

INDUKSI DAN KONDUKSI GELOMBANG ELEKTROMAGNETIK AKIBAT SAMBARAN PETIR PADA JARINGAN TEGANGAN RENDAH

Reynaldo Zoro

Sekolah Teknik Elektro dan Informatika, Institut Teknologi Bandung, Bandung 40132, Indonesia

E-mail: zoro@hv.ee.itb.ac.id

Abstrak

Sambaran petir baik secara langsung maupun tidak langsung dapat menimbulkan kerusakan pada peralatan-peralatan elektronik di dalam bangunan. Di Stasiun Penelitian Petir Institut Teknologi Bandung (SPP-ITB) Gunung Tangkuban Perahu sering terjadi kerusakan peralatan elektronik dan kerusakan arrester yang seharusnya melindungi peralatan elektronik tersebut. Kerusakan arrester tersebut kemungkinan besar disebabkan oleh sambaran petir tidak langsung di sekitar jaringan tegangan rendah SPP-ITB. Sambaran petir tidak langsung menginduksikan tegangan lebih pada jaringan tegangan rendah tersebut dan kemudian menghantarkan gelombang berjalan (konduksi) pada kedua ujung jaringan tegangan rendah yang salah satunya adalah SPP-ITB. Kerusakan karena sambaran langsung hampir tidak mungkin karena sekitar 90% SJTR terletak di bawah pohon-pohon yang tinggi. Pada penelitian ini dilakukan evaluasi induksi dan konduksi petir pada Jaringan Tegangan Rendah SPP-ITB Gn. Tangkuban Perahu. Penelitian ini menggunakan data-data lapangan seperti data APM, parameter saluran JTR, data arrester dan kerusakannya, dan karakteristik petir lokal dari JADPEN (Jaringan Data Petir Nasional). Data-data tersebut terutama data historis JADPEN digunakan sebagai studi kasus untuk perhitungan tegangan elevasi, profil tegangan induksi dan konduksi petir dengan menggunakan model perhitungan Rusck, perhitungan arus dan energi impuls petir yang terinduksi pada SJTR. Hasil perhitungan tersebut kemudian dibandingkan dengan karakteristik arrester MOV dan SAD yang terpasang di SPP-ITB untuk mengetahui penyebab kerusakan arrester.

Abstract

Induction and Conduction Electromagnetic Waves Caused by Lightning Strike on the Low Voltage Network. Direct and indirect lightning strikes can disturb and induce low voltage overheadlines and it can produced overvoltage due to traveling waves along the lines. This overvoltage can damage the equipments connected to it. It was recorded that there were already a lot of damages of electronic equipments and arresters located inside the building of Lightning Measurement Station at Mnt. Tangkuban Perahu. Most of the overvoltage which was developed on the low voltage lines were coming from indirect lightning strike nearby due to the fact that most of the lines were covered by trees. Research was carried out to study and evaluate the induction and conduction of the lightning strikes to the LV lines that can lead to the cause of equipment and arrester damages inside the building. Local lightning data for the analysis were derived from measurement system installed at the stations and historical lightning data from lightning detection network called Jadpen (National Lightning Detection Network). The data was used for calculating and evaluating the voltage elevation, induction voltage profiles and conduction in the form of traveling waves using Rusck Model. Two damaged arresters were evaluated and compared and it give the better understanding on how the protection system work.

Keywords: arrester, arrester damages, lighting data, lightning induction, rusck model, voltage elevations

1. Pendahuluan

Surja petir dapat menyebabkan kerusakan pada jaringan tegangan rendah dan peralatan elektrik tegangan rendah dengan beberapa mekanisme. Mekanisme pertama melalui sambaran langsung petir pada jaringan tegangan rendah. Hal ini jarang terjadi karena biasanya terlindung oleh pohon atau bangunan di sekitarnya. Mekanisme

kedua adalah sambaran petir yang tidak langsung mengenai jaringan tegangan rendah tapi petir menyambar pohon ataupun tanah di sekitar jaringan tegangan rendah. Sambaran tidak langsung ini menyebabkan kopling elektromagnetik antara jaringan dan sambaran petir sehingga mengakibatkan tegangan induksi pada jaringan [1, 2].



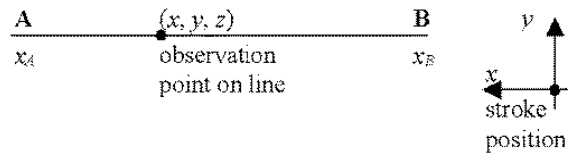
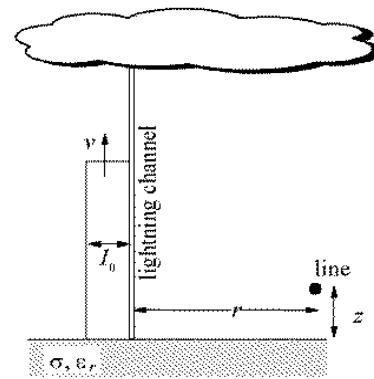
Gambar 1. Lokasi Saluran JTR SPP-ITB

Pada jaringan tegangan rendah, penyebab terbesar tegangan lebih adalah sambaran tidak langsung petir. Hal ini disebabkan pada jaringan tegangan rendah memiliki tingkat dasar isolasi (*basic insulation level/BIL*) yang relatif rendah. Mekanisme sambaran tidak langsung ini juga dapat menimbulkan kerusakan pada *arrester*, peralatan elektronik tegangan rendah, dan gangguan operasi sistem tenaga listrik. Mekanisme sambaran langsung petir pada jaringan jarang terjadi, tapi dapat menyebabkan kerusakan yang lebih besar pada jaringan dan instalasi peralatan listrik [3].

Di stasiun Penelitian Petir yang terletak di kawasan Gunung Tangkuban Perahu yaitu 6°45'50" Lintang Selatan dan 107°36'41" Bujur Timur pada ketinggian 2030 meter diatas permukaan laut, pada saat ini sedang dilakukan penelitian tentang pengaruh sambaran petir tidak langsung pada jaringan tegangan rendah antara gardu Hankam dan Stasiun Penelitian Petir [4]. Jaringan tegangan rendah 3 fasa 380/220 V *twisted* kabel ini terletak di bawah pohon-pohon tinggi di gunung tangkuban perahu sehingga sangat kecil kemungkinan terkena sambaran langsung petir. Namun pada jaringan tegangan rendah ini terjadi tegangan induksi petir akibat sambaran petir tidak langsung. Tegangan induksi yang terjadi ini menyebabkan kerusakan pada *arrester* MOV dan SAD yang dipasang di SPP, apapun tipe dan rating *arrester* yang dipasang.

2. Metode Penelitian

Induksi Petir Pada Saluran Jaringan Tegangan Rendah. Sambaran tidak langsung, terjadi karena induksi elektromagnetik akibat sambaran petir di dekat saluran udara atau induksi elektrostatik akibat awan bermuatan di atas saluran udara. Sambaran tidak langsung selanjutnya adalah sambaran petir ke tanah di dekat saluran udara. Sambaran induksi merupakan fungsi jarak dimana petir tersebut menyambar di dekat saluran. Tegangan lebih induksi tidak begitu berpengaruh pada saluran transmisi tetapi menyebabkan gangguan pada saluran distribusi, karena menurut penelitian



Gambar 2. Induksi Petir pada Saluran Udara [5]

tegangan yang diinduksikan sedikit lebih kecil dari tegangan transmisi sehingga efeknya akan terasa pada level saluran tegangan yang lebih rendah.

Menurut Rusck [5], tegangan induksi yang terjadi pada saluran udara pendek akibat sambaran petir adalah:

$$V_{ind} = U_1 + U_2 \tag{1}$$

dengan:

$$U_1(x, y, z, t) = Z_o I_o(t) z \frac{v}{v_o} \frac{v_o t - x}{y^2 + \left(\frac{v}{v_o}\right)^2 (v_o t - x)^2} K_x \tag{2}$$

$$U_2(x, y, z, t) = U_1(-x) \tag{3}$$

$$K_x = \left[1 + \frac{x^2 + \left(\frac{v}{v_o}\right)^2 (v_o t - x)^2}{\sqrt{\left(\frac{v}{v_o}\right)^2 (v_o t)^2 + \left(1 - \left(\frac{v}{v_o}\right)^2\right) (x^2 + y^2)}} \right] \tag{4}$$

dengan:

$$Z_o = \frac{1}{4\pi} \sqrt{\frac{\mu_o \mu_r}{\epsilon_o \epsilon_r}} = \text{Impedansi Surja (ohm)}$$

dan

- $I_o(t)$ = Amplitudo step dari arus sambaran balik (kA)
- z = Ketinggian saluran udara dari permukaan tanah (m)
- x = Jarak sambaran petir sepanjang saluran udara (m), $x = 0$ berarti sambaran petir tepat pada ujung saluran udara
- y = Jarak sambaran petir yang tegak lurus terhadap saluran udara (m), $y = 0$ berarti sambaran petir tepat pada saluran udara
- v = Kecepatan sambaran balik petir (m/s),
- v_o = kecepatan cahaya 3×10^8 m/s

Pada titik $x = 0$, terjadi tegangan maksimum yaitu:

$$V_{Indmaks} = \frac{Z_o \cdot I_o \cdot h}{y} \left[1 + \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{v}{v_o} \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{1}{2} \left(\frac{v}{v_o} \right)^2}} \right] \quad (5)$$

Perhitungan induksi petir dengan memasukkan bentuk arus petir dapat didekati dengan persamaan berikut:

$$I_o(t) = \alpha_1 t u(t) - \alpha_2 (t - t_f) u(t - t_f) = I_1(t) + I_2(t) \quad (6)$$

$$\alpha_1 = \frac{I}{t_f} \quad (7)$$

$$\alpha_2 = I \frac{(2 * t_h - t_f)}{2 * t_f (t_h - t_f)} \quad (8)$$

Dengan

t_f = Waktu arus petir untuk mencapai puncak (μ s)

t_h = Waktu arus petir untuk mencapai nilai tengah atau half value (μ s)

I = Arus puncak petir (kA)

Tegangan lebih pada sistem tegangan rendah dan peralatan elektronik dapat disebabkan oleh induksi elektromagnetik, elevasi tegangan, kopling kapasitif, dan radiasi.

Arus petir yang mengalir pada hantaran arus petir menimbulkan tegangan jatuh ditahanan pentanahan sebesar

$$V_E = I \cdot R_{st} \quad (V) \quad (9)$$

Arus petir yang terinjeksi keelektroda pentanahan akan menyebar secara radial didalam tanah, sehingga akan menyebabkan terjadinya elevasi tegangan pada elektroda yang berada disekitarnya.

Elevasi tegangan pada sebuah elektroda yang berada didekat sebuah elektroda lainnya yang teraliri arus petir dinyatakan dengan hubungan

$$V = \frac{\rho_i}{4\pi LM} \left[G(z+L, y, x) - G(z, y, x) + G(z-2D, y, x) - G(z-2D-L, y, x) \right] \quad (10)$$

dengan:

$$G(a, b, c) = G_1(a + M, b, c) - G_1(a, b, c) \quad (11)$$

dan

$$G_1(a, b, c) = \left[a \ln \left(a + \sqrt{a^2 + b^2 + c^2} \right) - \sqrt{a^2 + b^2 + c^2} \right] \quad (12)$$

dengan:

ρ = tahanan jenis tanah ($\Omega \cdot m$)

i = arus puncak petir (kA)

L = panjang elektroda pentanahan 1 (m)

M = panjang elektroda pentanahan 2 (m)

D = kedalaman ujung atas elektroda dari permukaan tanah (m)

Arrester adalah peralatan yang pada umumnya terdiri dari *voltage-controlled resistors* (varistor, diode *surpressor*) dan atau *spark gaps*. *Arrester* digunakan untuk memproteksi peralatan dan sistem elektrik dari tegangan lebih yang besar dan atau untuk penyamaan tegangan (*equipotentialization*).

Arrester dapat diklasifikasikan menurut parameter dan spesifikasi dengan spesifikasi dan parameter *arrester* yang berbeda-beda untuk tiap *arrester*:

Arrester Rated Voltage (U_r) atau Max. Continuous Operating Voltage (U_r)

Tegangan operasi kontinyu maksimal yang diperbolehkan atau tegangan arus maksimal yang diberikan pada *arrester* pada saat beroperasi kontinyu. Tegangan ini adalah tegangan maksimal *arrester* pada keadaan non-konduksi dan merupakan tegangan saat *arrester* kembali dari keadaan konduksi.

Nominal Conduction Voltage (U_n) atau stand off voltage

Tegangan konduksi nominal adalah tegangan dengan nilai sesaat tertinggi yang terjadi pada terminal *arrester* sebelum konduksi atau *spark over* terjadi. *Arrester* dapat konduksi jika: (1) Nilai puncak komponen resistif dari arus yang melewati *arrester* mencapai 1 mA; (2) Tegangan impuls menyebabkan arus puncak yang melewati *arrester* melebihi 1 mA

Pengukuran tegangan konduksi adalah metode paling mudah untuk mengecek *arrester* bekerja dengan baik. Tegangan konduksi nominal selalu lebih besar tegangan operasi kontinyu maksimal

Energy Handling

Kemampuan penyerapan energi adalah kemampuan *arrester* untu melakukan penyerapan energi maksimum dari impuls petir. Jika energi impuls petir yang melewati *arrester* melewati kemampuan penyerapan energi *arrester* maka *arrester* akan mengalami kerusakan.

Standard Lightning Impuls Sparkover Voltage (U_{as100})

Standar tegangan konduksi impuls petir adalah tegangan test dengan menggunakan gelombang impuls 1,2/50 μ s yang diset pada nilai puncak tegangan dimana *arrester* harus dapat merespon setiap kali tes sebanyak 10 kali tegangan tes.

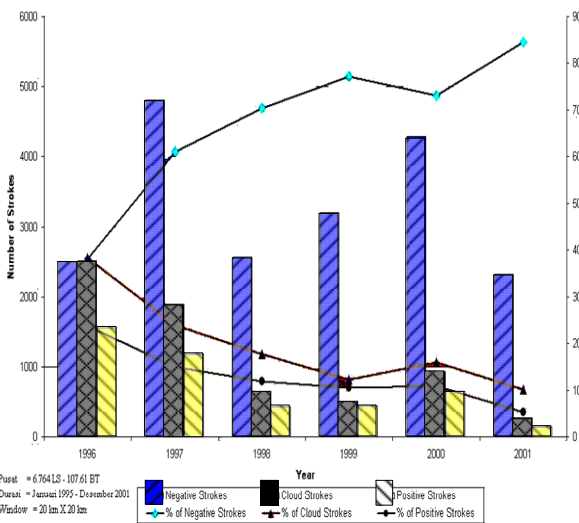
Lightning Test Current (I_B) or Impuls Current (I_{imp})

Arus tes petir adalah tegangan test dengan menggunakan gelombang impuls 10/350 μ s dan parameter yang menyimulasikan arus petir natural (arus puncak, muatan, dan energi spesifik). *Arrester* yang didesain untuk proteksi terhadap sambaran petir langsung harus dapat menahan tes arus petir minimal dua kali tanpa kerusakan.

Protection Level (U_{sp})

Tingkat proteksi menyatakan nilai puncak dari *Standard Lightning Impuls Sparkover Voltage (U_{ast100})I* dan menunjukkan karakteristik proteksi dari *arrester* dan menyarankan *arrester* sebaiknya digunakan pada tingkat proteksi tertentu.

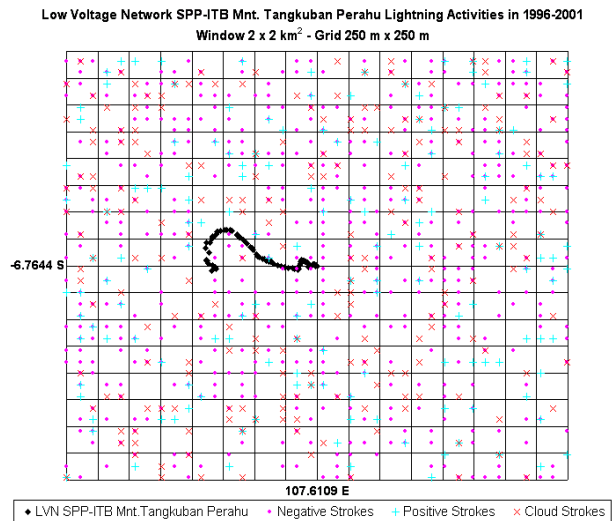
Parameter Sambaran Petir. Stasiun Penelitian dan saluran jaringan tegangan rendah sebagai obyek penelitian ini terletak di latitude 6° 45' 50" LS dan longitude 107° 36' 41" BT, secara geografis berada di dataran tinggi Gunung Tangkuban Perahu serta mengalami dua musim pertahun. Pengaruh angin monsun Asia yang banyak membawa awan petir dan monsun Australia yang kering juga dirasakan oleh bangunan ini dan daerah sekitarnya. Pada tulisan ini dipergunakan data karakteristik petir historik yang tersimpan dalam basis data JADPEN [6]. Daerah pantau penelitian yang digunakan adalah lingkaran dengan pusat di bangunan SPP di -6,7644°LS 107,6109°BT dengan *window* 20 x 20 km² sehingga dapat mencakup jaringan tegangan rendah dan lingkungan sekitar lokasi penelitian. Data historik yang digunakan selama 6 tahun dari 1 Januari 1996 sampai 31 Desember 2001.



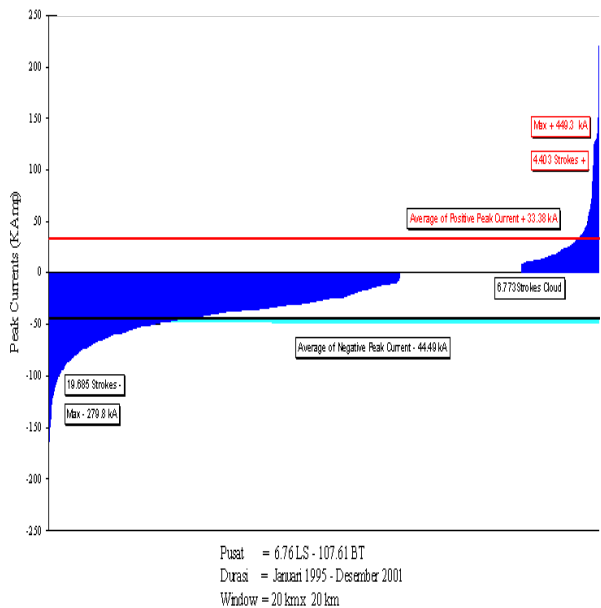
Gambar 3. Data Petir di Sekitar SPP-ITB 1996-2001

Tabel 1. Intensitas Sambaran Petir di Lokasi Penelitian

Kerapatan Sambaran [sambaran/km ² /thn]	Rata-Rata
- Sambaran petir ke tanah (GFD = N _g)	10,04
- Sambaran petir ke tanah dan awan	12,86
- Sambaran petir ke tanah positif	1,83
- Sambaran petir ke tanah negatif	8,21
- Sambaran petir awan	284,00



Gambar 4. Peta Kerapatan Sambaran Petir



Gambar 5. Distribusi Statistik Arus Puncak Petir

Gambar 4 memperlihatkan peta kerapatan sambaran petir untuk *Window* 2 km x 2 km. Dari peta kerapatan sambaran, terlihat bahwa daerah sekitar SPP sering terjadi sambaran petir (Tabel 1).

Peta kerapatan sambaran juga memperlihatkan bahwa sambaran petir yang terjadi kebanyakan adalah sambaran petir tidak langsung pada jarak sekitar 2 km dari SJTR SPP-ITB dan hal ini dapat menyebabkan induksi petir pada saluran jaringan tegangan rendah menuju ke lokasi penelitian.

Tabel 2. Parameter Petir di Daerah SPP

Parameter	Unit	Rata-rata	Persentase Lebih Besar dari			Parameter Maksimum
			95%	50%	5%	
Arus Puncak, <i>I</i>						
Sambaran negatif total	kA	44,49	13,34	40,51	95,00	279,80
Sambaran positif total	kA	33,38	9,58	20,77	132,67	449,30
Waktu mencapai Arus Puncak, <i>t_p</i>						
Sambaran negatif total	μs	2,59	0,52	2,53	6,45	9,60
Sambaran positif total	μs	1,86	0,25	1,29	6,36	9,40
Kecuraman Arus, <i>di/dt</i>						
Sambaran negatif total	kA/μs	23,01	6,80	15,77	51,65	613,00
Sambaran positif total	kA/μs	27,56	4,38	14,83	85,12	253,00

Tabel 3. Data Arus Puncak dari APM di SPP Periode Desember 2004 – Juni 2005

Waktu Pengambilan Data	Tower			Gardu Hankam			Arrester T 1		
	I	II	IV	I	II	IV	I	II	IV
17 Des 2004 - 07 Jan 2005	25,55	20,71	16,26	5,45	4,37	4,09	0	0	0
08 Jan 2005 - 28 Jan 2005	30,14	23,66	13,36	3,65	3,52	3,31	1,43	1,45	1,47
29 Jan 2005 - 11 Feb 2005	19,10	18,05	16,38	2,72	3,78	3,55	1,41	1,40	1,38
12 Feb 2005 - 25 Feb 2005	4,38	4,55	4,07	3,63	3,44	3,10	0	0	0
26 Feb 2005 - 11 Mar 2005	30,62	28,52	23,89	0	0	0	0	0	0
12 Mar 2005 - 31 Mar 2005	30,77	27,68	15,67	5,26	4,06	2,80	0	0	0
01 Apr 2005 - 13 Apr 2005	29,25	26,94	20,55	0	0	0	0	0	0

Dari Gambar 5, terlihat bahwa di lingkungan sekitar lokasi penelitian Gunung Tangkuban Perahu, arus puncak negatif lebih dominan daripada arus puncak positif dengan perbandingan sambaran ke tanah (positif dan negatif) dengan sambaran ke awan adalah 4:1. Untuk arus puncak negatif, sebaran dominan pada -6,9 kA sampai dengan 279,8 kA dan arus puncak negatif rata-rata 44,49 kA dengan jumlah sambaran 19683 sambaran. Untuk arus puncak positif, sebaran dominan pada 6,1 kA sampai dengan 449,3 kA dan arus puncak positif rata-rata 33,38 kA dengan jumlah sambaran 6773 sambaran (Tabel 2).

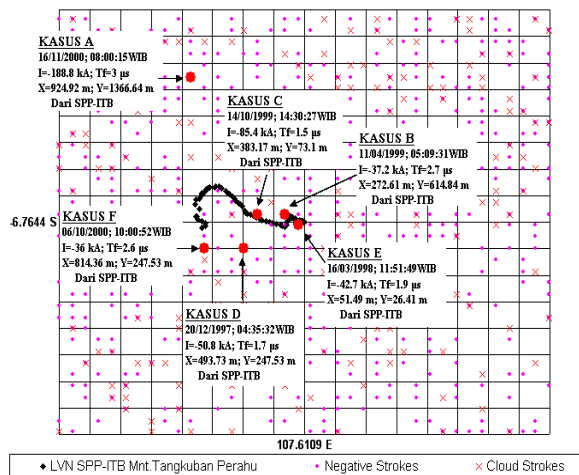
Pengukuran dan Observasi Lapangan. Observasi lapangan dilakukan dengan pengukuran arus puncak oleh alat ukur pita magnetik (APM). Alat ukur Pita Magnetik dipasang pada 4 tempat yaitu pada *down conductor tower* SPP, *Arrester* Tingkat 1 SPP, *Arrester* Tingkat 2 SPP, dan *Arrester* di panel gardu HANKAM [4,7]. Pada *arrester*, APM dipasang setelah *arrester* sehingga arus puncak yang dibaca adalah arus yang dibuang *arrester* dan bukan arus petir sesungguhnya [8]. Data APM diambil dari Bulan Desember 2004 sampai Juni 2005 dan APM diganti tiap 2 sampai 3 minggu sekali, jadi data yang didapatkan adalah arus puncak tertinggi selama 2 sampai 3 minggu tersebut dan kita tidak dapat mengetahui secara pasti kapan tepatnya terjadi arus puncak tersebut (Tabel 3).

3. Hasil dan Pembahasan

Induksi Petir dan Elevasi Tegangan. Sumber daya utama gedung SPP berasal dari saluran jaringan tegangan rendah PLN yang terhubung melalui *overhead lines*

Tabel 4. Data SJTR SPP

Tinggi Saluran	Panjang Saluran	Jari-jari Konduktor	ε _r	μ _r
6,5 m	1768 m	16 mm	2,3	3,25



Gambar 6. Lokasi Sambaran Petir pada SJTR SPP-ITB

tegangan rendah 380V 3 fasa 4 kawat 16 mm, kabel ini tersambung dengan Gardu HANKAM pada jarak 1,8 km dari SPP dan melewati hutan Gunung Tangkuban Perahu. Sebagian besar kabel berada di bawah pohon-pohon tinggi sehingga kemungkinan sambaran petir langsung pada jaringan sangat kecil [4] (Tabel 4).

Apabila terjadi sambaran tidak langsung pada saluran jaringan tegangan rendah SPP maka arus petir akan mengalir pada penghantar arus petir dan menimbulkan induksi tegangan, besarnya tegangan akibat induksi sambaran petir dihitung dengan menggunakan studi kasus data petir historik JADPEN yang pernah menyambar di sekitar JTR SPP Gunung Tangkuban Perahu untuk tahun 1996-2001 [4].

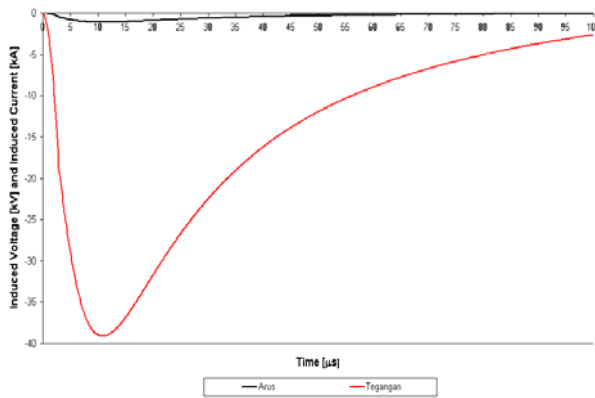
Dengan menggunakan persamaan (1) sampai dengan (7) dan dengan memasukan data JADPEN dan parameter jaringan tegangan rendah SPP, didapatkan profil tegangan induksi dan arus induksi terhadap waktu untuk beberapa studi kasus (Gambar 6). Gambar 7 sampai dengan Gambar 12 memperlihatkan besarnya tegangan induksi petir maksimum [5,9], besarnya arus induksi maksimum, dan besar impuls energi (Tabel 5).

Tabel 5. Rekapitulasi Induksi Petir di SPP ITB

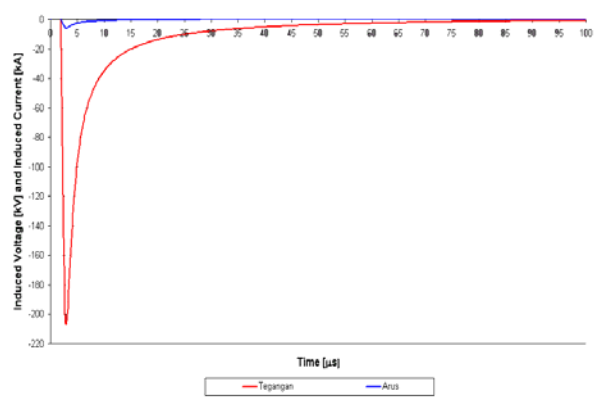
Parameter Sambaran Petir	Tegangan Induksi Maksimum	Arus Induksi Maksimum	Energi Impuls Induksi
Kasus A	-39,1374 kV	-1,0984 kA	1020,7752 Joule
Kasus B	-206,7930 kV	-5,8035 kA	2718,0293 Joule
Kasus C	-609,0290 kV	-17,0918 kA	16.356,2790 Joule
Kasus D	-70,3591 kV	-1,9745 kA	944,3966 Joule
Kasus E	-1.372,4900 kV	-38,5175 kA	29.953,0666 Joule
Kasus F	-43,0012 kV	-1,2068 kA	391,9134 Joule

Tabel 6. Rekapitulasi Elevasi Tegangan di SPP

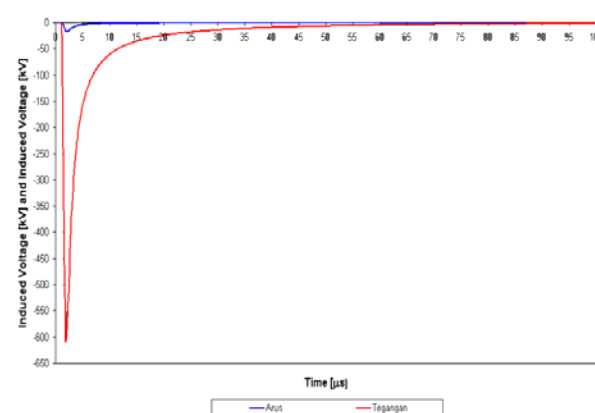
No	Elevasi Tegangan	Down Conductor	
		Arrester Tingkat 2	Arrester Tingkat 1
1	Untuk $I_{5\%} = 95,00$ kA	63,0142 kV	27,2579 kV
2.	Untuk $I_{50\%} = 40,51$ kA	26,8706 kV	11,6233 kV
3.	Untuk $I_{95\%} = 13,34$ kA	8,8485 kV	3,8276 kV
4.	Untuk $I_{APM} = 30,76$ kA	20,4033 kV	8,8258 kV



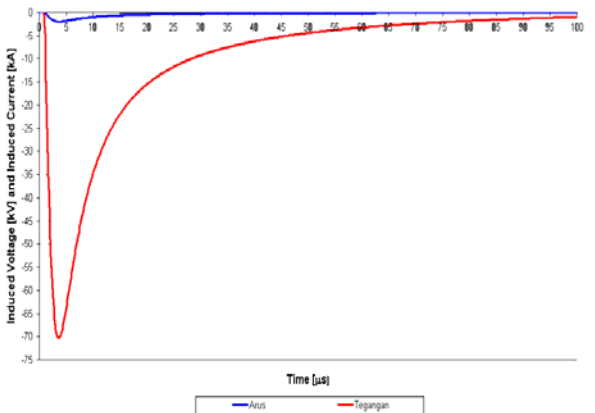
Kasus A



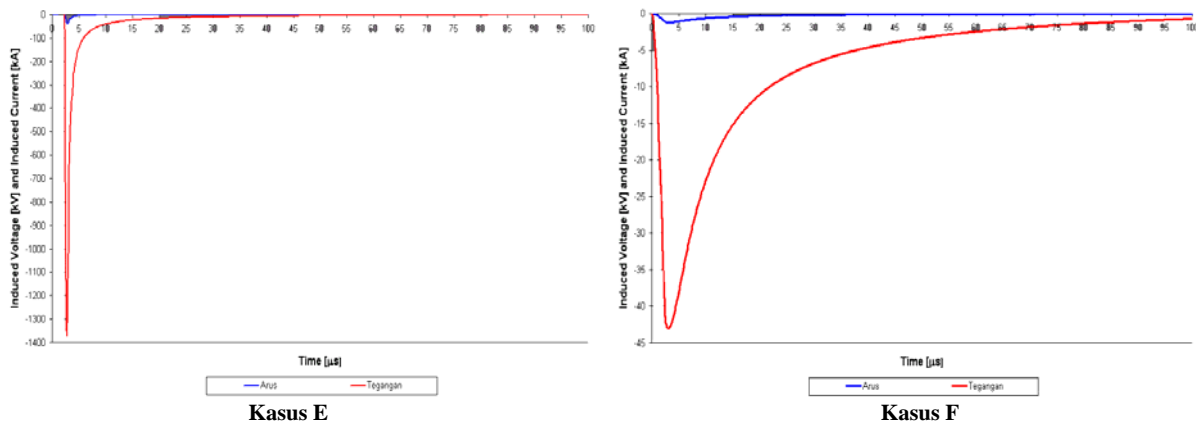
Kasus B



Kasus C



Kasus D



Gambar 12. Profil Tegangan dan Arus Induksi Akibat Sambaran Petir pada Kasus A sampai dengan Kasus F

Sistem penyetan gedung dan tower SPP-ITB berupa elektroda vertikal dan ring konduktor horisontal, sistem penyetan ini terhubung dengan jaringan penyetan internal.

Apabila terjadi sambaran langsung pada tower SPP-ITB maka arus petir akan mengalir pada penghantar arus petir dan menimbulkan jatuh tegangan pada elektroda penyetan, besar jatuh tegangan pada elektroda penyetan dihitung dengan asumsi $I_{5\%} = 95 \text{ kA}$, $I_{50\%} = 40,51 \text{ kA}$, $I_{95\%} = 13,34 \text{ kA}$, dan data APM, $I = 30,76 \text{ kA}$ mengalir merata ke elektroda penyetan. Berikut nilai elevasi tegangan pada penghantar arus di kedua *arrester* yang ada di SPP.

Dari Tabel 6 terlihat bahwa tegangan induksi petir jauh melebihi tegangan elevasi pada konduktor jadi penyebab kerusakan *arrester* pada SJTR dan SPP adalah tegangan induksi dan bukan elevasi tegangan

Analisis Penyebab Kerusakan Arrester. Hasil perhitungan tegangan induksi maksimum sebesar -1.372,49 kV ataupun tegangan induksi maksimum yang nilainya paling kecil sebesar -39,1374 kV dapat merusak *arrester* karena level proteksi tegangan untuk *arrester* 240/415 volt adalah kurang dari 10 kV jadi hampir semua sambaran langsung yang menyebabkan tegangan induksi petir pada saluran jaringan tegangan rendah SPP dapat merusak *arrester* di SPP.

Hasil perhitungan arus induksi maksimum sebesar -38,5175 kA maupun tegangan induksi maksimum yang nilainya paling kecil sebesar -1,0984 kA tidak dapat merusak *arrester* karena arus potong untuk *arrester* MOV tingkat 1 adalah 200 kA dan *arrester* MOV tingkat 2 adalah 156 kA, namun arus induksi sebesar -38,5215 kA dapat merusak *arrester* tingkat 2 yang arus potongnya 25 kA jika waktu impuls induksi cukup panjang dan energi yang diserap *arrester* melebihi ratingnya.

Hasil perhitungan energi impuls induksi yang nilainya paling kecil sebesar 391,9134 Joule masih dapat merusak *arrester* tingkat 2 bagian primer yaitu *arrester* SAD yang tingkat penyerapan energi maksimalnya 250 Joule namun energi impuls sebesar 391,9937 Joule tidak dapat merusak *arrester* tingkat 2 bagian sekunder yaitu *arrester* MOV yang tingkat penyerapan energi maksimalnya 4000 Joule, dan *arrester* tingkat 1 yaitu *arrester* MOV yang tingkat penyerapan energi maksimalnya 6060 Joule.

Hasil perhitungan energi impuls induksi yang nilainya paling besar sebesar 29.953,0666 Joule dapat merusak semua *arrester* yang terpasang di SPP dengan perincian, *arrester* tingkat 2 bagian primer yaitu *arrester* SAD yang tingkat penyerapan energi maksimalnya 250 Joule, *arrester* tingkat 2 bagian sekunder yaitu *arrester* MOV yang tingkat penyerapan energi maksimalnya 4000 Joule, dan *arrester* tingkat 1 yaitu *arrester* MOV yang tingkat penyerapan energi maksimalnya 6060 Joule [3].

4. Simpulan

Dari hasil penelitian maka dapat diambil kesimpulan sebagai berikut: 1) Sambaran langsung petir pada jaringan tegangan rendah SPP-ITB hampir tidak mungkin terjadi karena SJTR terlindungi oleh pohon-pohon tinggi sepanjang saluran; 2) Elevasi tegangan akibat sambaran langsung pada tower tidak mengakibatkan kerusakan *arrester* karena nilai tegangan tanah yang terlalu kecil karena pemakaian down conductor dengan induktansi rendah, 3) Sambaran petir tidak langsung pada radius sekitar 2 km dari jaringan tegangan rendah dapat mengakibatkan kerusakan pada *arrester* dan peralatan elektronik di dalam SPP-ITB karena tegangan konduksi yang terjadi di SPP-ITB berkisar antara 39 kV sampai dengan 1.379 kV sedangkan *arrester* yang terpasang mempunyai tegangan breakdown kurang dari 10 kV, 4) Arus induksi yang

terjadi akibat sambaran petir dalam bentuk gelombang berjalan tidak langsung mempunyai besaran 1 kA sampai dengan 39 kA. Arus ini jauh lebih kecil dari kemampuan potong *arrester* tingkat 1 sebesar 100 kA sehingga tidak menyebabkan kerusakan *arrester*, 5) Sambaran petir yang terjadi di sekitar jaringan tegangan rendah SPP-ITB sebagian besar adalah sambaran berulang dengan ekor gelombang yang panjang sehingga menimbulkan muatan dan energi impuls petir sekitar 10-30 kiloJoule dan merusak *arrester* yang terpasang karena batas energi maksimum *arrester* terpasang yang berkisar antara 4-6 kiloJoule.

Daftar Acuan

- [1] D.W. Edwards, P.M. Wherrett, A Six Point Protection Approach for Lightning Protection, Surge Protection and Grounding for Low Voltage Facilities, Erico Ltd Australia Journals. <http://www.erico.com>. 2001.
- [2] T. Hirai, T. Takinami, S. Okabe, Proceeding of the International Conference on Lightning Protection (ICLP), Cracow, Poland, 2000, p. 481-486.
- [3] R. Zoro, R.R. Pakki, Guideline and procedure in design, construction, maintenance, and inspection of lightning protection system. LAPI – ITB, Bandung, Indonesia, 1995, p. 320.
- [4] R. Zoro, Disertasi, Jurusan Teknik Elektro, ITB, Indonesia, 1999.
- [5] H.K. Hoidalen, IEEE Transaction on Electromagnetic Compatibility, 45, 1, (2003), p. 214-218
- [6] R. Zoro, S. Sudirham, S., 1996, Proceeding Electropic, Jakarta, 1996, p. 110-113
- [7] K.T. Sirait, R. Zoro, Proceedings Asian Conference on Electrical Discharge, Bandung, 1990, p. 80-84
- [8] S. Hidayat, Prosiding SENATRIK, Bandung, 2004, p. 84
- [9] International standard: protection against lightning electromagnetic impulse. IEC Publication, Geneva, Switzerland, 2006, IEC 62305-1/2006.