

ANALISA JARAK LINDUNG *LIGHTING ARRESTER* TERHADAP TRANSFORMATOR DAYA 20 MVA GARDU INDUK SUNGAI JUARO PALEMBANG

Abdul Azis*, H. Alimin Nurdin*

*Dosen Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas PGRI Palembang

email: azis@univpgri-palembang.ac.id

ABSTRAK

Lighting arrester merupakan alat proteksi untuk melindungi Transformator Daya 20 MVA pada Gardu Induk Sungai Juaro terhadap surja petir maupun surja hubung. Jarak maksimum *lighting arrester* sangat mempengaruhi kinerja dari *lighting arrester* tersebut dalam melindungi peralatan. Penelitian ini menggunakan metode Diagram Tangga atau *Lattice Diagram* sehingga dapat diketahui gelombang yang bila mengenai suatu titik peralihan, akan menimbulkan gelombang-gelombang baru sebagai hasil dari pantulan dan terusan. Dari hasil penelitian dapat diketahui bahwa jarak *lighting arrester* terhadap Transformator Daya 20 MVA yang terpasang adalah 7 m, sedangkan dari hasil perhitungan adalah 5,7812 m. Saluran transmisi pada Gardu Induk Sungai Juaro Palembang adalah transmisi sirkit ganda, dan berdasarkan SPLN 7: 1978 bahwa untuk sistem 66 kV dengan transmisi sirkit ganda jarak antara penangkap petir dengan transformator tidak melebihi 34 m. Berarti jarak *lighting arrester* terhadap Transformator Daya 20 MVA masih berada dalam batasan yang telah ditetapkan oleh PT PLN. Kenaikan tegangan yang terjadi pada transformator masih berada dibawah BIL, dengan demikian dapat ditentukan bahwa peralatan masih dapat terlindungi oleh *lighting arrester* karena pemasangan masih dibawah harga maksimum atau belum melebihi standar BIL.

Kata Kunci: Jarak, Lindung, *Arrester*

1. PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Energi listrik yang dihasilkan pembangkit disalurkan melalui saluran transmisi ke gardu induk. Dalam proses penyaluran energi listrik dari gardu induk ke konsumen seringkali terjadi gangguan, salah satunya adalah masalah gangguan tegangan lebih transien. Tegangan lebih transien dapat disebabkan oleh sambaran petir. Peralatan yang biasa digunakan untuk memproteksi gangguan akibat sambaran petir adalah *Lightning Arrester* (PT PLN, 2014).

Penempatan arrester dengan jarak tertentu dapat melindungi peralatan dari gangguan tegangan lebih gelombang surja hubung atau transien energi listrik. Saat terjadi gelombang berjalan yang menimbulkan tegangan lebih terhadap peralatan yang letaknya sedikit jauh dari arrester, maka peralatan tersebut akan tetap terlindungi, bila jarak arrester masih dalam radius kerja proteksi. Pada Gardu Induk Sungai Juaro Palembang, terdapat transformator dan *lightning arrester* yang penempatannya mempunyai jarak tertentu. Jarak *lightning arrester* dengan transformator yang dilindungi, berpengaruh terhadap besarnya tegangan yang tiba pada transformator. Jika jarak *lightning arrester* terlalu jauh, maka tegangan yang tiba pada transformator dapat melebihi tegangan yang dapat dipikulnya.

1.2. Tujuan

Adapun tujuan dari penelitian ini adalah untuk:

- 1) Mengetahui tegangan percik *lighting arrester*.
- 2) Mengetahui jarak maksimum penempatan *lighting arrester*.
- 3) Mengetahui tingkat perlindungan *lighting arrester*.

2. TINJAUAN PUSTAKA

2.1. *Lightning arrester*

Lightning arrester (LA) merupakan peralatan yang berfungsi untuk melindungi peralatan listrik lain dari tegangan surja (baik surja hubung maupun surja petir). Surja mungkin merambat di dalam konduktor saat peristiwa sebagai berikut (PT PLN, 2014):

- 1) Kegagalan sudut perlindungan petir, sehingga surja petir mengalir di dalam konduktor fasa.
- 2) *Backflashover* akibat nilai pentanahan yang tinggi, baik di gardu induk ataupun di saluran transmisi.
- 3) Proses *switching* CB/ DS (surja hubung).
- 4) Gangguan fasa-fasa, ataupun fasa-tanah baik di saluran transmisi maupun di gardu induk.

Pada saat peristiwa surja, *travelling wave*/gelombang berjalan merambat di penghantar sistem transmisi dengan kecepatan mendekati kecepatan cahaya. Surja dengan panjang gelombang dalam orde mikro detik ini berbahaya bila nilai tegangan surja yang tiba di peralatan lebih tinggi dari level *Basic Insulation Level* (BIL) peralatan. Untuk itu, LA dipasang untuk memotong tegangan surja dengan cara mengalirkan arus surja ke tanah dalam orde sangat singkat, dimana pengaruh *follow current* tidak ikut serta diketanahkan. LA memiliki karakteristik sebagai berikut (PT PLN, 2014):

- 1) Pada tegangan operasi (rms): a) LA bersifat sebagai insulator. b) Arus bocor ke tanah tetap ada, namun dalam orde mili-Ampere. Arus bocor ini mayoritas adalah arus kapasitif.
- 2) Pada saat terjadi surja petir/ surja hubung: a) LA bersifat konduktif, dengan nilai resistansi sangat rendah. b) LA mengalirkan arus surja ke tanah dalam orde kilo-Ampere. c) LA segera bersifat insulator setelah surja berhasil dilewatkan, sehingga menghilangkan pengaruh *follow current*.

2.2. Tegangan Tertinggi Sistem

Rating tegangan *arrester* adalah tegangan bolak balik maksimum yang diperbolehkan pada terminal *lightning arrester*, dimana tegangan ini dapat memutus arus susulan (*power follow current*) yang terjadi ketika *lightning arrester* mengalami percikan, dimana dalam penentuan tegangan ini berguna untuk mengetahui tegangan tertinggi yang dapat dihasilkan gardu induk. Tegangan sistem tertinggi umumnya diambil harga 110 % dari harga tegangan nominal sistem (V_n), yaitu (Hutauruk, 1991):

$$V_m = 1,1 \times V_n \quad \dots\dots\dots(1)$$

2.3. Rating Pengenal Arrester

Rating pengenal *arrester* atau tegangan dasar *arrester* dapat ditentukan berdasarkan tegangan sistem maksimum yang mungkin terjadi. Tegangan Pengenal Arrester (V_c) merupakan karakteristik yang paling penting untuk perlindungan gardu induk. Tegangan pengenal *arrester* menentukan tingkat perlindungan dari *arrester*, jika tegangan kerja *arrester* berada di bawah Tingkat Isolasi Dasar (TID) atau BIL dari peralatan yang dilindungi, maka faktor keamanan yang optimum terhadap peralatan dapat diperoleh. Tegangan dasar *arrester* atau tegangan pengenal *arrester* dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan (Hutauruk, 1991):

$$V_c = V_m \times \text{koefisien pentanahan} \quad \dots\dots\dots(2)$$

2.4. Impedansi Surja

Untuk penghantar saluran transmisi yang memiliki andongan, tinggi penghantar dari atas permukaan tanah dapat ditentukan dengan mengurangi tinggi dari setiap penghantar pada *cross arm* dengan besarnya andongan. Andongan merupakan jarak lenturan dari suatu bentangan kawat penghantar antara dua menara transmisi atau lebih, yang diperhitungkan berdasarkan garis lurus

(horizontal) kedua menara tersebut. Besarnya lenturan kawat penghantar tersebut tergantung pada berat (W) dan panjang kawat penghantar atau panjang gawang (S). Berat kawat akan menimbulkan kuat tarik (T) pada kawat penghantar, yang akan mempengaruhi besarnya andongan (D) tersebut, yaitu (Arismunandar dan Kuwahara, 2004):

$$D = \frac{WS^2}{8T} \dots\dots\dots(3)$$

Impedansi surja untuk penghantar udara (Z_1) dipengaruhi oleh ketinggian penghantar di atas tanah (h), dan jari-jari penghantar (r), maka harus ditentukan terlebih dahulu tinggi rata-rata penghantar dari atas permukaan tanah. Maka tinggi rata-rata penghantar (h) dari atas permukaan tanah adalah (Hutauruk, 1991):

$$h = \frac{(h_{upper} - D) + (h_{middle} - D) + (h_{lower} - D)}{3} \dots\dots\dots(4)$$

Maka, impedansi surja untuk penghantar udara adalah (Hutauruk, 1991):

$$Z_1 = \sqrt{\frac{L}{C}} = 60 \ln \left(\frac{2h}{r} \right) \dots\dots\dots(5)$$

Sedangkan impedansi surja untuk kabel dipengaruhi oleh jari-jari isolasi pembungkus kabel (R), jari-jari konduktor (r), dan permitivitas kabel (ϵ), yaitu (Hutauruk, 1991):

$$Z_C = \left(\frac{60}{\epsilon} \right) \ln \left(\frac{R}{r} \right) \dots\dots\dots(6)$$

Besar impedansi surja untuk penghantar udara adalah 400 Ω - 600 Ω , dan impedansi surja untuk kabel adalah 20 Ω - 60 Ω (Hutauruk, 1991).

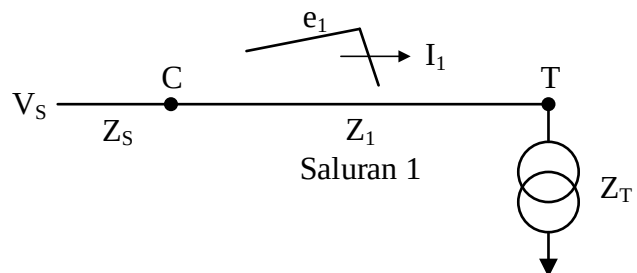
2.5. Kecepatan Gelombang Berjalan

Suatu gelombang yang merambat dengan konstanta L dan C di sepanjang kawat, membuat gelombang tegangan dan arus merambat dengan dengan kecepatan yang sama. Selain itu, kecepatan rambat dari gelombang tersebut juga dipengaruhi oleh suatu faktor proporsional, yaitu karakteristik dari kawat yang dilalui. Maka didapat kecepatan rambat gelombang untuk kawat udara sebagai berikut (Hutauruk, 1991):

$$v = \frac{1}{\sqrt{LC}} \dots\dots\dots(7)$$

2.6. Tegangan Percik *Lightning Arrester*

Metode pantulan berulang yang biasa diwujudkan dalam bentuk diagram tangga adalah cara yang sesuai untuk mengamati jejak dari pemantulan suatu gelombang surja berjalan pada suatu saluran, sumbu horisontal untuk menamai garis pantulan pada saluran dan sumbu vertikal untuk menamai kenaikan waktu dari total waktu yang dibutuhkan gelombang surja untuk melintasi saluran dalam satu jurusan: S/v . Dari diagram ini bisa didapatkan nilai dari total tegangan surja pada saluran di setiap titik dan waktu. Penggunaan metode ini dapat dijelaskan secara lebih jauh pada penentuan besar tegangan surja dan arus surja untuk



Gambar 2.1. Rangkaian satu saluran

bentuk rangkaian yang diperlihatkan pada Gambar 2.1 (Hutauruk, 1991).

Titik C dan titik T pada Gambar 2.1 menandakan suatu hubungan dari dua nilai tahanan atau impedansi surja yang berbeda, saluran-1 dengan impedansi surja (Z_1) memiliki panjang total dari titik C sampai titik T sama dengan S . Dengan menganggap Z_S sebagai impedansi surja sisi sumber dan Z_T sebagai impedansi surja sisi beban. Apabila tegangan surja dari sisi sumber (V_S) diberikan pada saluran-1 maka pada saluran akan timbul gelombang tegangan surja (e_1) dan arus surja (i_1) yang merambat dari titik C menuju titik T (Hutauruk, 1991).

Suatu gelombang surja yang sampai pada suatu titik yang menghubungkan dua impedansi surja yang berbeda (titik peralihan) akan menimbulkan gelombang surja yang dipantulkan di titik ini. Gelombang surja datang (e_1 dan i_1) pada saluran-1 akan menimbulkan gelombang surja pantul di titik T setelah sampainya gelombang ini di titik tersebut pada waktu t . Dan selanjutnya gelombang surja pantul ini akan merambat dan sampai pada titik C pada waktu $2t$ dan menimbulkan gelombang surja pantul baru di titik C tersebut, gelombang surja pantul baru ini akan kembali merambat menuju titik T dan menimbulkan gelombang surja pantul baru lagi setelah sampainya di titik T pada waktu $3t$. Proses pemantulan ini diulang secara terus menerus pada titik T dan titik C. Pada setiap waktu, total tegangan surja atau arus surja pada setiap titik dari saluran adalah penjumlahan dari nilai semua gelombang tegangan surja atau arus surja yang timbul pada saluran di titik dan waktu tersebut. Waktu (t) adalah waktu yang dibutuhkan gelombang surja untuk merambat pada saluran-1 dari titik C ke titik T atau sebaliknya, bila kecepatan rambat gelombang surja adalah v dan panjang saluran adalah S maka waktu (t) adalah (Hutauruk, 1991):

$$t = \frac{S}{v} \quad \dots\dots\dots(8)$$

Dimana:

- t = Waktu (detik)
- S = Panjang saluran (m)
- v = Kecepatan gelombang surja (m/ μ detik)

Gambar 2.1 menunjukkan gelombang surja petir datang dari kiri dan setelah gelombang mencapai titik pemasangan *lightning arrester* maka sebagian gelombang akan dipantulkan dan sebagian gelombang akan diteruskan. Untuk menentukan tegangan percik *lightning arrester* harus ditentukan terlebih dahulu operator pantulan dan terusan (Hutauruk, 1991).

$$a = \frac{Z_c - Z_1}{Z_c + Z_1} \quad b = \frac{Z_1 - Z_c}{Z_1 + Z_c} \quad a' = \frac{2Z_c}{Z_c + Z_1} \quad b' = \frac{2Z_1}{Z_1 + Z_c}$$

Dimana:

- Z_1 = Impedansi surja untuk penghantar udara (Ω)
- Z_c = Impedansi surja untuk kabel (Ω)
- a = Operator pantulan untuk gelombang yang datang dari kiri
- b = Operator pantulan untuk gelombang yang datang dari kanan
- a' = Operator terusan untuk gelombang yang datang dari kiri
- b' = Operator terusan untuk gelombang yang datang dari kanan

Untuk kecuraman gelombang datang pertama, harus ditentukan waktu kecuraman gelombang memasuki gardu induk atau transformator, dan dimisalkan waktu kecuraman gelombang (t) adalah setiap 2 μ detik dan surja petir (A) sebesar 1.000 kV, dan faktor redaman (α) adalah $A \times a'$. Apabila:

- i = 0, 2, 4,..... n adalah indeks dari waktu kecuraman gelombang setiap 2 μ detik dimisalkan:
 $i = 2, 6, 10, \dots$ n adalah indeks dari waktu kecuraman gelombang datang, dan $i = 4, 8, 12, \dots$ n adalah indeks dari waktu kecuraman gelombang pantul
- j = 1, 3, 5,..... n adalah indeks dari faktor redaman

Untuk menentukan nilai tegangan pada titik sambungan kabel kawat udara dimulai pada $t = 0$, dan nilai tegangan pada waktu selanjutnya merupakan jumlah antara nilai tegangan sebelumnya dengan faktor redaman. Nilai tegangan gelombang pantul adalah sama dengan gelombang datang. Maka tegangan pada titik sambungan kabel-kawat udara pada saat *lightning arrester* tidak ada untuk setiap 2 μ detik adalah (Hutauruk, 1991):

$$\begin{aligned} t = 0 \mu\text{detik}; & \quad e_{t=0} = 0 \\ t = 2 \mu\text{detik}; & \quad e_{t=2} = e_{t=0} + \alpha^1/10^0 \\ t = 4 \mu\text{detik}; & \quad e_{t=4} = e_{t=2} \\ t = 6 \mu\text{detik}; & \quad e_{t=6} = e_{t=4} + \alpha^1/10^0 + \alpha^3/10^4 \\ t = 8 \mu\text{detik}; & \quad e_{t=8} = e_{t=6} \\ t = 10 \mu\text{detik}; & \quad e_{t=10} = e_{t=8} + \alpha^3/10^4 + \alpha^5/10^8 \\ t = 12 \mu\text{detik}; & \quad e_{t=12} = e_{t=10} \end{aligned}$$

Kemudian waktu percik *lightning arrester* (t_{s0}) pada lokasi pemasangan *arrester* dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan sebagai berikut (Hutauruk, 1991):

$$t_{s0} = 8 + \Delta t \quad \text{.....(9)}$$

Dimana:

t_{s0} = Waktu percik *lightning arrester* (μ detik)

8 = Waktu pada saat 8 μ detik

Δt = Waktu tegangan berdasarkan waktu muka gelombang (μ detik)

Sedangkan waktu tegangan berdasarkan waktu muka gelombang *lightning arrester* (Δt) dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan sebagai berikut (Hutauruk, 1991):

$$\begin{aligned} E_a &= e_{t=8} + b' \left(\frac{\alpha^3/10^4}{2} \right) \Delta t \\ \Delta t &= (E_a - e_{t=8}) / b' \left(\frac{\alpha^3/10^4}{2} \right) \quad \text{.....(10)} \end{aligned}$$

Dimana:

Δt = Waktu tembus atau waktu lompatan api (μ detik)

V_a = Tingkat isolasi dasar *lightning arrester* (kV)

$e_{t=8}$ = Tegangan pada titik sambungan pada waktu 8 μ detik

b' = Operator terusan untuk gelombang yang datang dari kanan

Selanjutnya dapat ditentukan tegangan pelepasan atau tegangan kerja ($e_{t=t_{s0}}$) dari *lightning arrester*. Tegangan kerja atau tegangan pelepasan merupakan salah satu faktor yang menentukan tingkat perlindungan dari penangkap petir. Jika tegangan kerja penangkap petir ada di bawah BIL dari peralatan yang dilindungi, maka faktor keamanan yang cukup untuk perlindungan peralatan yang optimum dapat diperoleh. Tegangan pelepasan/tegangan kerja dari *lightning arrester* dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan sebagai berikut (Hutauruk, 1991):

$$e_{t=8+\Delta t} = e_{t=8} + \left(\frac{e_{t=10} - e_{t=8}}{2} \right) \Delta t \quad \text{.....(11)}$$

$$e_{t=10+\Delta t} = e_{t=8+\Delta t} - \left(\frac{e_{t=10} - e_{t=8}}{2} \right) (2\mu t - \Delta t) \quad \text{.....(12)}$$

2.7. Naik Tegangan Pada Transformator

Naik tegangan pada transformator merupakan tegangan yang timbul pada saat terjadi surja hubung. Apabila tegangan yang timbul dibawah tingkat isolasi dasar transformator, maka transformator dapat dilindungi. Naik tegangan pada transformator dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan sebagai berikut (Hutauruk, 1991):

$$\begin{aligned}
 t &= 0 \text{ }\mu\text{detik}; & e_{t=0} &= 0 \\
 t &= 2 \text{ }\mu\text{detik}; & e_{t=2} &= 0 \\
 t &= 4 \text{ }\mu\text{detik}; & e_{t=4} &= e_{t=2} + 2\alpha^1/10^0 \\
 t &= 6 \text{ }\mu\text{detik}; & e_{t=6} &= e_{t=4} \\
 t &= 8 \text{ }\mu\text{detik}; & e_{t=8} &= e_{t=6} + 2\alpha^3/10^4 \\
 t &= 10 \text{ }\mu\text{detik}; & e_{t=10} &= e_{t=8} \\
 t &= 10 + \Delta t \text{ }\mu\text{detik}; & e_{t=10+\Delta t} &= e_{t=10} + \left(\frac{e_{t=10} + \alpha^5/10^8 - e_{t=6}}{2} \right) \Delta t
 \end{aligned}$$

2.8. Jarak *Lightning Arrester* Terhadap Transformator Daya

Meskipun yang paling baik adalah menempatkan *arrester* sedekat mungkin dengan alat yang dilindungi, tetapi dalam praktek kadang-kadang hal ini tidak memungkinkan jika jarak itu terlalu jauh. Tegangan abnormal yang sampai pada terminal dari peralatan akan lebih tinggi daripada tegangan pelepasan dan *arrester*. Hubungan antara tegangan terminal dari alat yang dilindungi dan jarak dari *arrester* adalah sebagai berikut (Hutauruk, 1991):

$$\begin{aligned}
 E_T &= E_a + 2 \frac{AS}{v} \\
 S &= (E_T - E_a) v / 2A
 \end{aligned}
 \tag{13}$$

2.9. Tegangan Tembus Isolator Udara

Besaran tegangan yang timbul pada isolator transmisi tergantung pada kedua parameter petir, yaitu puncak dan kecuraman muka gelombang petir. Tidak semua sambaran petir dapat mengakibatkan lompatan api (*flashover*) pada isolator karena juga bergantung dari besar tegangan yang timbul dan tidak melebihi tegangan tembus pada isolator ($E_{50\%}$) (Hutauruk, 1991).

$$E_{50\%} = \left(K_1 + \frac{K_2}{\Delta t^{0,75}} \right) \times 10^3
 \tag{14}$$

Dimana:

- $E_{50\%}$ = tegangan tembus isolator (kV)
- K_1 = $0,4 \times W$
- K_2 = $0,71 \times W$
- W = Panjang rentengan isolator (m)
- Δt = Waktu tembus atau waktu lompatan api (μ detik)

2.10. Arus Pelepasan Nominal

Arus pelepasan nominal adalah arus dengan harga puncak dan bentuk gelombang tertentu yang digunakan untuk menentukan kelas dari arester sesuai dengan kemampuan arus dan karakteristik pelindungnya. Untuk arus pelepasan dalam peristiwa gelombang berjalan dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan sebagai berikut (Hutauruk, 1991):

$$I_a = \frac{2E_{50\%} - E_a}{Z_1}
 \tag{15}$$

Dimana:

- I_a = Arus pelepasan arrester (kA)
- E_a = Tegangan gelombang datang (kV) (berdasarkan tegangan tembus isolator $E_{50\%}$)
- E_a = Tegangan kerja *arrester* (kV)
- Z_1 = Impedansi surja untuk penghantar udara (Ω)

2.11. Faktor Perlindungan (*Protection Margin*)

Faktor perlindungan adalah besar perbedaan tegangan antara BIL dari peralatan yang dilindungi dengan tegangan kerja dari arester. Pada waktu menentukan tingkat perlindungan

peralatan yang dilindungi oleh arester umumnya diambil harga 10 % diatas tegangan kerja dari arester, tujuannya untuk mengatasi kenaikan tegangan pada kawat penghubung dan toleransi pabrik. Besar faktor perlindungan ini umumnya 20 % dari BIL peralatan untuk arester yang dipasang dekat peralatan yang dilindungi. Faktor Perlindungan (FP) dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$FP(\%) = \frac{BIL - \text{Tingkat perlindungan arester}}{TID} \times 100\% \quad \dots\dots\dots(16)$$

Dimana:

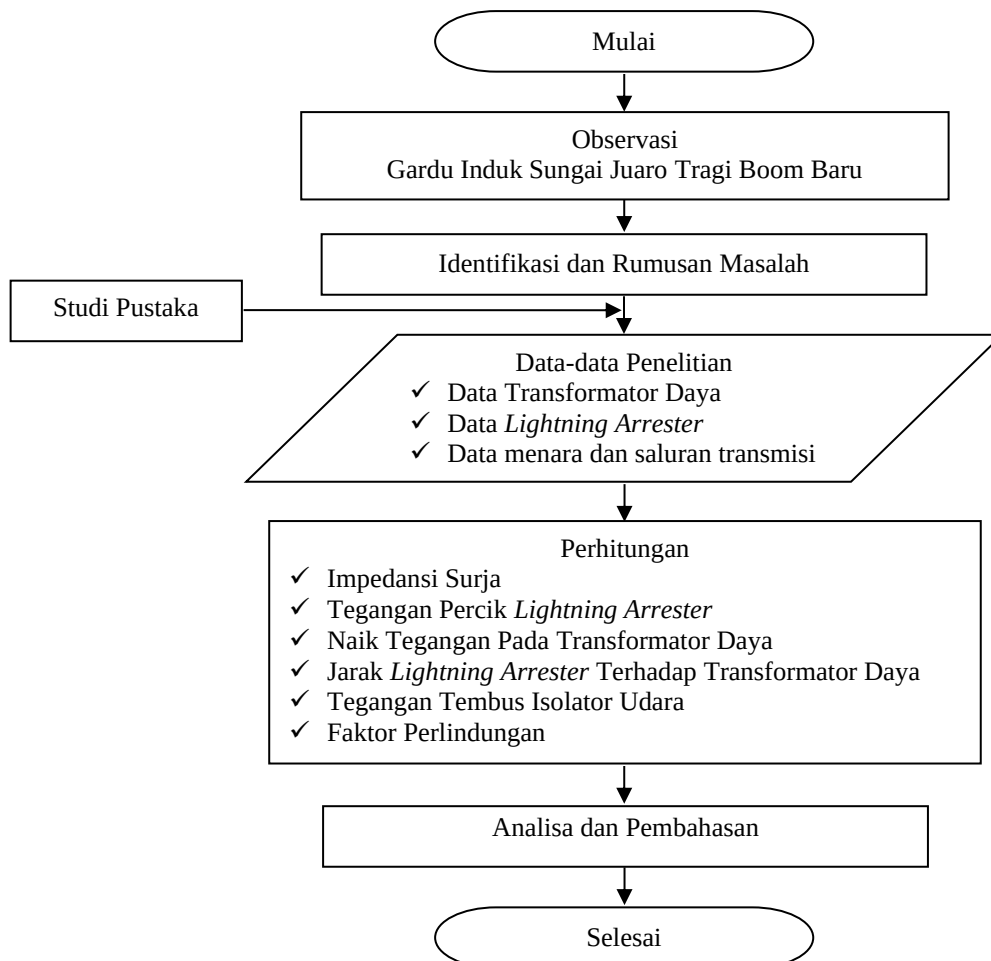
FP = Faktor perlindungan

Tingkat perlindungan arester = $E_a + 10\%$ (panjang kawat + toleransi pabrik)

BIL = Tingkat Isolasi Dasar (TID) berdasarkan peralatan yang dilindungi yaitu transformator.

3. METODE PENELITIAN

Diagram alir metode penelitian dapat dilihat pada gambar 3.1.



Gambar 3.1. Diagram Alir Penelitian

Penelitian dimulai dengan melakukan observasi ke lokasi penelitian, kemudian melakukan pengumpulan data operasional berupa data Transformator Daya, Data *Lightning Arrester*, Data menara dan saluran transmisi. Data yang sudah didapatkan kemudian dianalisa dan selanjutnya diproses agar dapat dipergunakan dalam perhitungan-perhitungan guna mendapatkan impedansi surja, tegangan percik *lightning arrester*, naik tegangan pada transformator daya, jarak *lightning arrester* terhadap transformator daya, tegangan tembus isolator udara, dan faktor perlindungan. Selanjutnya menganalisa semua hasil perhitungan, kemudian menganalisis tingkat perlindungan *lightning arrester*.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Gardu Induk Sungai Juaro berfungsi menyalurkan daya listrik sesuai dengan kebutuhan pada tegangan tertentu yang berasal dari Gardu Induk Boom Baru. Untuk menunjang keandalan sistem tenaga listrik tersebut diperlukan alat pelindung peralatan listrik pada Gardu Induk Sungai Juaro dari bahaya tegangan lebih dari luar dan dalam. Alat pelindung tersebut adalah *lightning arrester*. *Lightning arrester* merupakan alat proteksi bagi peralatan listrik terhadap tegangan lebih, yang disebabkan oleh surja hubung dan surja petir. *Lightning arrester* bersifat sebagai *bypass* di sekitar isolasi yang membentuk jalan dan mudah dilalui arus petir ke sistem pentanahan sehingga tidak menimbulkan tegangan lebih yang tinggi yang merusak isolasi peralatan listrik. Jadi pada kerja normal arester itu berlaku sebagai isolator dan bila timbul surja dia berlaku sebagai konduktor, jadi melewati arus yang tinggi. Setelah surja hilang, arester harus dengan cepat kembali menjadi isolator, sehingga pemutus daya tidak sempat membuka. Penempatan arester yang baik adalah menempatkan arester sedekat mungkin dengan peralatan yang dilindungi.

4.1. Data-data Penelitian

Saluran transmisi pada Gardu induk Sungai Juaro merupakan saluran transmisi 70 kV dengan tegangan nominal sistem adalah 66 kV dan tegangan tertinggi sistem adalah 72,5 kV. Data-data pada Gardu induk Sungai Juaro dapat dilihat dibawah ini.

4.1.1. Data Transformator Daya

• Kapasitas Transformator	: 20 MVA
• Frekuensi	: 50 Hz
• Tegangan Primer	: 70 kV
• Tegangan sekunder	: 20 kV
• Tahun pembuatan	: 1994
• Type	: SFZ-20000/70
• Nomor seri	: A94 030 2
• Standar	: IEC 76-1979
• Fasa	: 3 (tiga)
• Impedansi	: 10,25 %
• BIL (E_p)	: 325 kV
• Hubungan	: STAR-STAR
• Pendingin	: ONAN/ONAF
• Berat Total	: 37.160 kg
• Berat Minyak	: 8.180 kg
• Tank	: 2.800 kg
• Merk	: XIAN
• Buatan	: CHINA



Gambar 4.1. Transformator Daya 20 MVA Gardu Induk Sungai Juaro

4.1.2. Data *Lightning arrester*

- Merk : ABB
- Type : PEXLIM
- Tegangan nominal : 70 kV
- Tegangan pengenalan : 75 kV
- BIL (E_a) : 270 kV
- Arus pelepasan nominal : 10 kA
- Nomor seri : R = 75228567, S = 75228666, T = 75228565
- Frekuensi : 50 Hz
- Jarak pemasangan : 7 m

Gambar 4.2. *Lightning Arrester* Gardu Induk Sungai Juaro**4.1.3. Data Penghantar Saluran Transmisi**

- Tipe kawat penghantar : ACSR
- Ukuran nominal : 240/40 (mm^2)
- Luas penampang : 282,5 mm^2
- Diameter (d) : 21,9 mm^2
- Jari-jari (r) : 10,95 mm = 1,095 cm = 0,01095 m
- Berat (W) : 987 kg/km = 0,987 kg/m
- Kuat tarik minimum (T) : 8.811 kg
- Panjang rentangan isolator : 0,886 m

4.1.4. Data Menara Transmisi

- Tinggi menara : 23,77 m
- Panjang *upper cross arm* (X_1) : 2,44 m
- Panjang *middle cross arm* (X_2) : 3,35 m
- Panjang *lower cross arm* (X_3) : 2,44 m
- Ketinggian *lower cross arm* dari tanah (h_{lower}) : 14,64 m
- Jarak antara *cross arm* (y) : 3,05 m
- Jarak antara menara (S) : 180 m

4.2. Perhitungan

4.2.1. Perhitungan Tegangan Tertinggi Sistem

Tegangan sistem tertinggi umumnya diambil harga 110 % dari harga tegangan nominal sistem. Penentuan tegangan ini berguna untuk mengetahui tegangan tertinggi yang dapat dihasilkan gardu induk. Tegangan tertinggi sistem dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan (1) sebagai berikut:

$$V_m = 1,1 \times V_n = 1,1 \times 66 = 72,6 \text{ kV}$$

4.2.1. Perhitungan Rating Pengenal Arrester

Penentuan rating pengenal *arrester* atau tegangan dasar *arrester* dapat ditentukan berdasarkan tegangan sistem maksimum yang mungkin terjadi. Untuk menentukan besarnya tegangan dasar *arrester* atau tegangan pengenal *arrester* dapat digunakan persamaan (2) sebagai berikut:

$$V_c = V_m \times \text{koefisien pentanahan} = 72,6 \times 0,8 = 58,08 \text{ kV}$$

Dari hasil perhitungan diperoleh tegangan pengenal *arrester* $V_c = 58,08 \text{ kV}$, yang berarti tegangan kerja *arrester* berada di bawah TID atau BIL dari peralatan yang dilindungi, sehingga faktor keamanan yang optimum terhadap peralatan dapat diperoleh.

4.2.2. Perhitungan Impedansi Surja

Andongan merupakan jarak lenturan dari suatu bentangan kawat penghantar antara dua menara transmisi yang diperhitungkan berdasarkan garis lurus (horizontal) kedua menara tersebut. Besarnya nilai andongan penghantar transmisi dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan (3) sebagai berikut:

$$D = \frac{W S^2}{8 T} = \frac{0,987 \times 180^2}{8 (8.811)} = \frac{31.979}{70.488} = 0,4537 \text{ m}$$

Untuk menentukan impedansi surja maka harus ditentukan terlebih dahulu tinggi rata-rata penghantar dari atas permukaan tanah, dengan menggunakan persamaan (4) sebagai berikut:

$$h = \frac{(h_{upper} - D) + (h_{middle} - D) + (h_{lower} - D)}{3} = \frac{(20,2863) + (17,2363) + (14,1863)}{3} = 17,2363 \text{ m}$$

Setelah didapatkan tinggi rata-rata penghantar dari atas permukaan tanah (h), maka impedansi surja untuk penghantar udara dengan menggunakan persamaan (5) sebagai berikut:

$$Z_1 = 60 \ln \left(\frac{2h}{r} \right) = 60 \ln \left(\frac{2(17,2363)}{0,01095} \right) = 60 \ln(3.148,19) = 483,275 \Omega$$

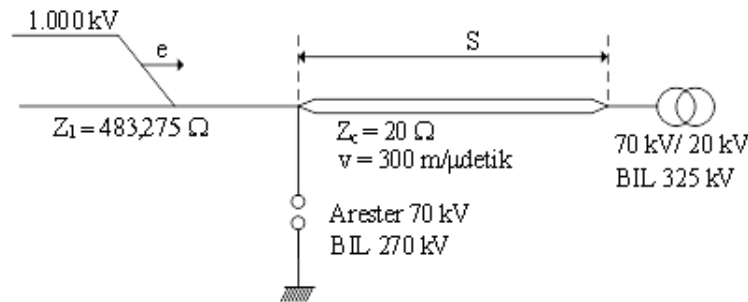
Sedangkan impedansi surja untuk kabel adalah $Z_c = 20 \Omega$

4.2.3. Perhitungan Kecepatan Gelombang Berjalan

Kecepatan merambat gelombang berjalan pada saluran transmisi dapat dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan (7) sebagai berikut:

$$v = \frac{1}{\sqrt{LC}} = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{2 \times 10^{-7} \ln\left(\frac{2h}{r}\right)}{118 \times 10^9 \ln\left(\frac{2h}{r}\right)}\right)}} = 3 \times 10^{10} \text{ cm/detik} = 300 \text{ m}/\mu\text{detik}$$

4.2.4. Perhitungan Tegangan Percik *Lightning Arrester*



Gambar 4.3. Transformator dan *Lightning Arrester* terpisah sejauh S

Gambar 4.3. menunjukkan gelombang surya petir datang dari kiri dan setelah gelombang mencapai titik pemasangan *lightning arrester* maka sebagian gelombang akan dipantulkan dan sebagian gelombang akan diteruskan. Untuk menentukan tegangan percik *lightning arrester* harus ditentukan terlebih dahulu operator pantulan dan terusan. Operator pantulan dan terusan dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$\begin{aligned} a &= \frac{Z_c - Z_1}{Z_c + Z_1} = \frac{20 - 483,275}{20 + 483,275} = -0,9205 \\ b &= \frac{Z_1 - Z_c}{Z_1 + Z_c} = \frac{483,275 - 20}{483,275 + 20} = 0,9205 \\ a' &= \frac{2Z_c}{Z_c + Z_1} = \frac{2 \times 20}{20 + 483,275} = 0,0795 \\ b' &= \frac{2Z_1}{Z_1 + Z_c} = \frac{2 \times 483,275}{483,275 + 20} = 1,9208 \end{aligned}$$

Untuk kecuraman gelombang datang pertama, harus ditentukan waktu kecuraman gelombang memasuki gardu induk atau transformator, dan didapatkan nilai:

$$t = 2 \mu\text{detik}$$

$$A = 1.000 \text{ kV}$$

$$\alpha = A \cdot a' = 1.000 \times 0,0795 = 79,479$$

Selanjutnya menentukan nilai tegangan pada titik sambungan kabel kawat udara tegangannya dimulai pada $t = 0$, dan nilai tegangan pada waktu selanjutnya merupakan jumlah antara nilai tegangan sebelumnya dengan faktor redaman. Nilai tegangan gelombang pantul adalah sama dengan gelombang datang. Maka tegangan pada titik sambungan kabel-kawat udara pada saat *lightning arrester* tidak ada untuk setiap 2 μdetik adalah:

$$t = 0 \mu\text{detik}; \quad e_{t=0} = 0$$

$$t = 2 \mu\text{detik}; \quad e_{t=2} = e_{t=0} + \alpha^1/10^0 = 0 + 79,479^1/10^0 = 79,479 \text{ kV}$$

$$t = 4 \mu\text{detik}; \quad e_{t=4} = e_{t=2} = 79,479 \text{ kV}$$

$$t = 6 \mu\text{detik}; \quad e_{t=6} = e_{t=4} + \alpha^1/10^0 + \alpha^3/10^4 = 79,479 + 79,479^1/10^0 + 79,479^3/10^4$$

$$e_{t=6} = 79,479 + 79,479 + 50,207 = 209,166 \text{ kV}$$

$$t = 8 \mu\text{detik}; \quad e_{t=8} = e_{t=6} = 209,166 \text{ kV}$$

$$t = 10 \mu\text{detik}; e_{t=10} = e_{t=8} + \alpha^3/10^4 + \alpha^5/10^8 = 209,166 + 79,479^3/10^4 + 79,479^5/10^8$$

$$e_{t=10} = 209,166 + 50,207 + 31,716 = 291,088 \text{ kV}$$

$$t = 12 \mu\text{detik}; e_{t=12} = e_{t=10} = 291,088 \text{ kV}$$

Kemudian waktu tegangan berdasarkan waktu muka gelombang *lightning arrester* (Δt) dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan (10) sebagai berikut:

$$\Delta t = (E_a - e_{t=8})/b' \left(\frac{\alpha^3/10^4}{2} \right) = (270 - 209,166)/1,9208 \left(\frac{79,479/10^4}{2} \right)$$

$$\Delta t = \frac{60,834}{48,2118} = 1,26 \mu\text{detik}$$

Maka waktu percik *lightning arrester* (t_{s0}) pada lokasi pemasangan *arrester* dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan (11) sebagai berikut:

$$t_{s0} = 8 + \Delta t = 8 + 1,26 = 9,26 \mu\text{detik}$$

Selanjutnya dapat ditentukan tegangan pelepasan atau tegangan kerja ($e_{t=9,26}$) dari *lightning arrester* dengan menggunakan persamaan (11) dan persamaan (12) sebagai berikut:

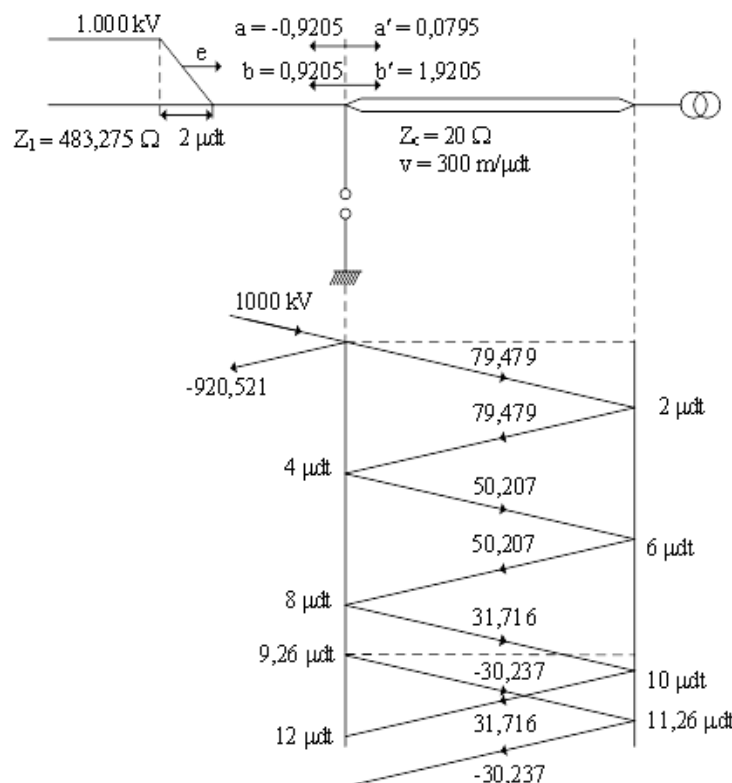
$$t = 9,26 \mu\text{detik}; e_{t=9,26} = e_{t=8} + \left(\frac{e_{t=10} - e_{t=8}}{2} \right) \Delta t = 209,166 + \left(\frac{291,088 - 209,166}{2} \right) 1,26$$

$$e_{t=9,26} = 209,166 + 51,685 = 260,851 \text{ kV}$$

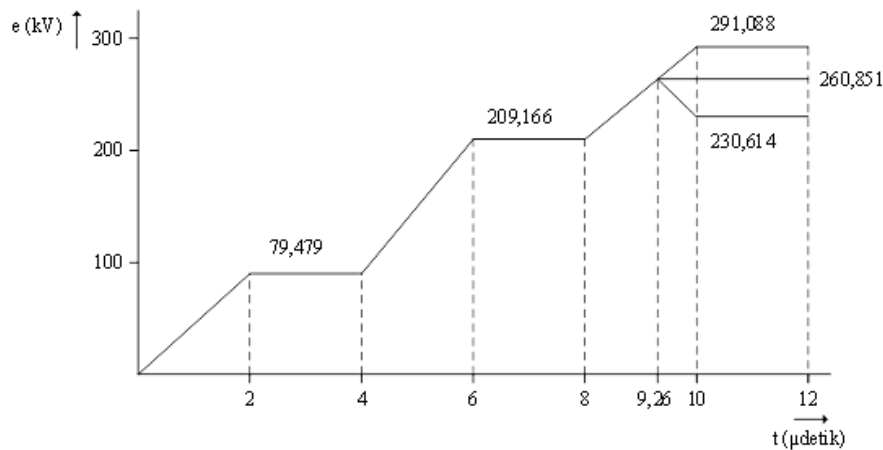
$$t = 11,26 \mu\text{detik}; e_{t=11,26} = e_{t=9,26} - \left(\frac{e_{t=10} - e_{t=8}}{2} \right) (2\mu t - \Delta t)$$

$$e_{t=11,26} = 260,851 - \left(\frac{291,088 - 209,166}{2} \right) (2\mu t - 1,26 \mu t)$$

$$e_{t=11,26} = 260,851 - 30,237 = 230,614 \text{ kV}$$



Gambar 4.4. Diagram tangga kondisi *lightning arrester* tidak ada dan ada

Gambar 4.5. Tegangan kondisi *lightning arrester* tidak ada dan ada

4.2.5. Perhitungan Naik Tegangan Pada Transformator Daya

Pada saat $e = 390 \text{ kV}$, *lightning arrester* telah memercik (*spark over*), waktu percik arrester (t_{so}) adalah sebesar $t_{so} = 8 + \Delta t$. Naik tegangan pada transformator dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$t = 0 \text{ μdetik}; \quad e_{t=0} = 0$$

$$t = 2 \text{ μdetik}; \quad e_{t=2} = 0$$

$$t = 4 \text{ μdetik}; \quad e_{t=4} = e_{t=2} + 2\alpha^1/10^0 = 0 + 2 \times 79,479^1/10^0 = 158,959 \text{ kV}$$

$$t = 6 \text{ μdetik}; \quad e_{t=6} = e_{t=4} = 158,959 \text{ kV}$$

$$t = 8 \text{ μdetik}; \quad e_{t=8} = e_{t=6} + 2\alpha^3/10^4 = 158,959 + 2 \times 79,479^3/10^4$$

$$t = 8 \text{ μdetik}; \quad e_{t=8} = 158,959 + 100,414 = 259,373 \text{ kV}$$

$$t = 10 \text{ μdetik}; \quad e_{t=10} = e_{t=8} = 259,373 \text{ kV}$$

$$t = 11,26 \text{ μdetik}; \quad e_{t=11,26} = e_{t=10} + \left(\frac{e_{t=10} + \alpha^5/10^8 - e_{t=6}}{2} \right) \Delta t$$

$$e_{t=11,26} = 259,373 + \left(\frac{291,088 + 31,716 - 158,959}{2} \right) 1,26 = 259,373 + 40,019$$

$$e_{t=11,26} = 299,392 \text{ kV}$$

4.2.6. Perhitungan Jarak *Lightning Arrester* Terhadap Transformator Daya

Jarak *lightning arrester* terhadap transformator daya dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan (13) sebagai berikut:

$$S = (E_T - E_a) v/2A$$

$$S = (299,392 - 260,851) 300/2 \times 1.000 = 5,7812 \text{ m}$$

4.2.7. Perhitungan Tegangan Tembus Isolator Udara

Besaran tegangan yang timbul pada isolator transmisi tergantung pada kedua parameter petir, yaitu puncak dan kecuraman muka gelombang petir. Tidak semua sambaran petir dapat mengakibatkan lompatan api (*flashover*) pada isolator karena juga bergantung dari besar tegangan yang timbul dan tidak melebihi tegangan tembus pada isolator ($V_{50\%}$). Untuk menentukan tegangan tembus isolator udara di gunakan persamaan (14), yaitu:

$$V_{50\%} = \left(K_1 + \frac{K_2}{\Delta t^{0,75}} \right) 10^3$$

$$V_{50\%} = \left(0,4 \times 0,886 + \frac{0,71 \times 0,886}{1,26^{0,75}} \right) 10^3$$

$$V_{50\%} = \left(0,3544 + \frac{0,6291}{1,1893} \right) 10^3 = 883,3831 \text{ kV}$$

4.2.8. Perhitungan Arus Pelepasan Nominal (*Nominal Discharge Current*)

Arus pelepasan nominal adalah arus dengan harga puncak dan bentuk gelombang tertentu yang digunakan untuk menentukan kelas dari arester sesuai dengan kemampuan arus dan karakteristik pelindungnya. Untuk arus pelepasan dalam peristiwa gelombang berjalan dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan (15), yaitu:

$$I_a = \frac{2E_{50\%} - E_a}{Z_1}$$
$$I_a = \frac{2 \times 883,3831 - 260,851}{483,275} = 3,1225 \text{ kA}$$

4.2.9. Perhitungan Faktor Perlindungan

Faktor perlindungan *lightning arrester* terhadap transformator daya dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan (16) sebagai berikut:

$$FP(\%) = \frac{BIL - \text{Tingkat perlindungan arrester}}{TID} \times 100\%$$
$$FP(\%) = \frac{325 - (260,851 + 260,851 \times 10\%)}{325} \times 100\%$$
$$FP(\%) = \frac{325 \text{ kV} - 286,9361}{325 \text{ kV}} \times 100\% = 11,7\%$$

4.3. Analisa dan Pembahasan

Berdasarkan hasil perhitungan tegangan percik *lightning arrester*, dapat diketahui bahwa tegangan surja akan selalu naik jika *lightning arrester* tidak terpasang, dimana pada $t = 10 \mu\text{detik}$ dengan nilai $e_{t=10} = 291,088 \text{ kV}$. Setelah *lightning arrester* terpasang, tegangan surja dapat diredam dengan baik oleh *lightning arrester*, dimana pada $t = 9,26 \mu\text{detik}$ dengan nilai $e_{t=9,26} = 260,851 \text{ kV}$ kemudian menurun pada $t = 11,26 \mu\text{detik}$ dengan nilai $e_{t=11,26} = 230,614 \text{ kV}$. Kemudian hasil perhitungan jarak *lightning arrester* terhadap Transformator Daya 20 MVA pada Gardu Induk Sungai Juaro Palembang adalah 5,7812 m, sedangkan *lightning arrester* terpasang pada jarak 7 m. Berarti jarak tersebut masih berada dalam batasan yang telah ditetapkan oleh PT PLN, menurut SPLN 7: 1978 bahwa untuk sistem 66 kV dengan transmisi sirkit ganda jarak antara penangkap petir dengan transformator tidak melebihi 34 m. Kemudian untuk transmisi sirkit tunggal jarak antara penangkap petir dengan transformator tidak melebihi 17 m.

Tingkat perlindungan *lightning arrester* terhadap Transformator Daya 20 MVA pada Gardu Induk Sungai Juaro Palembang adalah 286,93 kV dengan faktor perlindungan 11,7 % dimana nilai ini lebih rendah dari tingkat isolasi dasar peralatan yaitu 325 kV sehingga *lightning arrester* sudah memberikan perlindungan yang cukup baik.

5. KESIMPULAN

Dari hasil analisa dan pembahasan diatas dapat diambil kesimpulan dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

- 1) Jarak *lightning arrester* terhadap Transformator Daya 20 MVA yang terpasang adalah 7 m, sedangkan dari hasil perhitungan adalah 5,7812 m. Saluran transmisi pada Gardu Induk Sungai Juaro Palembang adalah transmisi sirkit ganda, dan berdasarkan SPLN 7: 1978 bahwa untuk sistem 66 kV dengan transmisi sirkit ganda jarak antara penangkap petir dengan transformator tidak melebihi 34 m. Berarti jarak *lightning arrester* terhadap Transformator Daya 20 MVA masih berada dalam batasan yang telah ditetapkan oleh PT PLN.
- 2) Kenaikan tegangan yang terjadi pada transformator masih berada dibawah BIL, dengan demikian dapat ditentukan bahwa peralatan masih dapat terlindungi oleh *lightning arrester* karena pemasangan masih dibawah harga maksimum atau belum melebihi standar BIL.

DAFTAR PUSTAKA

- Arismunandar, Artono dan Kuwahara, Susumu. 2004. *Teknik Tenaga Listrik*, Jilid III. Jakarta: Pradnya Paramita.
- Hutauruk, T. S. 1991. *Gelombang Berjalan dan Proteksi Surja*. Jakarta: Erlangga
- Keputusan Direksi PT PLN (Persero) Nomor: 0520-2.K/DIR/2014 Tentang Himpunan Buku Pedoman Pemeliharaan Peralatan Primer Gardu Induk, Lampiran Dokumen Nomor: PDM/PGI/12:2014 Tentang Buku Pedoman Pemeliharaan *Lightning arrester* (LA).
- PT PLN. 1978. Standar Perusahaan Listrik Umum Negara SPLN 7: 1978 Tentang Pedoman Pemilihan Tingkat Isolasi Transformator dan Penangkap Petir.
- Tobing, L., Bonggas. 2012. *Peralatan Tegangan Tinggi*, Edisi Kedua. Jakarta: Erlangga.