kegagalan-kegagalan isolasi pada gardu induk ketika bekerja sehingga konsep perlindungan terhadap peralatan dalam hal ini koordinasi isolasi dapat tercapai secara optimal. Untuk itu penulis mencoba membuat penelitian tugas akhir dengan judul “Studi Penentuan Jarak Optimal Arrester pada Transformator Daya di Gardu Induk 150 kV Siantan”.

METODE

Tahap Persiapan

1. Melakukan Studi Literatur

Studi literatur dilakukan untuk mendapatkan referensi materi, rumus-rumus perhitungan maupun standar atau ketentuan yang akan digunakan dalam penelitian dari buku, jurnal, *e-book* dan sebagainya yang berkaitan dengan penelitian ini untuk membantu penyelesaian tugas akhir ini.

2. Survei Lapangan

Penelitian ini dilakukan di PT. PLN (Persero) Unit Layanan Transmisi dan Gardu Induk 150 kV Siantan yang beralamat di Jl. Budi Utomo No.26, Siantan Hilir, Kecamatan Pontianak Utara, Kota Pontianak, Provinsi Kalimantan Barat 78243 merujuk pada Gambar 1 berikut.



Gambar 1 Lokasi gardu induk

3. Melakukan Pengumpulan Data

Pengumpulan data dilakukan dengan mendapatkan data spesifikasi transformator, data spesifikasi arrester, data spesifikasi kabel saluran udara terpasang, data jumlah sambaran petir, dan data luas wilayah.

Tahap Pelaksanaan

1. Melakukan Perhitungan

a. Tegangan Pengenal Arrester

Tegangan pengenal arrester adalah parameter penting yang harus dipilih dengan hati-hati untuk memastikan bahwa arrester dapat melindungi peralatan listrik secara efektif tanpa mengalami kerusakan selama operasi normal. Pemilihan tegangan pengenal yang tepat akan memastikan kinerja arrester yang optimal dalam melindungi sistem dari tegangan lebih. Tegangan pengenal dapat dihitung menggunakan Persamaan 3.1 sebagai berikut [2].

$$U_r = \text{Tegangan nominal} \times 110 \% \times \text{koefisien pentanahan kV} \quad (3.1)$$

Dimana:

$$U_r = \text{Tegangan pengenal (kV)}$$

Berikut adalah Tabel 1 yang menampilkan nilai koefisien pembumian (η) dari berbagai metode Pentanahan netral (IEC-62305-1)[16].

Tabel 1 Koefisien pentanahan netral

Metode Pentanahan Netral	Koefisien Pentanahan (η)
Solid Grounding (Langsung Dibumikan)	0,8
Resistansi Grounding (Melalui Tahanan)	0,6
Resistansi Grounding (Melalui Reaktansi)	1,2

b. Kerapatan Sambaran Petir ke Tanah

Salah satu usaha yang bisa dilakukan untuk meminimalkan kerusakan atau kerugian akibat sambaran petir adalah dengan mengidentifikasi potensi kejadian petir pada suatu daerah. Untuk menentukan jumlah potensi sambaran petir pada wilayah gardu induk 150 kV Siantan diperlukan data jumlah sambaran petir dan luas wilayah. Potensi terjadinya sambaran petir pada wilayah tersebut dapat dihitung dengan Persamaan 3.2 sebagai berikut [14]

$$N_G = \frac{\text{Jumlah Sambaran Petir}}{\text{Luas Wilayah}} \text{ sambaran/km}^2/\text{tahun} \quad (3.2)$$

Dimana:

$$N_G = \text{Kerapatan sambaran petir (sambaran /km}^2/\text{tahun)}$$

Nilai kerapatan sambaran petir digunakan sebagai acuan penentuan potensi petir pada suatu wilayah dapat dilihat pada Tabel 2 berikut ini [14].

Tabel 2 Kategori nilai kerapatan sambaran petir

No	Nilai Kerapatan Sambaran Petir	Kategori
1	6-9 Sambaran/km ² /tahun	Rendah
2	9-12 Sambaran/km ² /tahun	Sedang
3	12-15 Sambaran/km ² /tahun	Tinggi

c. Arus Puncak Petir

Arus puncak petir adalah nilai maksimum arus listrik yang mengalir saat terjadi sambaran petir. Sederhananya, ini adalah ukuran kekuatan atau intensitas sambaran petir. Semakin tinggi nilai arus puncaknya, semakin besar energi yang terkandung dalam sambaran petir tersebut. Untuk menghitung arus puncak petir dapat menggunakan Persamaan 3.3 sebagai berikut [17].

$$\hat{I} = I_p \times N_G^{0,3} \times e^{((- \alpha \times L_i) \times (- \beta \times A))} \text{ kA} \quad (3.3)$$

Dimana:

$$\hat{I} = \text{Arus puncak petir (kA)}$$

N_G = Kerapatan sambaran petir (sambaran /km²/tahun)

I_p = Arus puncak rata-rata sambaran petir (kA)

α = Faktor redaman kabel saluran (K)

L_i = Jarak antara menara transmisi (m)

β = Faktor redaman dalam tanah (Ωm)

A = Ketinggian awan terendah (m)

Impuls puncak sambaran petir digunakan sebagai acuan tingkat perlindungan petir dan kecuraman rata-rata dalam kA/ μs menggambarkan perubahan arus petir per mikrodetik adapun *Impuls* puncak sambaran petir dapat dilihat pada Tabel 3 berikut (IEC-62305-1) [16].

Tabel 3 Arus puncak sambaran petir

Parameter Arus	Simbol	Satuan	LPL I	LPL II	LPL III
Arus Puncak	I_p	kA	50	37,5	25
Kecuraman Rata-rata	di/dt	kA/us	200	150	100

Berikut adalah Tabel 4 yang menampilkan jarak antara menara transmisi (SPLN.13:1978) [18].

Tabel 4 Jarak antara menara transmisi

Tegangan Nominal	Tinggi tiang rata-rata	Rentang jarak rata-rata
66 kV	24-30 m	230-380 m
150 kV	28-36 m	350-450 m

Nilai faktor redaman kabel saluran (α) ditentukan berdasarkan bahan kabel yang digunakan dan nilainya dapat dilihat pada Tabel 5 berikut (IEC-62305-1) [16].

Tabel 5 Nilai faktor redaman bahan umum kabel saluran transmisi

Jenis kabel	Faktor redaman (α)
Aluminium	$4 \times 10^{-3} K$
Baja ringan	$6,5 \times 10^{-3} K$
Tembaga	$3,92 \times 10^{-3} K$
Baja tahan karat	$0,8 \times 10^{-3} K$

Nilai faktor redaman dalam tanah (β) ditentukan berdasarkan jenis tanah yang digunakan dan nilainya dapat dilihat pada Tabel 6 berikut (SNI 1726-2002) [19].

Tabel 6 Nilai faktor redaman berbagai jenis tanah

Jenis Tanah	Faktor Redaman (β)
Tanah Lempung Basah	$1,0 \times 10^{-5} \Omega m$
Tanah Pasir	$2,4 \times 10^{-4} \Omega m$
Batuan Kering	$4 \times 10^{-3} \Omega m$
Tanah Berbatu	$5 \times 10^{-2} \Omega m$

d. Kecuraman Gelombang Arus Datang

Kecuraman gelombang arus datang adalah laju perubahan arus listrik tertinggi yang terjadi saat sambaran petir. Dengan kata lain, ini adalah seberapa cepat arus petir meningkat dari nol hingga mencapai nilai puncaknya. Untuk menghitung kecuraman gelombang arus datang dapat menggunakan Persamaan 3.4 sebagai berikut [17].

$$\frac{di}{dt} = \frac{\hat{I} kA}{t_r \mu s} \quad (\text{kA}/\mu s) \quad (3.4)$$

Dimana:

$\frac{di}{dt}$ = Kecuraman gelombang arus datang (kA/ μs)

$\hat{I}$ = Arus puncak petir (kA)

t_r = Waktu naik arus puncak petir (μs)

Waktu naik arus adalah waktu yang dibutuhkan oleh arus sambaran petir untuk naik dari 10% ke 90% dari nilai arus puncaknya dan nilainya dapat dilihat pada Tabel 7 berikut (IEC-62305-1)[16].

Tabel 7 Rentang waktu naik arus berdasarkan profil sambaran petir

Kelas Sambaran	Waktu Naik Arus (μs)	Keterangan
Sambaran Langsung ke tanah	1-2 μs	Gelombang sangat cepat dengan efek induksi tinggi
Sambaran ke bangunan/tower	2-3 μs	Bergantung pada impedansi jalur sambaran
Sambaran jauh	3-5 μs	Efek induksi lebih dominan daripada arus langsung

e. Impedansi Saluran

Dalam menentukan impedansi surja, terlebih dahulu harus diketahui jenis kabel transmisi yang digunakan dan kawat transmisi 150 kV pada saluran transmisi gardu induk Siantan adalah jenis ACSR. Dimana diameter kawat ($d=17,49$ mm). Sebelum menghitung impedansi surja, maka tinggi tiang kawat (h) harus ditentukan terlebih dahulu, seperti pada Persamaan 3.5 sebagai berikut [3].

$$Z = 60 \ln \frac{2h}{r} (\Omega) \quad (3.5)$$

Dimana:

Z = Impedansi surja (Ω)

r = Jari-jari kawat saluran (mm)

h = Tinggi tiang kawat di atas tanah (m)

f. Kecuraman Gelombang Tegangan Datang

Kecuraman gelombang tegangan datang adalah laju perubahan tegangan tertinggi yang terjadi saat gelombang surja (biasanya diakibatkan oleh sambaran petir) memasuki suatu sistem tenaga listrik. Sederhananya, ini adalah seberapa cepat tegangan naik dari nilai normal menjadi nilai puncaknya dalam waktu yang sangat singkat. Untuk menghitung kecuraman gelombang tegangan datang dapat dihitung menggunakan Persamaan 3.6 sebagai berikut [17].

$$\frac{du}{dt} = \frac{1}{2} \times Z \times \frac{di}{dt} (kV/\mu s) \quad (3.6)$$

Dimana:

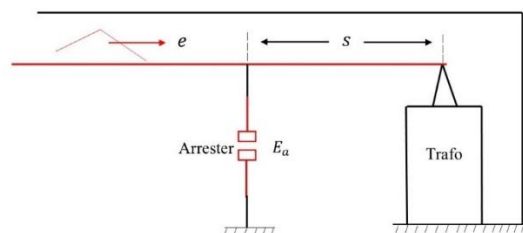
$\frac{du}{dt}$ = Kecuraman gelombang tegangan datang (kV/ μs)

Z = Impedansi surja saluran (Ω)

$\frac{di}{dt}$ = Kecuraman gelombang arus datang (kA/ μs)

g. Jarak Optimum Arrester Dengan Transformator

Jarak optimum arrester dengan transformator (S) seperti ditunjukkan dalam Gambar 2 dibawah ini.



Gambar 2 Jarak arrester dengan transformator

Perhitungan jarak optimal arrester dengan transformator dilakukan bertujuan untuk mengetahui pada jarak berapa arrester mampu memproteksi peralatan yang dilindungi dalam hal ini transformator. Jarak maksimal dapat dihitung menggunakan Persamaan 3.7 sebagai berikut (SPLN T5.007:2014) [11].

$$S = \frac{E_p - E_a}{2 \times \frac{du}{dt}} \times v \text{ meter} \quad (3.7)$$

Dimana:

E_p = Tegangan BIL tranformator (kV)

E_a = Tegangan kerja *impuls* arrester (kV)

$\frac{du}{dt}$ = Kecuraman gelombang tegangan datang (kV/ μ s)

v = Kecepatan rambat gelombang (di udara : 300m/ μ s)

S = Jarak arrester dengan transformator (m)

Berikut adalah Tabel 8 yang menampilkan nilai tegangan kerja *implus* arrester terhadap surja petir.

Tabel 8 Rating dan spesifikasi arrester gardu induk Siantan 150 kV

Tegangan Sistem Tertinggi	Tegangan Pengenal	Tegangan Kerja Impuls (E_a)		
		8/20 μ s	8/20 μ s	8/20 μ s
U_s	U_r	10 kA	20 kA	40 kA
170 kV	138 kV	331 kV	364 kV	397 kV

h. BIL Arrester

Kekuatan untuk menahan tegangan sering dinyatakan dalam bentuk tingkat isolasi dasar (TID) atau *Basic Insulation Level* (BIL). Untuk menentukan tingkat isolasi dasar (TID) dari peralatan yang dilindungi maka dapat menggunakan Persamaan 3.8 sebagai berikut [3].

$$\text{Penentuan BIL Arrester} = E_a \times 110\% + 20\% (E_a \times 110\%) \quad (3.8)$$

Dimana:

E_a = Tegangan kerja *impuls* arrester (kV)

Penentuan tegangan lebih sementara

Karena jaringan listrik tidak sempurna, kualitas dan pengendalian tegangan dapat menyebabkan tegangan lebih pada arester. Perhitungan nilai tegangan lebih sementara dapat dihitung dengan menggunakan Persamaan 3.9 sebagai berikut (IEC 60071-1).

$$U_{TOV} = U_n \times \sqrt{3} \quad (3.9)$$

Dimana:

U_n = Tegangan sistem gardu induk (kV)

Penentuan tegangan lebih surja hubung

Tegangan lebih surja hubung adalah tegangan lebih transien yang terjadi akibat operasi pemutusan dan penyambungan peralatan listrik dalam sistem tenaga. Perhitungan nilai tegangan lebih surja hubung dapat dihitung dengan menggunakan Persamaan 3.10 sebagai berikut (IEC 60071-1).

$$U_{switching} = U_n \times \sqrt{2} \times \sqrt{3} \quad (3.10)$$

i. Faktor Perlindungan Arrester

Faktor perlindungan adalah besar perbedaan tegangan antara BIL dari peralatan yang dilindungi dengan tegangan kerja dari arrester. Pada waktu menentukan tingkat perlindungan peralatan yang dilindungi oleh arester umumnya diambil harga 10 % di atas

tegangan kerja dari arrester, tujuannya untuk mengatasi kenaikan tegangan pada kawat penghubung dan toleransi pabrik. Menurut standar IEEE C62.22 [12] besar faktor perlindungan ini umumnya 20 % dari BIL peralatan untuk arrester yang dipasang dekat peralatan yang dilindungi. Faktor perlindungan (FP) dapat ditentukan dengan menggunakan Persamaan 3.11 sebagai berikut [7].

$$FP(\%) = \frac{\text{BIL Transformator} - \text{BIL Arrester}}{\text{BIL Transformator}} \times 100 \% \quad (3.11)$$

Dimana:

FP = Faktor Perlindungan

HASIL DAN PEMBAHASAN

Perhitungan Jarak Optimal Arrester

1. Tegangan Pengenal Arrester

Perhitungan nilai tegangan pengenal arrester memerlukan nilai koefisien pentanahan. Gardu induk 150 kV Siantan memiliki sistem pentanahan langsung dimana berdasarkan Tabel 3.6 nilai yang digunakan adalah 0,8. Maka nilai tegangan pengenal arrester dapat dihitung menggunakan Persamaan 3.1 adalah sebagai berikut.

$$\begin{aligned} U_r &= \text{Tegangan nominal} \times 110 \% \times \text{koefisien pentanahan} \\ &= 150 \text{ kV} \times 110 \% \times 0,8 \\ &= 150 \text{ kV} \times 1,1 \times 0,8 \\ &= 132 \text{ kV} \end{aligned}$$

Jadi, besar tegangan pengenal pada arrester di gardu induk 150 kV Siantan didapatkan sebesar 132 kV.

2. Perhitungan Kerapatan Sambaran Petir

Dalam perhitungan penentuan jarak optimal arrester dengan transformator (S), maka terlebih dahulu harus diketahui nilai kecuraman gelombang tegangan datang $\left(\frac{du}{dt}\right)$ dan nilai kecuraman gelombang arus datang $\left(\frac{di}{dt}\right)$. Sebelumnya dilakukan perhitungan nilai kerapatan sambaran petir ke tanah. Diketahui berdasarkan Tabel 3.4 rata-rata jumlah sambaran petir selama tiga tahun (2018-2020) di wilayah pontianak utara sebesar 467 sambaran/tahun dengan luas wilayah Kecamatan Pontianak Utara, yaitu sebesar 37,22 km² yang dapat dilihat pada Tabel 3.5. Maka kerapatan sambaran petir ke tanah dapat dihitung menggunakan Persamaan 3.2 adalah sebagai berikut.

$$\begin{aligned} N_G &= \frac{\text{Jumlah Sambaran Petir}}{\text{Luas Wilayah}} \\ N_G &= \frac{467 \text{ Sambaran/tahun}}{37,22 \text{ km}^2} \\ &= 12,54 \text{ sambaran/km}^2/\text{tahun} \end{aligned}$$

3. Perhitungan Arus Puncak Petir

Perhitungan arus puncak petir ($\hat{I}$) bertujuan untuk memperkirakan besarnya arus puncak petir di suatu wilayah gardu induk, sehingga desain sistem proteksi petir dapat diandalkan berdasarkan kondisi fisik dan geografis nyata. Diketahui kerapatan sambaran petir (N_G) sebesar 12,54 sambaran/km²/tahun, arus puncak sambaran petir (I_p) sebesar 25 kA didapat dengan menggunakan parameter arus puncak petir secara umum yang dapat dilihat pada Tabel 3.8, faktor redaman kabel saluran (α) sebesar 4×10^{-3} K didapat dengan penggunaan jenis kabel aluminium yang terdapat pada Tabel 3.10, jarak antara menara transmisi (L_i) sejauh 350 m dapat dilihat pada Tabel 3.9, faktor redaman dalam tanah (β) sebesar

$2,4 \times 10^{-4} \Omega\text{m}$ didapat dari jenis tanah yang ada di gardu induk 150 kV Siantan yang dapat

dilihat pada Tabel 3.11 , dan ketinggian awan terendah (A) setinggi 600 meter. Maka arus puncak petir ($\hat{I}$) dapat dihitung dengan menggunakan Persamaan 3.3 adalah sebagai berikut.

$$\begin{aligned}\hat{I} &= I_p \times N_G^{0,3} \times e^{((- \alpha \times L_i) \times (- \beta \times A))} \text{ kA} \\ \hat{I} &= 25 \text{ kA} \times 12,54^{0,3} \times e^{((- 4 \times 10^{-3} \text{ K} \times 350 \text{ m}) \times (- 2,4 \times 10^{-4} \Omega \text{ m} \times 600 \text{ m}))} \\ &= 25 \text{ kA} \times 2,135 \times e^{(2,0106 \times 10^{-1})} \\ &= 25 \text{ kA} \times 2,135 \times 1,22 \\ &= 65,11 \text{ kA}\end{aligned}$$

4. Perhitungan Kecuraman Gelombang Arus Datang

Untuk menghitung nilai arus puncak petir, diperlukan waktu naik arus puncak petir dimana pada sambaran ke bangunan atau tower waktu yang dibutuhkan adalah 2 μs dapat dilihat pada Tabel 3.12. Maka nilai kecuraman gelombang arus datang dapat dihitung menggunakan Persamaan 3.4 adalah sebagai berikut.

$$\begin{aligned}\frac{di}{dt} &= \frac{\hat{I} \text{ kA}}{t_r \mu\text{s}} \\ &= \frac{65,11 \text{ kA}}{2 \mu\text{s}} \\ &= 32,55 \text{ kA}/\mu\text{s}\end{aligned}$$

5. Perhitungan Impedansi Saluran

Jenis kawat penghantar yang digunakan pada menara SUTT 150 kV adalah tipe ACSR (Aluminium Conductor Steel-Reinforced) 240/40 mm², berdiameter 17,49 mm ($r = 8,745 \times 10^{-3} \text{ m}$), dengan tinggi kawat penghantar paling atas 36 m didapatkan berdasarkan pada Tabel 3.3. Dari spesifikasi tersebut, impedansi kawat surja dapat ditentukan menggunakan Persamaan 3.5 adalah sebagai berikut.

$$\begin{aligned}Z &= 60 \ln \frac{2h}{r} \Omega \\ &= 60 \ln \frac{2 \times 36 \text{ m}}{8,745 \times 10^{-3} \text{ m}} \Omega \\ &= 60 \ln 8.233,27 \Omega \\ &= 540 \Omega\end{aligned}$$

6. Perhitungan Kecuraman Gelombang Tegangan Datang

Setelah diketahui nilai kecuraman gelombang arus datang ($\frac{di}{dt}$) dan nilai impedansi surja kawat (Z) maka nilai kecuraman gelombang tegangan datang ($\frac{du}{dt}$) dapat dihitung menggunakan Persamaan 3.6 adalah sebagai berikut.

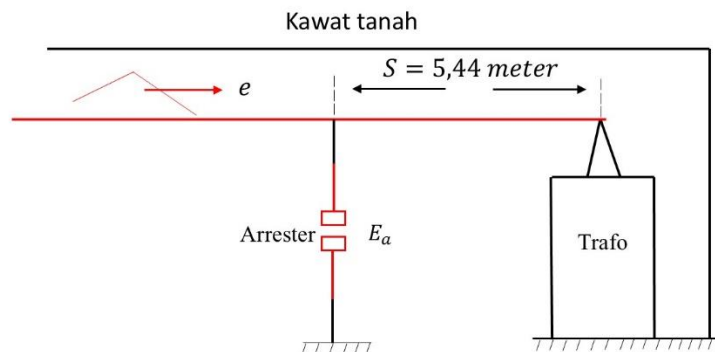
$$\begin{aligned}\frac{du}{dt} &= \frac{1}{2} \times Z \times \frac{di}{dt} \text{ (kV}/\mu\text{s)} \\ &= \frac{1}{2} \times 540 \Omega \times 31,55 \text{ kA}/\mu\text{s} \\ &= 8.789 \text{ kV}/\mu\text{s}\end{aligned}$$

7. Perhitungan Jarak Maksimum Arrester Dengan Transformator

Perhitungan jarak maksimum arrester dengan transformator dilakukan untuk mengetahui pada jarak berapa maksimum arrester mampu memproteksi peralatan yang dilindungi dalam hal ini transformator. Diketahui dari hasil perhitungan kecuraman gelombang tegangan datang ($\frac{du}{dt}$) sebesar 8.789 kV/ μs . Dimana gardu induk 150 kV Siantan memiliki BIL transformator sebesar 650 kV yang dapat dilihat pada Tabel 3.1 dan tegangan kerja implus arrester sebesar 331 kV yang terdapat pada Tabel 3.13. Maka jarak maksimum arrester dengan transformator dapat dihitung dengan menggunakan Persamaan

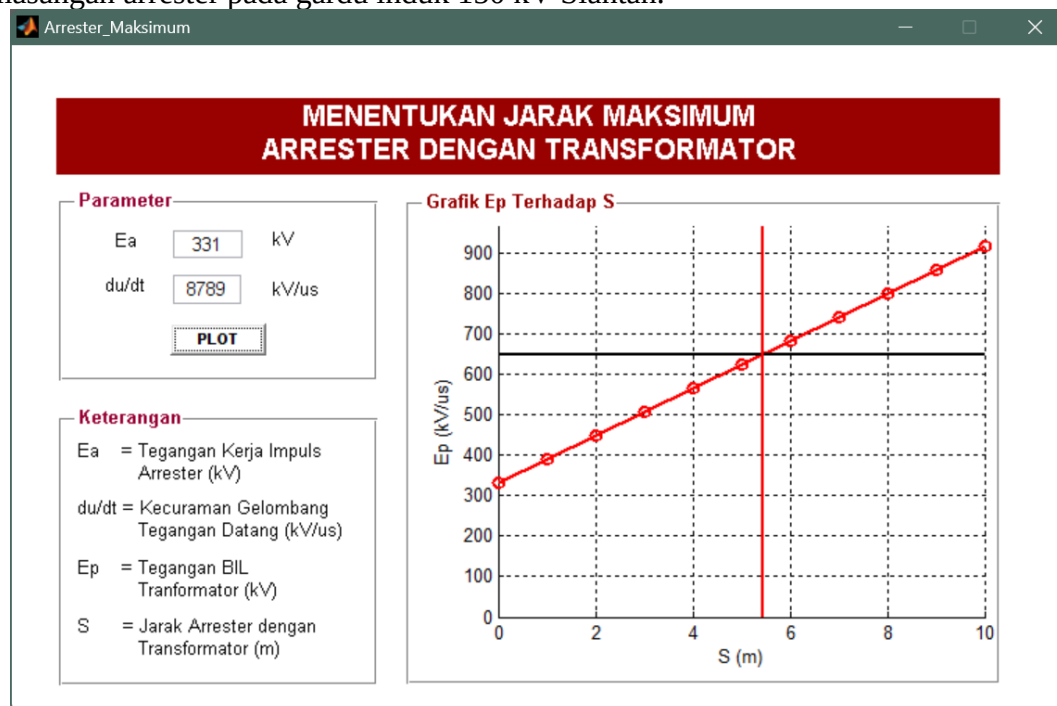
3.7 adalah sebagai berikut.

$$\begin{aligned}
 S &= \frac{E_p - E_a}{2 \times \frac{du}{dt}} \times v \text{ meter} \\
 &= \frac{650 \text{ kV} - 331 \text{ kV}}{2 \times 8.789 \text{ kV}/\mu\text{s}} \times 300 \text{ m}/\mu\text{s} \\
 &= \frac{319 \text{ kV}}{17.579 \text{ kV}/\mu\text{s}} \times 300 \text{ m}/\mu\text{s} \\
 &= \frac{95.700}{17.579} \text{ meter} = 5,44 \text{ meter}
 \end{aligned}$$



Gambar 1 Jarak maksimum arrester dengan transformator

Berikut dapat dilihat Gambar 2 grafik tegangan BIL transformator terhadap jarak pemasangan arrester pada gardu induk 150 kV Siantan.



Gambar 2 Grafik jarak maksimum arrester dengan transformator

Berdasarkan Gambar 2 terlihat bahwa tegangan pada transformator juga terus bertambah seiring dengan bertambahnya jarak pemasangan arrester dengan transformator. Dimana pada jarak 6 m arrester tidak dapat menahan tegangan kecuraman gelombang surja petir karena melebihi tegangan BIL transformator.

8. Perhitungan Jarak Minimum Arrester Dengan Transformator

Untuk menentukan jarak minimum arrester dengan transformator yang diproteksi terlebih dahulu harus diketahui nilai kecuraman gelombang arus datang $\left(\frac{di}{dt}\right)$. Diasumsikan nilai kecuraman gelombang arus datang $\left(\frac{di}{dt}\right)$ sebesar $67 \text{ kA}/\mu\text{s}$ dimana merupakan kenaikan arus tertinggi dengan probabilitas sebesar 10 % (SPLN T5.007:2014), berikut dapat dilihat parameter sistem transmisi tegangan tinggi pada Tabel 4.1(SPLN T5.007:2014).

Tabel 1 Parameter sistem transmisi tegangan tinggi

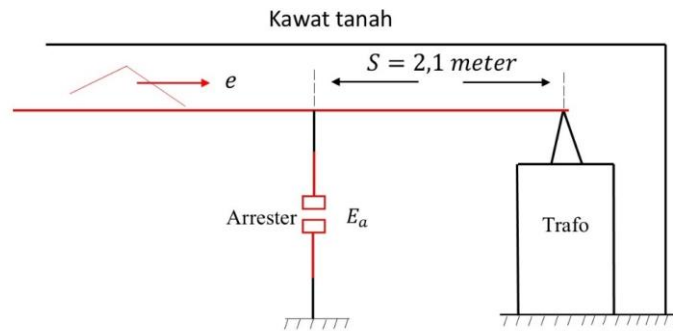
Tegangan nominal	150 kV			275 kV			500 kV		
Tegangan Tertinggi	170 kV			300 kV			550 kV		
Probabilitas di/dt (%)	50	20	10	50	20	10	50	20	10
di/dt (kA/ μs)	24	52	67	24	52	67	24	52	67
Jarak Lindung Arrester (meter)	7,2	3,3	2,6	7,4	3,4	2,6	10	4,6	3,6

Diketahui dari hasil perhitungan impedansi kawat saluran sebesar 540Ω . Dimana gardu induk 150 kV Siantan memiliki BIL transformator sebesar 650 kV yang dapat dilihat pada Tabel 1 dan tegangan kerja implus arrester dipilih sebesar 397 kV yang terdapat pada Tabel 1. Maka nilai kecuraman gelombang tegangan datang $\left(\frac{du}{dt}\right)$ dapat dihitung dengan menggunakan Persamaan 3.6 adalah sebagai berikut.

$$\begin{aligned}\frac{du}{dt} &= \frac{1}{2} \times Z \times \frac{di}{dt} \text{ (kV}/\mu\text{s}) \\ &= \frac{1}{2} \times 540 \Omega \times 67 \text{ kA}/\mu\text{s} \\ &= 18.090 \text{ kV}/\mu\text{s}\end{aligned}$$

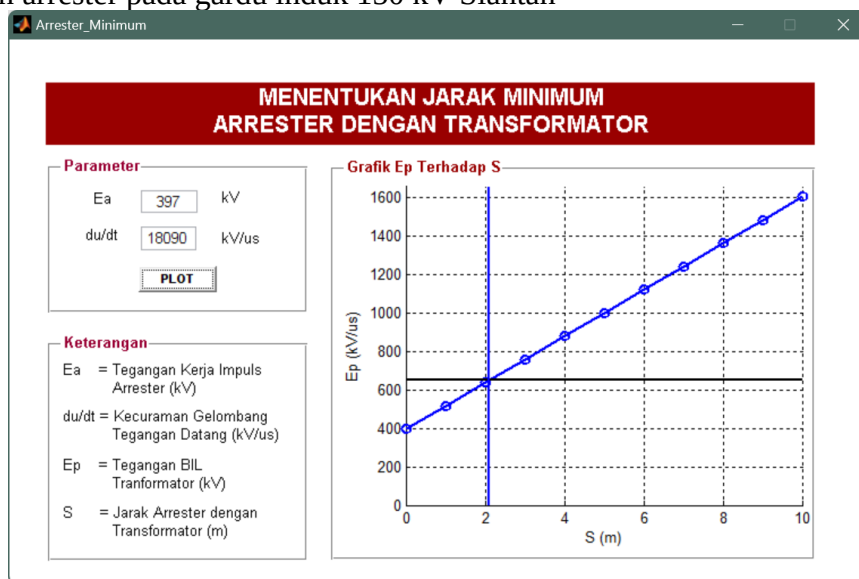
Sehingga jarak minimum arrester dengan transformator dapat dihitung dengan menggunakan Persamaan 3.7 adalah sebagai berikut.

$$\begin{aligned}S &= \frac{E_p - E_a}{2 \times \frac{du}{dt}} \times v \text{ meter} \\ &= \frac{650 \text{ kV} - 397 \text{ kV}}{2 \times 18.090 \text{ kV}/\mu\text{s}} \times 300 \text{ m}/\mu\text{s} \\ &= \frac{253 \text{ kV}}{36.180 \text{ kV}/\mu\text{s}} \times 300 \text{ m}/\mu\text{s} \\ &= \frac{75.900}{36.180} \text{ m} = 2,1 \text{ meter}\end{aligned}$$



Gambar 3. Jarak minimum arrester dengan transformator

Berikut dapat dilihat Gambar 3 grafik tegangan BIL transformator terhadap jarak pemasangan arrester pada gardu induk 150 kV Siantan



Gambar 4. Grafik jarak minimum arrester dengan transformator

Berdasarkan Gambar 4 terlihat bahwa jarak minimum arrester dengan transformator sejauh 2,1 meter. Dimana arrester tidak boleh diletakkan terlalu dekat dengan transformator karena beberapa alasan teknis seperti arus pelepasan yang tidak optimal dan efek induktansi dimana kabel penghubung memiliki impedansi rendah sehingga tidak dapat meredam lonjakan dengan efektif.

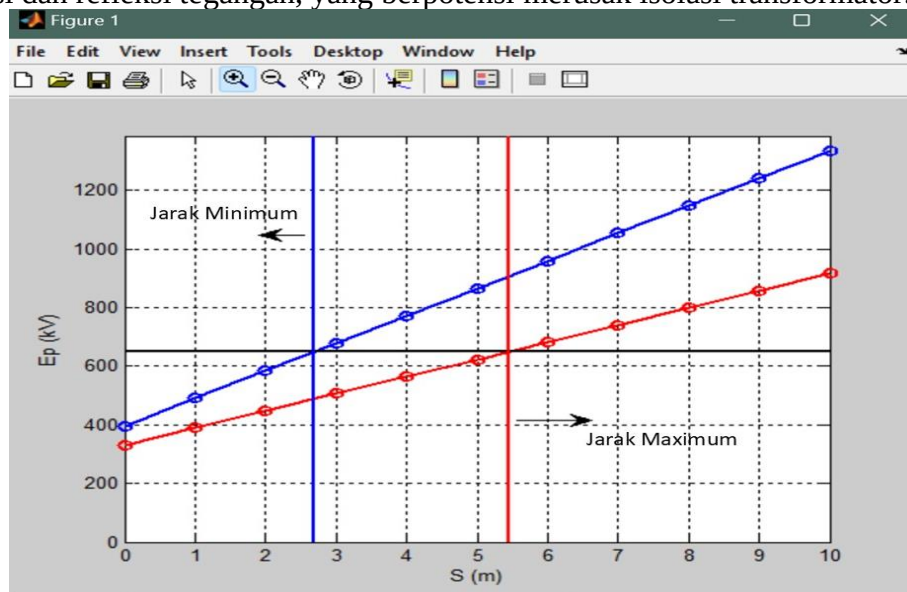
9. Jarak Optimal Arrester Dengan Transformator

Jarak optimal arrester adalah jarak yang ideal antara arrester dengan transformator untuk memastikan perlindungan yang efektif terhadap tegangan lebih yang disebabkan oleh surja petir atau gangguan lainnya dan berfungsi untuk melindungi transformator dari tegangan lebih yang dapat merusak isolasi transformator yang disebabkan oleh petir atau gangguan lainnya. Jarak optimal antara arrester dengan transformator ditentukan berdasarkan dua faktor utama yakni jarak minimum dan jarak maksimum.

Penentuan jarak maksimum arrester ditentukan berdasarkan kondisi iklim, seperti jumlah sambaran petir di lokasi penelitian, serta faktor-faktor lain seperti tegangan pengenalan arrester, impedansi saluran, dan kecuraman gelombang arus datang. Tujuan dari perhitungan ini adalah untuk mengetahui sejauh mana arrester mampu melindungi transformator agar tegangan yang diterima tetap berada di bawah nilai Basic Insulation Level transformator

Sementara itu, jarak minimum ditentukan dengan mempertimbangkan kenaikan

kecuraman gelombang arus datang tertinggi yang pernah tercatat. Dalam penelitian ini, standar yang digunakan adalah SPLN T5.007:2014. Penentuan jarak minimum penting karena arrester yang dipasang terlalu dekat dengan transformator dapat menimbulkan efek induktansi dan refleksi tegangan, yang berpotensi merusak isolasi transformator.



Gambar 5. Jarak optimal arrester dengan transformator

Berdasarkan data kondisi iklim, seperti jumlah sambaran petir di lokasi pontianak utara, serta faktor-faktor lain seperti spesifikasi arrester yang digunakan, impedansi saluran, dan kecuraman gelombang arus datang, diperoleh hasil jarak maksimum antara arrester dan transformator yang dilindungi adalah 5,44 meter. Pada jarak ini, tegangan lebih yang mencapai transformator tetap berada di bawah nilai Basic Insulation Level yang telah ditetapkan, sehingga perlindungan tetap efektif tanpa risiko kerusakan pada isolasi transformator. Sementara itu, perhitungan juga menunjukkan bahwa jarak minimum yang diperoleh antara arrester dan transformator adalah 2,1 meter. Dengan demikian jarak optimal arrester dalam melindungi transformator berada dalam rentang 2,6 meter hingga 5,44 meter. Berikut pada gambar 4.5 dapat dilihat grafik jarak optimal arrester dengan transformator.

Perhitungan Faktor Perlindungan

1. Perhitungan BIL Arrester

Berdasarkan dengan analisa di atas, maka nilai parameter-parameter untuk menentukan BIL Arrester Gardu Induk 150 kV Siantan menggunakan Persamaan 3.8, 3.9, dan 3.10 adalah sebagai berikut.

$$\begin{aligned}
 \text{BIL Arrester} &= E_a \times 110\% + 20\% (E_a \times 110\%) \\
 &= 364 \text{ kV} \times 1,1 + 20\% (364 \text{ kV} \times 1,1) \\
 &= 400,4 \text{ kV} + 20\% (400,4 \text{ kV}) \\
 &= 480,48 \text{ kV}
 \end{aligned}$$

Perhitungan diperoleh BIL Arrester sebesar 480,48 kV dimana nilai ini lebih kecil dari BIL pada Transformator yaitu 650 kV yang dapat dilihat pada tabel 3.1. Perhitungan BIL tegangan lebih sementara dan BIL Tegangan lebih surja hubung menggunakan Persamaan 3.9 dan 3.10 adalah sebagai berikut.

Perhitungan BIL tegangan lebih sementara

$$\begin{aligned}
 U_{\text{TOV}} &= U_n \times \sqrt{3} \\
 U_{\text{TOV}} &= 150 \text{ kV} \times 1,7 \\
 &= 255 \text{ kV}
 \end{aligned}$$

Perhitungan BIL tegangan lebih surja hubung

$$U_{\text{switching}} = U_n \times \sqrt{2} \times \sqrt{3}$$

$$\begin{aligned} U_{\text{switching}} &= 150 \text{ kV} \times \sqrt{2} \times \sqrt{3} \\ &= 367,42 \text{ kV} \end{aligned}$$

Perhitungan nilai tegangan lebih sementara dan nilai tegangan lebih surja hubung bertujuan untuk memastikan keandalan sistem tenaga listrik serta mencegah kerusakan pada transformator. Diperoleh tegangan BIL Arrester lebih besar dari tegangan lebih sementara dan tegangan lebih surja hubung, sehingga transformator aman dari gangguan tegangan lebih sementara dan tegangan lebih surja hubung.

2. Faktor Perlindungan

Faktor perlindungan merupakan nilai tolak ukur dari tingkat perlindungan gardu induk. Faktor perlindungan pada umumnya bernilai 20% dan faktor perlindungan yang baik tidak boleh berada di bawah 20 %. Faktor perlindungan lightning arrester dengan transformator daya dapat ditentukan dengan menggunakan Persamaan 3.11 adalah sebagai berikut.

$$\begin{aligned} F_p &= \frac{\text{BIL Transformator} - \text{BIL Arrester}}{\text{BIL Transformator}} \times 100 \% \\ &= \frac{650 \text{ kV} - 480,48 \text{ kV}}{650 \text{ kV}} \times 100 \% \\ &= 26,08 \% \end{aligned}$$

KESIMPULAN

Berdasarkan dari hasil analisa dan pembahasan diperoleh kesimpulan adalah sebagai berikut.

1. Penempatan arrester terhadap transformator daya gardu induk 150 kV Siantan sejauh 3 meter sesuai dengan standar. Berdasarkan perhitungan diperoleh jarak minimum 2,1 meter dan jarak maksimum 5,44 meter. Standar SPLN T5.007:2014 menetapkan jarak minimum 2,6 meter dan maksimum 7,2 meter, sehingga penempatan arrester di gardu induk 150 kV Siantan sudah optimal untuk mengamankan transformator dari surja petir dan surja hubung
2. Perhitungan Faktor Perlindungan pada gardu induk 150 kV Siantan diperoleh adalah 26,08 % dari faktor toleransi 20% sehingga pemilihan arrester sudah dapat memberikan faktor perlindungan yang baik dimana berada di atas margin aman transformator.

Saran

Adapun saran yang dapat diberikan untuk penelitian ini maupun untuk penelitian selanjutnya, yaitu:

1. Dari hasil analisa dan pembahasan untuk menentukan letak optimal arrester pada gardu induk 150 kV Siantan, kiranya dapat digunakan sebagai referensi untuk menentukan jarak optimal arrester.
2. Untuk pengembangan peneltian ini kiranya dapat diaplikasikan pada gardu induk yang lain.

DAFTAR PUSTAKA

- J. James Tambingon, G. M. Ch Mangindaan, and L. S. Patras, "Analysis of Lightning Arrester Equipment in 150 kV GIS Teling Lightning Arrester pada GIS Teling 150 kV," Jurnal Teknik Elektro dan Komputer, 2023.
- Jonner Manihuruk, "View of Studi Kemampuan Arrester Untuk Pengaman Transformator Pada Gardu Induk Tanjung Morawa 150 kV," Elpotecs, vol. 4, No. 1, 2021.
- A. Lidia Kolompoy, L. S. Patras, and G. M. Ch Mangindaan, "Analisa Koordinasi Isolasi Arrester

- Pada Transformator Di Gardu Induk Paniki 150 kV,” 2021.
- Novia Fidianti, “Analisis Tahanan Isolasi Peralatan Utama Gardu Induk,” 2018.
- Daeny Septi Yansuri, “Sistem Proteksi Petir di Gardu Induk Seduduk Putih Sistem 150 KV PT. PLN (Persero) Palembang,” 2017.
- A. Azis and H. A. Nurdin, “Analisa Jarak Lindung Lighting Arrester Terhadap Transformator Daya 20 MVA Gardu Induk Sungai Juaro Palembang,” *Jurnal Teknik*, vol. 7.NO.1, 2020, doi: 10.35449/teknika.v7i1.134.
- Brando Alexsander R, “Analisa Koordinasi Isolasi Peralatan di Garduk Induk Teling 70 kV,” *Teknik Elektro dan Komputer*, vol. Vol. 7 No. 2, 2018.
- R. Labado and P. Eko Pambudi, “Analisis Penempatan Arrester Terhadap Efektifitas Proteksi Transformator Pada PT. PLN (Persero) P3B Jawa-Bali APP Salatiga Gardu Induk 150 kV Bantul,” *Jurnal Elektrikal*, vol. 2, no. 2, pp. 79–87, 2015.
- M. Zainuddin, L. Bima, and P. Negeri Samarinda, “Jarak Penempatan Lightning Arrester Sebagai Pelindung Transformator Terhadap Tegangan Lebih Pada Gardu Induk 150 kV Harapan Baru,” *Multidisiplin Indonesia*, vol. 1,No.2, no. 2, 2023, doi: 10.61404/jimi.v1i2.68.
- Aryatul M, “Analisis Jarak Penempatan Arrester Sebagai Pengaman Transformator Daya Dari Gangguan Surja Petir,” vol. 8no.3, 2023, doi: 10.28926/briliant.v8i3. 1290.
- Spesifikasi Arrester Untuk Jaringan Transmisi, SPLN T5.007. 2014.
- IEEE Guide for the Application of Metal-Oxide Surge Arresters for Alternating-Current Systems. IEEE, 1997.
- F. Nugroho, “Analisa Kemampuan Lightning Arrester Pada Tranformator Daya Di Gardu Induk150 kV Palur,” 2023.
- M. Septian Tanalepy, U. A. Gani, R. Kurnianto, and M. Rajagukguk, “Analisis Pemetaan Daerah Rawan Petir Menggunakan Metode Kriging di Wilayah Kota Pontianak Sekitarnya,” vol. 11,No.1, 2022, doi: 10.26418/j3eit.v11i1.62414.
- Bps kota pontianak, “Luas wilayah menurut kecamatan tahun 2022-2023,” 2024. [Online].Available:<https://pontianakkota.bps.go.id/id/statistics-table/2/MzgjMg%3D%3D/luas-wilayah-menurut-kecamatan.html>
- Protection against lightning General principles. International Electrotechnical Commission, 2010.
- M. Asna and I. W. Suriana, “Analisis Konstruksi Posisi Lightning Arrester Di Gardu Distribusi Km 0003 Penyulang Subagan Wilayah Kerja PT.PLN (Persero) ULP Karangasem,” vol. 4,No.1, 2021, doi: 2621-5276.
- “Ruang bebas dan jarak bebas minimum pada Saluran Udara Tegangan Tinggi (SUTT) dan Saluran Udara Tegangan Ekstra Tinggi (SUTET),” 2002.
- “Standar Perencanaan Ketahanan Gempa Untuk Struktur Bangunan Gedung,” 2001