

BAB IV

HASIL DAN ANALISIS

Pada bab ini akan di bahas tentang perhitungan jarak ideal arrester dan trsaformator serta analisis dari hasil simulasi program ATP, dengan data yang di dapat dari penelitian dilapangan pada Gardu Induk 150 kV Kentungan. Perhitungan manual jarak ideal dan transformator disini menggunakan persamaan dari strandari IEC (1995) dan PLN (1978:4). Dan setelah didapat jarak ideal dari hasil perhitungan maka langkah selanjutnya adalah merangkai simulasi pada program software ATP dengan memberikan beberapa kondisi yang berbeda yaitu, perubahan jarak arrester terhadap transformator dan perubahan durasi waktu sambaran petir pada saluran transmisi, serta durasi waktu gelombang pada sambaran petir di Gardu Induk 150 kV Kentungan.

1.1. Perhitungan Tegangan Dasar Arrester

Tegangan dasar arrester dapat dihitung menggunakan persamaan (2.12) sebaga berikut:

$$E_r = \alpha \cdot \beta \cdot U_m$$

Sehingga :

$$E_r = 0.8 \times 1.2 \times 150 \text{ kV}$$

$$E_r = 144 \text{ kV}$$

Dengan :

E_r = Tegangan dasar arrester

A = Koefisien pembumian (0,8)

B = Toleransi, guna memperhitungkan fluktuasi tegangan dan efek ferranti (1,2)

U_m = Tegangan sistem maksimum (tegangan maksimum di Gardu Induk Kentungan) 150 kV

Maka dengan persamaan diatas didapat bahwa tegangan dasar arrester di Gardu Induk 150 kV Kentungan sebesar 144 kV.

1.2. Jarak Arrester dan Transformator Menurut IEC (1950) dan SPLN (1978)

Perhitungan jarak arrester dan transformator menurut standari yang telah ditetapkan oleh IEC (1958) dan SPLN (1978) dapat dicari menggunakan persamaan (2.20) sebagai berikut:

$$E_p = E_a + 2 A S / v$$

Sehingga:

$$650 = 450 + (2 \times 1000) S / 300$$

$$S = \frac{(650 - 450) 300}{2 \times 1000}$$

$$S = 28,5 \text{ Meter}$$

Dengan nilai:

$$E_p = 650 \text{ kV (Tegangan jepitan transformator GITET / SPLN7, 1978:4)}$$

$$E_a = 450 \text{ kV (Tegangan percikan arrester GITET/ SPLN7, 1978:4)}$$

$$A = 1000 \text{ kV}/\mu\text{s (Rekomendasi IEC, 1958 Recommendation for Lightning Arrester, 99)}$$

$$v = 300 \text{ m}/\mu\text{s (Kecepatan cahaya)}$$

1.3. Jarak Ideal Arrester dan Transformator di Gardu Induk 150 kV Kentungan

Dengan menerapkan persamaan yang sama dengan yang telah ditetapkan oleh IEC (1958) dan SPLN (1978), maka jarak ideal arrester dan transformator di Gardu Induk 150 kV Kentungan dapat dicari dengan persamaan (2.20) sebagai berikut :

$$E_p = E_a + 2 A S / v$$

$$165,750 = 132 + (2 \times 1000) S / 300$$

$$S = \frac{(165,750 - 132) \times 300}{2 \times 1000}$$

$$S = 5,0625 \text{ meter}$$

Dengan nilai:

$$E_p = 165,750 \text{ kV (Tegangan jepitan Tap 1 transformator II GI 150 kV)}$$

Kentungan

$$E_a = 132 \text{ kV (Tegangan percikan arrester transformator II GI 150 kV)}$$

Kentungan)

$$A = 1000 \text{ kV}/\mu\text{s (Rekomendasi IEC, 1958 Recommendation for)}$$

Lightning Arrester, 99)

$$v = 300 \text{ m}/\mu\text{s (Kecepatan cahaya)}$$

1.4. Perhitungan Nilai Impedansi (Z) di beban

Perhitungan nilai impedansi (Z) di beban dapat dicari menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$Z = \frac{V^2}{S}$$

$$Z = \frac{20^2 \text{ kV}}{60 \text{ MVA}}$$

$$Z = 0,0067 \text{ k}\Omega$$

Dengan nilai

$$V = \text{Tegangan di sisi sekunder transformator (kV)}$$

(tegangan di sisi sekunder transformator II GI 150 kV)

Kentungan adalah 20 kV)

$$S = \text{Daya semu transformator (VA)}$$

(daya semu pada transformator II GI 150 kV Kentungan adalah

60 MVA karena menggunakan pendingin sistem ONAF)

$$Z = \text{Impedansi transformator } (\Omega)$$

Sehingga berdasarkan nilai impedansi dari hasil perhitungan di atas, maka dapat dicari nilai dari Resistansi (R) dan nilai Induktansi (L) menggunakan asumsi pf (factor daya) $\theta = 0,8$ adalah sebagai berikut:

$$\text{Arc cos } \theta$$

$$\text{Arc cos } 0.8 = 36,68^\circ$$

$$Z = R + j X_L$$

$$R = 21,006 \cos 36.86^\circ$$

$$R = 16.80 \text{ ohm}$$

$$X_L = 21.006 \sin 36.86^\circ$$

$$X_L = 12.60 \text{ H}$$

**1.5. Nilai Induktansi (L) dan Kapasitansi (C) kawat konduktor SUTT
(antar tower 150 kV) dan *Switchyard* di Gardu Induk 150 kV Kentungan**

Berikut ini adalah perhitungan nilai Induktansi (L) dan nilai Kapasitansi (C) pada menara saluran transmisi dan *Switchyard* pada Gardu Induk 150 kV Kentungan.

1.5.1. Nilai Induktansi (L)

Tinggi tower 15 m

$$L = 2 \times 10^{-7} \ln 2h/r$$

$$L = 2 \times 10^{-7} \ln 2 \times 15 / 0,013$$

$$L = 14.74 \times 10^{-4} \text{ nH}$$

Tinggi *Switchyard* 10 m

$$L = 2 \times 10^{-7} \ln 2h/r$$

$$L = 2 \times 10^{-7} \ln 2 \times 10 / 0,013$$

$$L = 14.67 \times 10^{-4} \text{ mH}$$

1.5.2. Nilai Kapasitansi (C)

Tinggi tower 15 m

$$C = \frac{10^{-9}}{18 \ln 2h/r}$$

$$C = \frac{10^{-9}}{18 \ln 2 \times 15 / 0.013}$$

$$C = \frac{10^{-9}}{18 \ln 7.74}$$

$$C = 2.714 \times 10^{-5} \mu\text{F}$$

Tinggi *Switchyard* 10 m

$$C = \frac{10^{-9}}{18 \ln 2h/r}$$

$$C = \frac{10^{-9}}{18 \ln 2 \times 10 / 0.013}$$

$$C = \frac{10^{-9}}{18 \ln 7.33}$$

$$C = 7.570 \times 10^{-6}$$

Dengan nilai:

R = Jari-jari lawat konduktor (0.013 m)

Gardu Induk 150 kV Kentungan menggunakan kawat konduktor atau saluran transmisi udara berjenis ACSR “Aluminium Cable Steel Reinforced” dengan luas penampang 800 mm²

h = Tinggi

Dengan tinggi tower dengan penampang bawah dianggap rata (15 m)

Tinggi switchyard dengan penampang bawah dianggap rata (10 m)

1.6. Impedansi Surja di Tower Saluran Udara Tegangan Tinggi dan Switchyard di Gardu Induk 150 kV Kentungan

Impedansi surja di tower saluran udara tegangan tinggi dan *Switchyard* Gardu Induk 150 kV Kentungan dapat dicari menggunakan persamaan (2.5a) sebagai berikut:

$$Z = \sqrt{\frac{L}{C}} = 60 \ln 2h/r$$

Maka dari persamaan tersebut dapat diperoleh impedansi tower adalah sebagai berikut:

$$Z = 60 \ln (2 \times 15 / 0.013)$$

$$Z = 60 \ln (2307.69)$$

$$Z = 464.64 \Omega$$

Sedangkan untuk impedansi di *Switchyard* Gardu Induk 150 kV Kentungan adalah sebagai berikut:

$$Z = 60 \ln (2 \times 10 / 0.013)$$

$$Z = 60 \ln (1538,46)$$

$$Z = 440.31 \Omega$$

1.7. Arus Pelepasan Arrester pada Transformator II di *Switchyard* Gardu Induk 150 kV Kentungan

Perhitungan arus pelepasan arrester pada transformator di *Switchyard* Gardu Induk 150 kV Kentungan dapat di cari menggunakan persamaan (2.17) sebagai berikut:

$$I\alpha = \frac{2U_d - U_a}{Z}$$

$$I\alpha = \frac{2 \times 200 \text{ kV} - 144 \text{ kV}}{440.31}$$

$$I\alpha = 0.581 \text{ kA}$$

Dengan nilai:

$I\alpha$ = Arus pelepasan arrester (kA)

U_d = Tegangan gelombang datang (kV) diasumsikan sebesar 200kV

U_a = Tegangan Kerja Arrester (144 kV)

Z = Impedansi Surja

1.8. Tegangan Surja

Tegangan surja dapat dihitung menggunakan persamaan SPLN 7.1987 dengan asumsi sambaran petir sebesar 200 kV maka tegangan surja yang masuk ke sisi jumper (e_2) adalah sebagai berikut:

$$e_2 = (2Z_{p1} / (Z_{p1} + Z_{p2})) \times e_1$$

$$e_2 = (2 \times 43.4775 / (43.4775 + 47.8231)) \times 200$$

$$e_2 = 190,4762 \text{ kV/ } \mu\text{s}$$

Dengan nilai:

e_2 = Tegangan surja yang masuk ke sisi jumper (kV)

e_1 = Tegangan surja sambaran petir 200 kV/ μs

Z_{p1} = Impedansi transformator primer (Ω)

Impedansi transformator primer menurut SPLN 7.1987 = 43.47

Z_{p2} = Impedansi transformator sekunder (Ω)

Impedansi transformator sekunder menurut SPLN 7.1987 =

47,8231 ohm

1.9. Tegangan Sambaran Petir pada Transformator II Gardu Induk 150 kV

Kentungan

Tegangan sambaran petir maksimum pada Transformator II Gardu Induk 150 kV Kentungan dengan asumsi sambaran petir 200 kV/ μ s dengan menggunakan persamaan dari SPLN 7. 1987 sebagai berikut:

$$e_2 = (2Z_{p1} / (Z_{p1} + Z_{p2})) \times e_1$$

$$e_2 = (2 \times 21,011.1 / (21,011.1 + 2,546.8)) \times 200$$

$$e_2 = 356.75 \text{ kV/} \mu\text{s}$$

Dengan nilai:

e_2 = Tegangan surja yang masuk ke sisi jumper (kV)

e_1 = Tegangan surja sambaran petir 200 kV/ μ s

Z_{p1} = Impedansi transformator primer (Ω)

Impedansi transformator primer 21,011.1 ohm

Z_{p2} = Impedansi transformator sekunder (Ω)

Impedansi transformator sekunder 2,546.8 ohm

1.10. Simulasi ATP (Alternative Transients Program)

Pada penelitian ini terdapat dua kondisi yang akan dianalisis melalui simulasi program ATP yaitu kondisi dimana sistem sedang tidak dipasang arrester dan kondisi kedua yaitu saat sistem terpasang arrester. Jenis arrester yang terpasang pada transformator II Gardu Induk 150 kV Kentungan adalah arrester jenis Metal Oxide Variastor (MOV). Pada simulasi pertama, terdapat tiga titik pemantauan sambaran petir yang terjadi yaitu pada titik sambaran petir, titik jepitan transformator dan titik beban (*load*). Sedangkan pada simulasi kedua masih menggunakan cara atau skenario yang sama seperti pada simulasi pertama, namun terdapat penambahan arrester dalam sistem dengan asumsi jarak seperti dalam perhitungan diatas dan jarak real di lapangan serta beberapa asumsi jarak lainnya. Supaya diperoleh data tentang pemasangan jarak ideal arrester berdasarkan jumlah sambaran dan tegangan yang terjadi pada jepitan transformator bagaian primer di Gardu Induk 150 kV Kentungan.

Adapun asumsi umum dari kedua simulasi program ATP tersebut adalah:

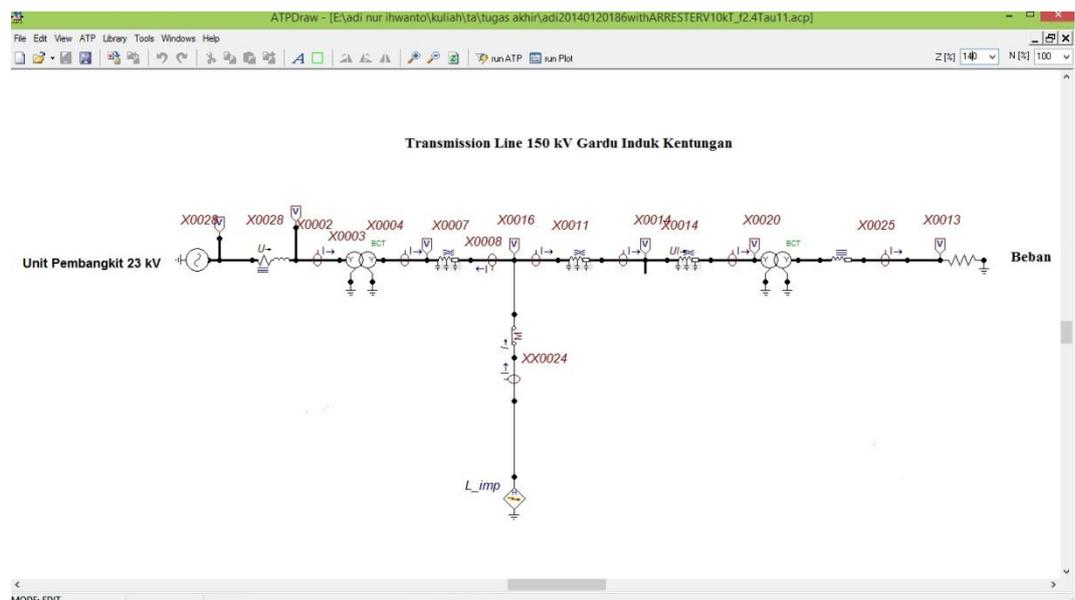
Simulasi hanya akan digambar dengan *single line diagram* seperti pada gambar *single line diagram* yang telah didapat dari hasil pengambilan data pada Gardu Induk 150 kV Kentungan.

Dengan asumsi bahwa sambaran mengenai salah satu fase (R, S atau T) yang saluran tersebut tersambung secara langsung ke transformator II bagian primer 150/20 kV di Gardu Induk 150 kV Kentungan.

Jarak sambaran pada objek atau transformator adalah sejauh 0,5 km dari titik sambaran.

1.10.1. Simulasi ATP Tanpa Arrester MOV

Simulasi ini akan di susun *single line diagram* yang terdiri dari pembangkit atau sumber pembangkit yang berupa generator 23 kV dan RLC 3 fase, transformator step up 23/150 kV, saluran transmisi, transformator step down 150/20 kV, saluran distribusi dan beban. Dengan durasi waktu gelombang (T_f) $1.2E-6$ serta dengan variasi durasi sambaran (τ) $5E-5$ dan sambaran petir sebesar 10 kV/A



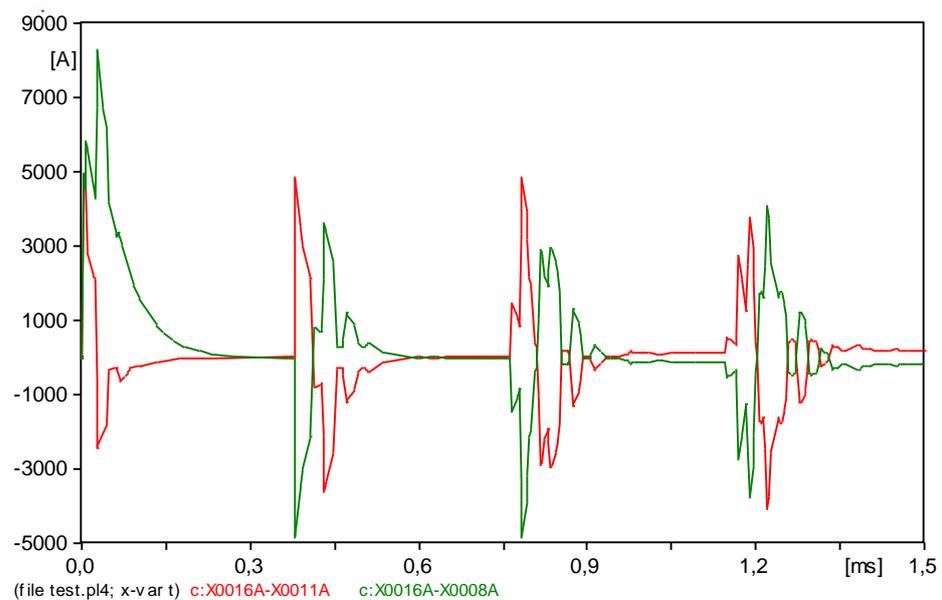
Gambar 4. 1. *Trasmission line* 150 kV tanpa perlindungan arrester

1. Kondisi Dititik Sambaran Petir

a. Arus Terhadap Waktu

Kondisi besaran arus yang berada pada titik sambaran akan mengalir ke arah sumber pembangkit dan ke arah transformator (*upstream* dan *downstream*) dengan *upstream* merupakan aliran yang bergerak ke arah sumber pembangkit (transformator 32/150 kV) sedangkan untuk *downstream* merupakan aliran arus yang bergerak ke arah transformator yang berada pada Gardu Induk 150 kV Kentungan.

Dibawah ini adalah gambar gelombang arus terhadap waktu dari kondisi *upstream* dan *downstream* dengan durasi gelombang (T-f) $1.2\text{E-}6$, durasi sambaran $5\text{E-}5$ dan besaran sambaran 10 kV.



Gambar 4. 2. Gelombang arus terhadap waktu di titik sambaran petir

Dari gambar 4.2 diatas terlihat bahwa arus yang mengalir ke arah Gardu Induk 150 kV Kentungan X0016 – X0011 pada saat arus puncak di titik sambaran petir sebesar 9458,1 A pada saat waktu muka $2,00\ \mu\text{s}$, sedangkan untuk nilai arus puncak yang mengalir ke arah pembangkit (X0016A-X008) pada saat arus puncak dititik sambaran sebesar 8296,4 A pada saat waktu muka $2,8,00\ \mu\text{s}$.

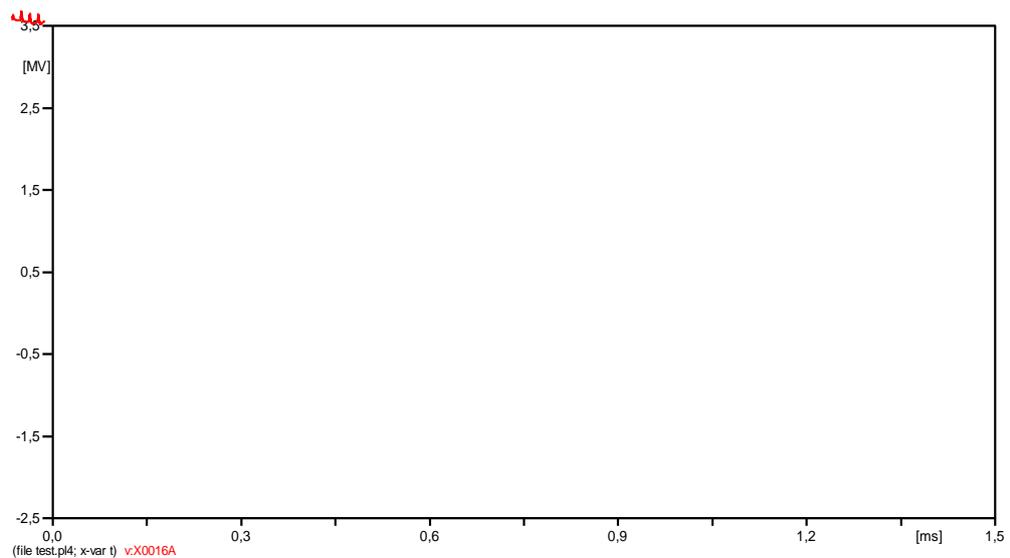
b. Tegangan Terhadap Waktu

Pada titik sambaran petir tegangan yang terjadi saat sambaran petir dititik sambaran (X0016) dengan arus sambaran sebesar 10 kA. Maka diperoleh waktu puncak sambaran berada pada 0,412 ms dengan nilai tegangan sebesar 3,45 MV. Berikut ini adalah tabel perbandingan tegangan masing-masing puncak :

Tabel 4. 1. Tabel perbandingan tegangan masing-masing puncak

No	Puncak gelombang	Tegangan (MV)	Waktu (ms)
1	1	2,55	0,028
2	2	3,45	0,41
3	3	2,47	0,81
4	4	2,14	1,2

Sedangkan gambar untuk keseluruhan grafik tegangan terhadap waktu di titik sambaran seperti di bawah ini:



Gambar 4. 3. Tegangan terhadap waktu pada titik sambaran

2. Kondisi Pada Jepitan Transformator 150/20 kV

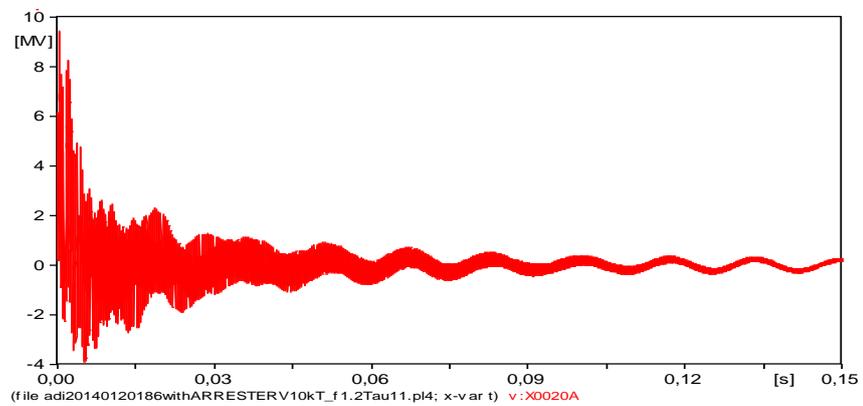
a. Tegangan Terhadap Waktu

Pada titik sambaran petir tegangan yang terjadi saat sambaran petir di jepitan transformator (X0020) dengan arus sambaran sebesar 10 kA. Maka diperoleh waktu puncak sambaran berada pada 0.41 ms dengan nilai tegangan sebesar 3,79 MV. Tegangan ini akan bergerak ke dua arah yaitu ke arah pembangkit transformator 23/150 kV (*upstream*) dan ke arah gardu induk transformator 150/20 kV (*downstream*). Sedangkan untuk arus sambaran petir 20 kA maka di peroleh tegangan puncak tertinggi berada pada waktu yang sama yaitu 0,395 ms dengan nilai tegangan sebesar 7,38 MV. Dan yang terakhir menggunakan sambaran petir 40 kA maka didapat tegangan puncak tertinggi dengan waktu puncak sambaran yang masih sama dengan nilai tegangan puncak sebesar 13,93 MV.

Tabel 4. 2. Perbandingan tegangan puncak pada masing-masing arus sambaran

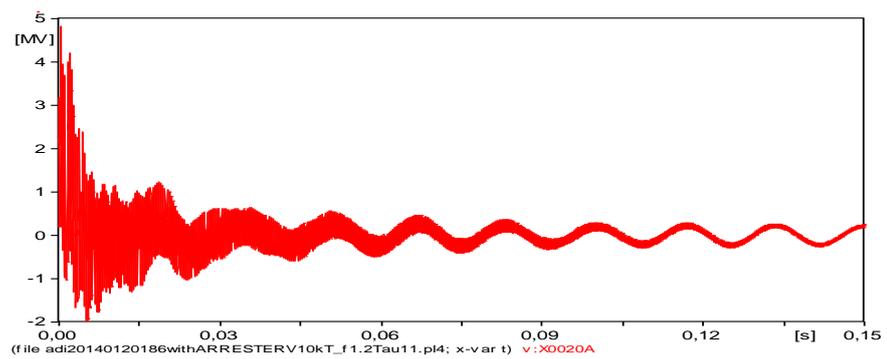
No	Arus Sambaran (kV)	Tegangan (MV)	Waktu (ms)
1	10	3,79	0.41
2	20	7,38	0.41
3	40	13,93	0.41

Dibawah ini adalah gambar grafik tegangan dengan arus sambaran sebesar 10 kA



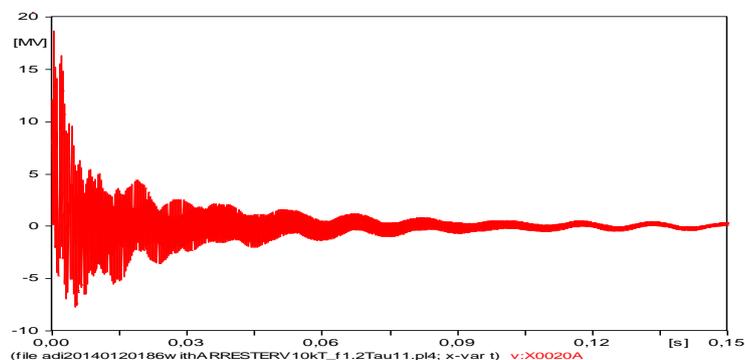
Gambar 4. 4. gelombang tegangan pada arus sambaran 10 kA

Sedangkan untuk gambar grafik dengan arus sambaran sebesar 20 kV adalah sebagai berikut:



Gambar 4. 5. Gelombang tegangan pada arus sambaran 20 kA

Sedangkan untuk gambar grafik dengan arus sambaran sebesar 20 kV adalah sebagai berikut:



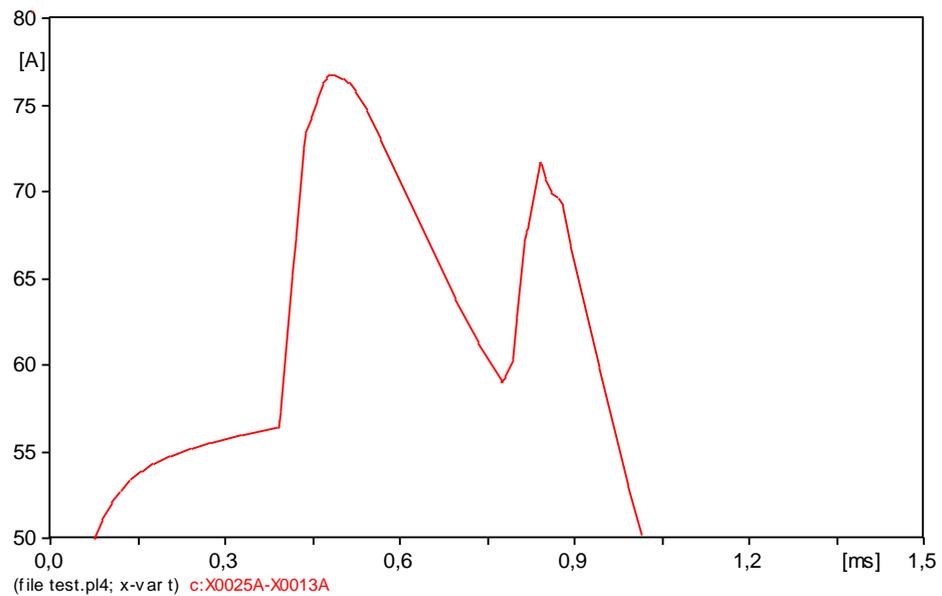
Gambar 4. 6. Gelombang tegangan pada arus sambaran 40 kA

3. Kondisi Pada Beban (*Load*)

a. Arus Terhadap Waktu

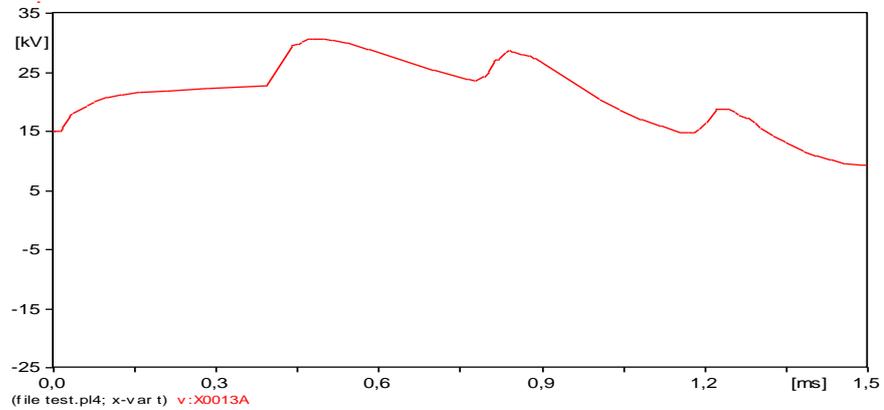
Dibawah ini merupakan gambar gelombang arus terhadap waktu akibat sambaran petir pada posisi beban (X0025 – X0013)

Gambar 4. 7. Gelombang arus terhadap waktu pada beban



Berdasarkan data pada gambar di atas dapat diketahui bahwa gelombang arus terhadap waktu pada jepitan transformator bagian primer akibat sambaran petir di titik (X0025 – X0013) tertinggi adalah 76,68 A pada saat waktu muka 0,475 ms.

b. Tegangan Terhadap Waktu



Gambar 4. 8. Gelombang tegangan terhadap waktu pada beban

Gambar diatas merupakan gambar dari gelombang tegangan terhadap waktu pada jepitan trasformatror bagian primer (X0013A), berdasarkan gambar diatas terlihat bahwa puncak gelombang tegangan yang diakibatkan oleh sambaran petir terjadi saat waktu muka 0.476 ms dengan nilai tegangan sebesar 30,68 kV. Adapun tabel dari keseluruhan puncak-puncak gelombang tegangan terhadap waktu pada jepitan transformator bagian primer adalah sebagai berikut.:

Tabel 4. 3. Tabel perbandingan puncak-puncak gelombang tegangan terhadap waktu pada beban

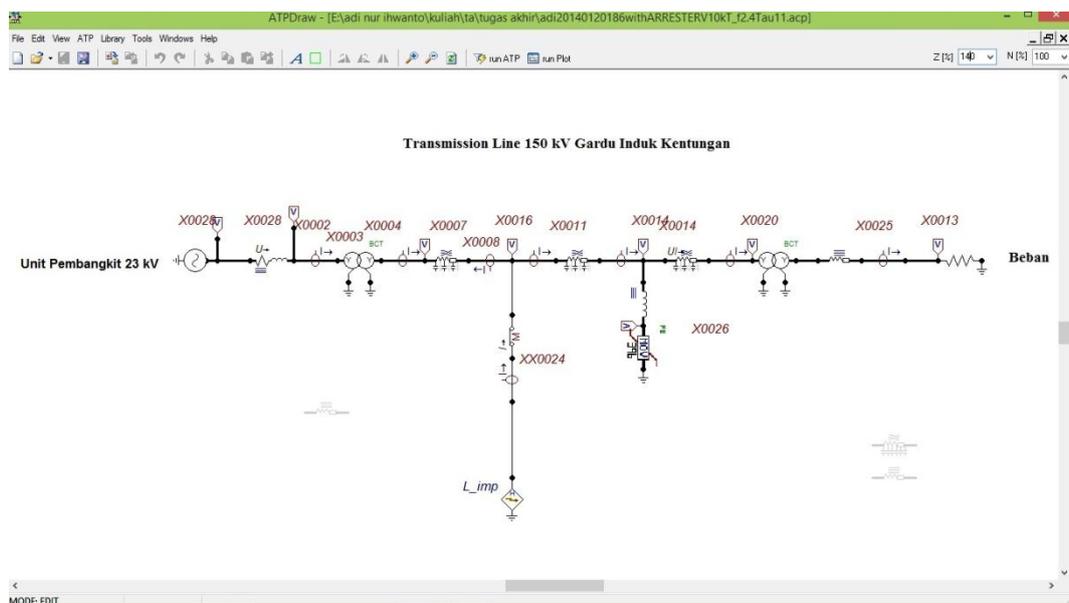
No	Puncak Gelombang	Tegangan (kV)	Waktu (ms)
1	1	21,63	0,1643
2	2	30,68	0,476
3	3	28,65	0,825
4	4	18,88	1,203

1.10.2. Simulasi ATP Menggunakan Arrester MOV

Simulasi ini akan di susun *singel line diagram* yang terdiri dari pembangkit atau sumber pembangkit yang berupa generator 23 kV dan RLC 3 fase, transformator step up 23/150 kV, saluran transmisi, arrester tope MOV transformator step down 150/20 kV, saluran

distribusi dan beban. Titik yang akan di teliti hanya pada titik jepitan arrester. Pada simulasi ini, akan ada beberapa kondisi dengan menggunakan beberapa variasi diantaranya:

1. Besaran arus sambaran yaitu 10 kA, 20 kA dan 40 kA.
2. Durasi sambaran (τ) yaitu $5E-5$ dan $11E-5$.
3. Durasi waktu gelombang ($T-f$) yaitu $1,2E-6$ dan $2,4E-6$.
4. Jarak antara arrester dengan transformator diantaranya 5 m sebagai jarak perhitungan di lapangan, 28, 5 m sebagai jarak perhitungan menurut IEC (1950) dan SPLN (1978), serta beberapa jarak diantara jarak dipalangan dan jarak SPLN dan IEC yaitu 3.15 m, 5 m, 10 m, 13 m, 17,5 m, 23 m dan 28,5 m.



Gambar 4. 9. *Transmission line* 150 kV menggunakan arrester

1. Kondisi Dititik Jepitan Transformator Bagian Primer Tegangan

Pada simulasi kali ini akan di perhatikan pengaruh jarak arrester, durasi sambaran dan durasi waktu gelombang tegangan terhadap waktu.

a. Sambaran Petir 10 kV

Pengukuran kali ini dilakukan di titik jepitan transformator (X0020) yang merupakan titik transformator bagaian sekunder. Dengan

menggunakan variasi jarak antara arrester dan transformator, durasi sambaran dan durasi waktu gelombang dengan jarak yang di ambil dari data di Gardu Induk 150 kV Kentungan yaitu 5 m dan jarak maksimum dari standari SPLN (1978) dan IEC (1950) yaitu 28.5 m. Kemudian jarak tersebut dapat divariasikan dari jarak minimum sampai jarak maksimum dengan nilai 3.15m, 5m, 10m, 13m, 17,5m, 23m, dan 28,5m serta variasi durasi lama gelombang (T-f) yaitu 1.2E-6 dan 2,4E-6, dan variasi durasi sambaran petir (Tau) yaitu 5E-5 dan 11E-5.

Sehingga di dapat nilai tegangan hasil simulasi dari data variasi atas sebagai berikut:

Tabel 4. 4. Tegangan transformator saat arus sambaran 10 kA

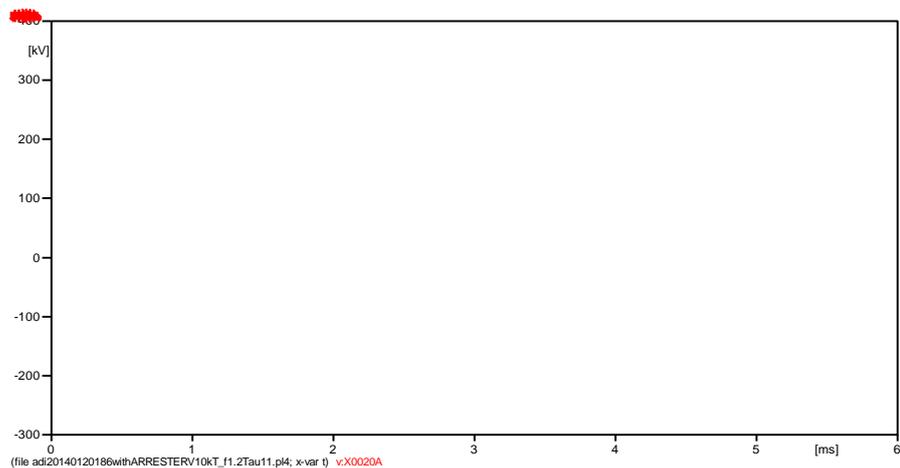
No	Jarak	Tegangan Transformator dititik (X0020) (kV)							
		Arus Petir 10 kA							
		T-f	Tau	T-f	Tau	T-f	Tau	T-f	Tau
		1,2E-6	5E-5	1,2E-6	11E-5	2,4E-6	5E-5	2,4E-6	11E-5
1	3.15	343,24		300,15		279,16		275,00	
2	5	187,86		164,68		271,53		270,9	
3	10	314,74		310,42		311,56		307,07	
4	13	307,94		306,01		304,41		302,46	
5	17.5	343,82		342,41		344,61		342,44	
6	23	375,85		372,28		369,01		370,66	
7	28.5	366,95		320,32		312,93		319,29	

Dari tabel diatas dapat di lihat bahwa tegangan transformator di titik (X0020) pada saat durasi waktu gelombang (T-f) 1,2E-6 dan durasi sambaran (Tau) 5E-5 didapat tegangan terendah yaitu 187,86 kV pada jarak 5 meter antara arrester dengan transformator dan tegangan tertinggi berada pada tegangan 375, 85 kV pada jarak 23 meter antara arrester dengan transformator.

Sedangkan pada nilai saat durasi waktu gelombang (T-f) $1,2E-6$ dan durasi sambaran (Tau) $11E-5$ nilai tegangan terendah yaitu 164,68 kV pada jarak 5 meter dan nilai tertinggi pada jarak 23 meter dengan nilai tegangan sebesar 372,28 kV. Lalu pada saat durasi waktu gelombang (T-f) $2,4 E-6$ dan durasi sambaran (Tau) $5E-5$ didapat nilai terendah yaitu 271,53 kV pada jarak 5 meter dan nilai tertinggi berada pada nilai 369,01 kV dengan jarak 23 meter.

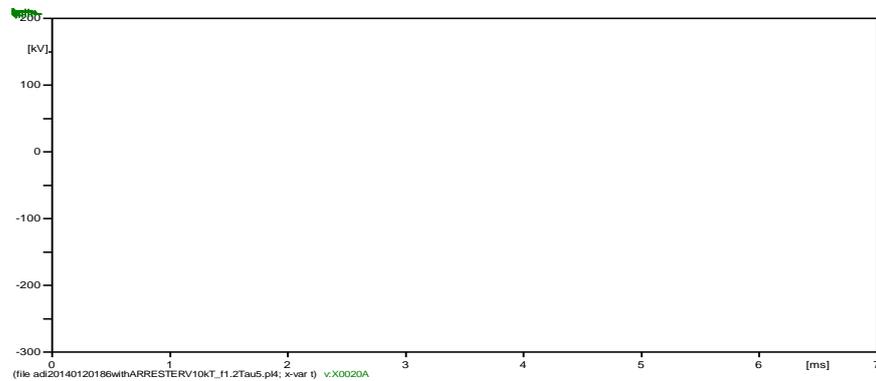
Maka dari keseluruhan simulasi dengan besar sambaran petir 10 kA di dapat nilai tegangan terendah yaitu 164,68 kV dengan durasi waktu gelombang (T-f) $1,2E-6$ dan durasi sambaran (Tau) $5E-5$ pada jarak 5 meter, dan nilai tegangan tertinggi yaitu 372,28 kV pada durasi waktu sambaran durasi waktu gelombang yang sama.

Di bawah ini adalah gambar gelombang dengan nilai tegangan terendah pada jarak 5 meter dan nilai tegangan tertinggi pada jarak 23 meter dengan saat nilai durasi waktu gelombang (T-f) $1,2E-6$ dan durasi sambaran (Tau) $5E-5$.



Gambar 4. 10. Gelombang dengan nilai tegangan tertinggi pada arus sambaran 10 kA

Sedangkan untuk gambar gelombang dengan nilai tegangan terendah seperti di bawah ini:



Gambar 4. 11. Gelombang dengan nilai tegangan terendah pada arus sambaran 10 kA

b. Sambaran Petir 20 kV

Pada pengukuran ini masih sama di titik jepitan transformator (X0020) yang merupakan titik transformator bagaian sekunder. Dengan menggunakan variasi jarak antara arrester dan transformator, durasi sambaran dan durasi waktu gelombang dengan jarak yang di ambil dari data di Gardu Induk 150 kV Kentungan yaitu 5 m dan jarak maksimum dari standari SPLN (1978) dan IEC (1950) yaitu 28.5 m. Kemudian jarak tersebut dapat divariasikan dari jarak minimum sampai jarak maksimum dengan nilai 3.15m, 5m, 10m, 13m, 17,5m, 23m, dan 28,5m serta variasi durasi lama gelombang (T-f) yaitu 1.2E-6 dan 2,4E-6, dan variasi durasi sambaran petir (Tau) yaitu 5E-5 dan 11E-5.

Sehingga di dapat nilai tegangan hasil simulasi dari data variasi atas sebgai berikut:

Tabel 4. 5. Tegangan transformator saat arus sambaran 20 kA

No	Jarak	Tegangan Transformator dititik (X0020) (kV)							
		Arus Petir 20 kA							
		T-f	Tau	T-f	Tau	T-f	Tau	T-f	Tau
		1,2E-6	5E-5	1,2E-6	11E-5	2,4E-6	5E-5	2,4E-6	11E-5
1	3.15	468,13		472,64		302,78		301,51	
2	5	244,17		245,45		336,57		335,3	
3	10	353,38		339,43		349,38		337,12	
4	13	342,41		339,08		339,03		335,43	
5	17.5	410,41		407,39		411,76		406,05	
6	23	456,65		445,19		458,25		443,79	
7	28.5	379,5		358		370,98		357,39	

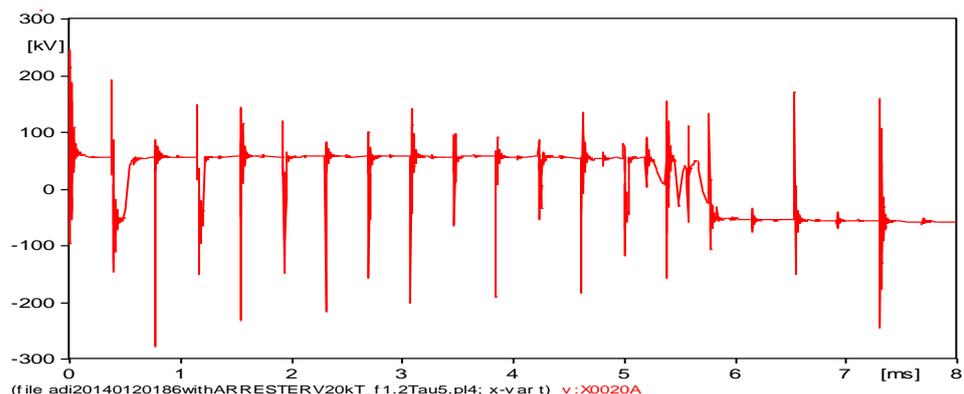
Dari data diatas didapatkan bahwa nilai tegangan terendah pada saat durasi waktu gelombang (T-f) 1,2E-6 dan durasi sambaran (Tau) 5E-5 yaitu 244,27 kV pada jarak 5 meter antara arrester dan transformator dan nilai tegangan tertinggi yaitu pada jarak 3.15 m yaitu 468,13 kV. Lalu pada saat durasi waktu gelombang (T-f) 1,2E-6 dan durasi sambaran (Tau) 11E-5 maka tegangan terendah berada pada jarak 5 meter antara arrester dan transformator dengan nilai tegangan 245,45 kV, sedangkan nilai tertinggi berada pada jarak 3.15 meter.

Namun berbeda pada saat durasi waktu gelombang (T-f) 2.4E-6 dan durasi sambaran (Tau) 5E-5 nilai tegangan terendah berada pada jarak 3,15 meter dengan nilai tegangan sebesar 302,78 kV dan nilai tertinggi berada pada jarak 23 meter yaitu dengan nilai tegangan sebesar 458,25 kV. Dan pada saat durasi waktu gelombang (T-f) 2.4E-6 dan durasi sambaran (Tau) 11E-5 nilai tegangan terendah berada pada jarak 3,15 meter dengan nilai tegangan 301,51 kV dan nilai tegangan tertinggi berada pada jarak 23 meter dengan nilai tegangan 443,97 kV.

Maka dari hasil data simulasi diatas di dapat nilai tegangan terkecil berada pada jarak 5 meter dengan nilai tegangan 244,17 kV

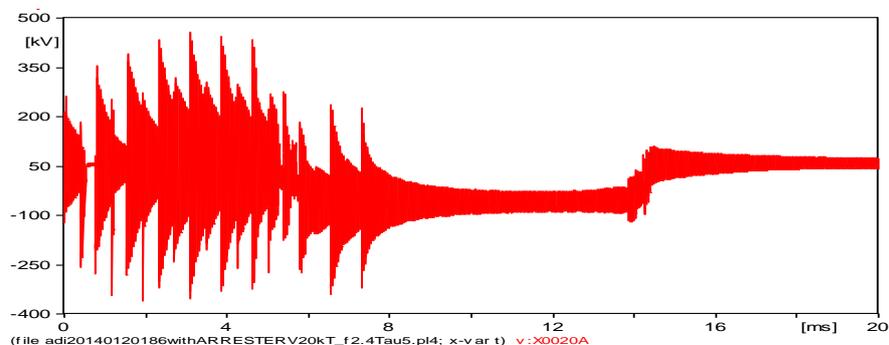
dengan nilai durasi waktu gelombang $1,2E-6$, sedangkan pada saat durasi waktu gelombang $2,4E-6$ yaitu berada pada jarak 3.15 meter dengan nilai 301.51kV sedangkan nilai tegangan tertinggi berada pada jarak 23 meter dengan nilai tegangan dengan nilai saat durasi waktu gelombang (T-f) $2.4E-6$ dan durasi sambaran (Tau) $5E-5$.

Berikut ini adalah gambar grafik dari nilai teangan terendah dan nilai tegangan tertinggi pada arus sambaran petir 20 kV, dengan jarak 5 meter pada saat waktu durasi gelombang (T-f) $1.2E-6$ dan waktu durasi sambaran (Tua) $5E-5$ sebagai tegangan terendah, dan jarak 23 meter pada saat durasi waktu gelombang (T-f) $2.4E-6$ dan durasi sambaran (Tau) $5E-5$:



Gambar 4. 12. Gelombang dengan nilai tegangan terendah pada arus sambaran
20 kA

Sedangkan untuk gambar gelombang dengan nilai tegangan terendah seperti di bawah ini:



Gambar 4. 13. Gelombang dengan nilai tegangan tertinggi pada arus sambaran
20 kA

c. Sambaran Petir 40 kV

Pada pengukuran kali ini masih sama dengan dua pengukuran sebelumnya menggunakan data yang sama hanya berbeda pada nilai arus sambaran petir nya yaitu 40 kA .

Sehingga didapat nilai tegangan hasil simulasi dari data variasi atas sebgai berikut:

Tabel 4. 6. Tegangan transformator saat arus sambaran 40 kA

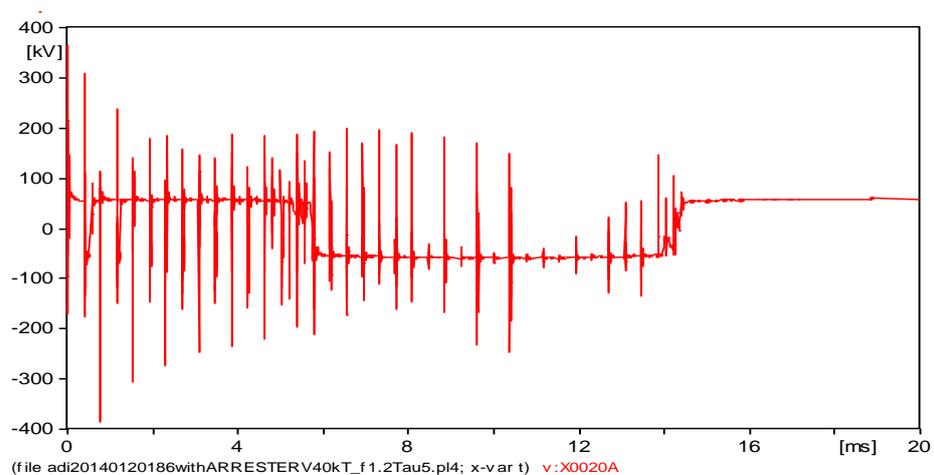
No	Jarak	Tegangan Transformator dititik (X0020) (kV)							
		Arus Petir 40 kA							
		T-f	Tau	T-f	Tau	T-f	Tau	T-f	Tau
		1,2E-6	5E-5	1,2E-6	11E-5	2,4E-6	5E-5	2,4E-6	11E-5
1	3.15	710,00		718,78		535,77		532,58	
2	5	365,07		367,32		456,04		453,14	
3	10	406,41		405,75		405,16		399,47	
4	13	403,25		410,06		397,98		393,26	
5	17.5	529,25		515,56		525,01		510,19	
6	23	527,56		528,90		528,01		528,44	
7	28.5	414,61		415,71		414,22		414,26	

Dari data diatas di dapatkan bahwa pada saat durasi waktu gelombang (T-f) 1.2E6 dan durasi sambaran (Tau) 5E-5 didapat nilai tegangan terendah yaitu 365.07 kV pada jarak 5 meter dan nilai tegangan tertinggi adalah 710.00 kV pada jarak 3.15 meter. Saat nilai durasi sambaran (Tau) diubah menjadu 11E-5 dan durasi waktu gelombang (T-f) tetap 1.2E6 maka didapat nilai tegangan terendah 367,32 kV dengan jarak 5 meter, dan nilai tegangan tertinggi terdapat pada jarak 3.15 meter dengan nilai tegangan 718,68 kV.

Sedangkan pada nilai durasi waktu gelombang 2.4E-6 dan nilai durasi sambaran 5E-5 nilai tegangan terendah menjadi berada pada

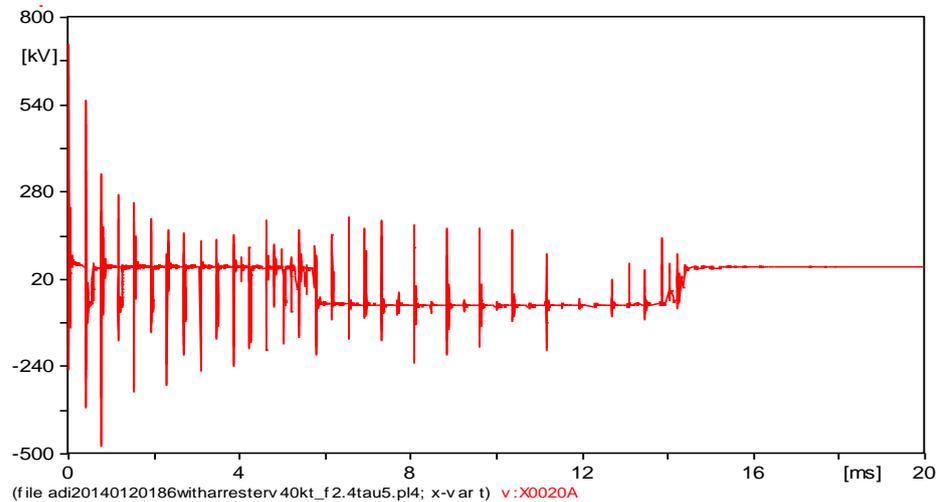
jarak 13 meter dengan nilai tegangan 397,98 kV, dan nilai tegangan tertinggi masih pada jarak 3.15 meter yaitu 535,77 kV, dan saat nilai durasi waktu dirubah menjadi $11E-5$ dan nilai durasi waktu gelombang sama maka didapat nilai tegangan terendah berada pada jarak 13 meter dengan nilai tegangan 393,26 kV, dan nilai tegangan tertinggi berada pada jarak 3.15 meter dengan nilai tegangan 532,58 kV.

Maka dari data diatas jarak arrester dengan transformator dengan *impluse* sambaran petir sebesar 40 kA didapatkan tegangan terendah dengan tegangan 365,07 kV pada jarak 5 meter dengan nilai durasi sambaran petir sebesar $5E-5$ dan durasi waktu gelombang $1.2E-6$ dan nilai tegangan tertinggi berada pada jarak 3,15 meter dengan nilai durasi sambaran petir sebesar $11E-5$ dan durasi waktu gelombang $1.2E-6$ dengan nilai tegangan sebesar 718,68 kV. Berikut ini grafik dari kedua kondisi tersebut:



Gambar 4. 14. Gelombang dengan nilai tegangan terendah pada arus sambaran 40 kA

Sedangkan untuk gambar grafik nilai tegangan tertinggi pada arus sambaran 40 kA adalah sebagai berikut:



Gambar 4. 15. Gelombang dengan nilai tegangan tertinggi pada arus sambaran 40 kA

2. Perbandingan Tegangan Puncak Terendah Dengan Tegangan Puncak Pada Jarak 5 m (Data Perhitungan) dan 28,5 m (SPLN dan IEC)

Dari hasil simulasi yang dilakukan pada masing-masing kondisi arus petir, maka didapat data jarak yang menghasilkan arus puncak terendah seperti di bawah ini.

Tabel 4. 7. Nilai durasi waktu gelombang (T-f) 1.2E-6 dan nilai durasi sambaran (Tau) 5E-5

Arus Petir (kA)	(T-f) = 1,2E-6, (Tau) = 5E-5			Keterangan
	Perhitungan (5 m)	SPLN dan IEC (28,5 m)	Terendah	
10	187,86 kV	366,95 kV	187,86 kV	5 Meter
20	244,17 kV	379,50 kV	244,17 kV	5 Meter
40	244,17 kV	414,61 kV	365,70 kV	5 Meter

Sedangkan untuk nilai durasi waktu gelombang (T-f) 1.2E-6 dan nilai durasi sambaran (Tau) 11E-5 adalah sebagai berikut:

Tabel 4. 8. Nilai durasi waktu gelombang (T-f) 1.2E-6 dan nilai durasi sambaran (Tau) 11E-5

Arus Petir (kA)	(T-f) = 1,2E-6, (Tau) = 11E-5			Keterangan
	Perhitungan (5 m)	SPLN dan IEC (28,5 m)	Terendah	
10	164,68 kV	320,32 kV	164,68 kV	5 Meter
20	245,45 kV	358,00 kV	245,45 kV	5 Meter
40	367,32 kV	415,71 kV	367,32 kV	5 Meter

Sedangkan untuk nilai durasi waktu gelombang (T-f) 2.4E-6 dan nilai durasi sambaran (Tau) 5E-5 adalah sebagai berikut:

Tabel 4. 9. Nilai durasi waktu gelombang (T-f) 2.4E-6 dan nilai durasi sambaran (Tau) 5E-5

Arus Petir (kA)	(T-f) = 2.4E-6, (Tau) = 5E-5			Keterangan
	Perhitungan (5 m)	SPLN dan IEC (28,5 m)	Terendah	
10	271,53 kV	312,93 kV	271,53 kV	5 Meter
20	336,75 kV	370,98 kV	302,78 kV	3.15 Meter
40	456,04 kV	414,22 kV	397,98 kV	13 Meter

Sedangkan untuk nilai durasi waktu gelombang (T-f) 2.4E-6 dan nilai durasi sambaran (Tau) 11E-5 adalah sebagai berikut:

Tabel 4. 10. Nilai durasi waktu gelombang (T-f) $2.4E-6$ dan nilai durasi sambaran (τ) $11E-5$

Arus Petir (kA)	(T-f) = $2.4 E-6$, (τ) = $11E-5$			Keterangan
	Perhitungan (5 m)	SPLN dan IEC (28,5 m)	Terendah	
10	270,90 kV	319,29 kV	270,90 kV	5 Meter
20	335,30 kV	357,39 kV	310,51 kV	3.15 Meter
40	453,14 kV	414,26 kV	393,26 kV	13 Meter

Dari empat tabel di atas dapat kita lihat bahwa pada saat nilai durasi waktu gelombang (T-f) $1.2E-6$ dan nilai waktu durasi sambaran (τ) $5E-5$ tegangan terendah pada ketiga arus sambaran berada pada jarak 5 meter. Sedangkan di nilai durasi waktu gelombang (T-f) $1.2E-6$ dan nilai waktu durasi sambaran (τ) $11E-5$, tegangan terendah pada saat sambaran arus petir 10 kA berada pada jarak 5 meter, begitu pula pada saat sambaran 20 dan 40 kV. tegangan terendah berada pada jarak 5 meter. Lalu pada durasi waktu gelombang (T-f) $2.4E-6$ dan nilai waktu durasi sambaran (τ) $5E-5$ di dapatkan tegangan terendah pada saat arus sambaran petir 10 kV berada pada jarak 5 meter, saat arus sambaran 20 kV berada pada jarak 3,15 meter dan pada arus sambaran petir 40 kV maka berada pada jarak 13 meter. Dan pada durasi waktu gelombang (T-f) $2.4E-6$ dan nilai waktu durasi sambaran (τ) $11E-5$ di dapatkan tegangan terendah pada saat arus sambaran petir 10 kV berada pada jarak 5 meter, saat arus sambaran 20 kV berada pada jarak 3,15 meter dan pada arus sambaran petir 40 kV maka berada pada jarak 13 meter.

Dari hasil tegangan terendah dari masing-masing induktor diatas maka tegangan terendah sering terjadi pada jarak 5 meter antara arrester dan transformator sesuai dengan jarak perhitungan dengan data lapangan dan jarak 28,5 yang merupakan jarak maksimal yang disarankan oleh SPLN (1978:4) dan IEC (1958).

3. Perbandingan Tegangan Saat Menggunakan Arrester Pada Jarak Ideal Dengan Tanpa Menggunakan Arrester

Dibawah ini merupakan tabel perbandingan tegangan saat menggunakan arrester sebagai perlindungan transformator dan tanpa menggunakan arrester sebagai perlindungan:

Tabel 4. 11. Perbandingan tegangan puncak saat menggunakan aresrer dan tanpa menggunakan arrester

No	Arus Sambaran (kV)	Tegangan Dititik Jepitan Transformator	
		Menggunakan Arrester (5 meter)	Tanpa Arrester
1	10	164,68 kV	3,79 MV
2	20	244,17 kV	7,38 MV
3	40	268,70 kV	13,93 MV

Dari tabel diatas dapat dilihat bahwa tegangan yang nelalui jepitan transformtor bagian primer terlihat perbedaan yang sangat mencolok saat dipasang arrester dan tanpa arrester. Pada saat arus sambaran 20 kA maka tegangan yang lewat pada jepitan transformator tanpa adanya arrester sebesar 7,38 MV sedangkan saat dipasangi arrester dengan jarak 5 metet maka tegangan yang melalu jepitan transformator hanya sebesar 224,17 kV. terlihat bahwa perbedaan yang sangat mencolok antara di pasanginya arrester dengan tanpa terpasangnya arrester.

Maka pentingnya pemasangan arrester pada Gardu Induk agar supaya peralatan peralatan yang berada pada Gardu Induk dapat berumur panjang dan dapat tetap berfungsi dengan normal saat terjadinya sambaran petir.