

Respons Impuls Pada Elektroda Pentanahan Batang Tunggal Untuk Menentukan Nilai Impedansi Pentanahan

Herman H Sinaga¹, Gamaliel Ketaren¹, Anang Sunardi²

1. Staf Pengajar Jurusan Teknik Elektro Universitas Lampung

2. Alumni Jurusan Teknik Elektro Universitas Lampung

Jl.Prof.Dr. Soemantri Brojonegoro No.1 Bandar Lampung

herman_hs@unila.ac.id

Abstrak—Sampai saat ini sistem pentanahan masih dianggap baik jika resistansinya kecil yaitu nilai resistansi yang diukur dengan sumber DC atau frekuensi rendah. Sementara itu, peristiwa sambaran petir menyebabkan arus impuls dengan frekuensi tinggi sampai orde kHz, sehingga ketika sistem pentanahan bekerja karena dikenai arus impuls petir, nilai impedansinya tidak hanya ditentukan oleh komponen resistifnya saja melainkan juga dipengaruhi oleh komponen induktif dan komponen kapasitif. Dalam makalah ini dibahas impedansi sistem pentanahan batang tunggal yang ditanam dengan variasi kedalaman 2 – 6 meter. Sistem pentanahan diberi impuls untuk menirukan sambaran petir sebagai sumber tegangan dengan frekuensi yang tinggi. Dari hasil-hasil pengukuran dan perhitungan diperoleh nilai impedansi pentanahan terkecil sebesar 23,01 Ω pada kedalaman elektroda batang 6m dengan penurunan impedansi pentanahan rata-rata pada setiap kedalaman 1m mulai 2m sampai 6m sebesar 5,25 Ω . Hasil pengukuran dibandingkan dengan simulasi dengan menggunakan perangkat lunak EMTP. Model simulasi untuk pentanahan atang tunggal menggunakan model rangkaian R-L-C. Hasil pengujian dan simulasi memperlihatkan kemiripan response impuls yang baik dengan magnitude tegangan dan arus yang hampir sama, tetapi respons impuls simulasi memperlihatkan waktu ekor yang jauh lebih pendek dari pengujian.

Kata kunci: Respon impuls, impedansi pentanahan, pentanahan batang tunggal.

Abstract—A good grounding system belived if the its resistance has a small value that measured with DC source or low frquency. Meanwhile, lightning stroke that caused impulse current with high frequency up to kHz, so when gounding system work when striking by lightning, its impedance not only mark out by resisftif component but also will

affected by induktif and kapasitif value. In this paper discussed impedance of grounding system for driven rod that burried with varying dept from 2 to 6 meter. Then impulse injected to imitate lightning stroke as a voltage source with high frequency. From measurement and calculation result it's shows that the lowest grounding system was 23,01 Ω when the dept of driven rod 6 m and grounding impedance decrease abut 5.25 Ω pe meter. Experiment result compare with simulasion using EMTP. EMTP model for driven rod using a R-L-C model. The result shows the magnitude of voltage and current for both experiment and simulation have a good correspondingly, but response for simulation has a far farter tail time impulse.

Keyword: impulse response, grounding impedance, driven rod grounding

A. Pendahuluan

Sambaran petir merupakan salah satu penyebab gangguan yang cukup banyak terjadi dalam sistem tenaga listrik dan paling sering mengenai saluran transmisi. Sambaran petir ini merupakan sumber arus impuls berfrekuensi tinggi yang dampaknya akan sangat fatal apabila mengenai peralatan listrik. Oleh karena itulah diperlukan suatu sistem perlindungan yang baik sehingga dampak buruk yang diakibatkan oleh sambaran petir tersebut dapat dikurangi dan dihilangkan. Sistem perlindungan pada saluran transmisi dan gedung bertingkat dilakukan dengan pembuangan arus petir ke tanah melalui sistem pentanahan. Sistem pentanahan yang umumnya digunakan berupa elektroda batang tunggal yang ditanam ke dalam tanah [Ketaren;G.; Pakpahan, P.; Rajagukguk, M].

Naskah ini diterima pada tanggal 23 Februari 2008, direvisi pada tanggal 25 Maret 2008 dan disetujui untuk diterbitkan pada tanggal 20 April 2008

Selama ini desain sistem pentanahan umumnya hanya memperhitungkan nilai resistansinya saja. Resistansi pentanahan ini biasa diukur dengan menginjeksikan arus DC atau frekuensi rendah pada elektroda pentanahan. Umumnya sistem pentanahan dianggap baik jika nilai resistansinya rendah di bawah 5 ohm [BSN]. Dengan hanya mempertimbangkan nilai resistansi pentanahan saja sebenarnya masih kurang tepat, karena pada kondisi yang sebenarnya sistem pentanahan akan berfungsi untuk menghilangkan dengan cara membumikan tegangan dan arus lebih impuls, baik impuls yang diakibatkan sambaran petir maupun akibat *switching*. [Ramli, I., Ketaren, G.; Rajagukguk; M.]

Jika pada suatu elektroda pentanahan yang dialiri arus impuls berfrekuensi tinggi (orde waktu dalam mikro detik), selain komponen resistansinya komponen induktansi dan kapasitansi juga harus diperhitungkan. Perhitungan seperti ini yang disebut sebagai perhitungan impedansi pentanahan yang mempertimbangkan komponen L dan C dari elektroda pentanahan selain komponen resistansinya [Ramli, I.; Ketaren, G.; Rajagukguk, Liu, Q.]. Dalam makalah ini dibahas respons sistem pentanahan terhadap impuls yang menirukan sumber frekuensi tinggi.

B. Teori Dasar

Pembangkitan Tegangan Impuls

Tegangan impuls dapat dibangkitkan dengan meluahkan muatan kapasitor tegangan tinggi (melalui sela atau *switching*) pada suatu rangkaian tegangan tinggi, sehingga sering digunakan juga didalamnya rangkaian pengali tegangan. Nilai puncak dari tegangan impuls dapat ditentukan dengan bantuan sela ukur atau dengan rangkaian elektronik yang dikombinasikan dengan pembagi tegangan. Tegangan yang naik dalam waktu singkat akan disusul dengan penurunan yang

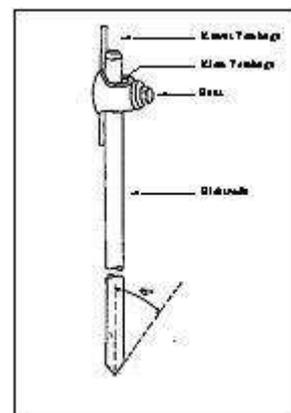
lambat menuju nol, dapat dinyatakan dengan persamaan sebagai berikut:

$$V = V_0(e^{-at} - e^{-bt}) \quad (1)$$

Bentuk gelombang semacam ini mudah dibuat, yaitu dengan menetapkan konstanta a dan b . Harga maksimumnya disebut harga puncak (*peak* atau *crest*) dari tegangan impuls. Definisi muka gelombang (*wave front*) dan ekor gelombang (*wave tail*) ditetapkan dengan standar tertentu, sehingga kesukaran untuk menetapkan permulaan gelombang dan puncak gelombang impuls dapat diatasi. Muka gelombang didefinisikan sebagai bagian dari gelombang impuls yang dimulai dari titik nol (nominal) sampai titik puncak, sedang sisanya disebut ekor gelombang. [Greenwood, A]

Elektroda Pentanahan.

Suatu sistem pentanahan batang tunggal memerlukan elektroda batang pentanahan yang ditanam dalam tanah sehingga akan membuat kontak langsung dengan tanah. Konduktor penghubung yang tidak berisolasi (seperti kawat tembaga) yang juga ditanam dalam tanah termasuk sebagai elektroda batang pentanahan



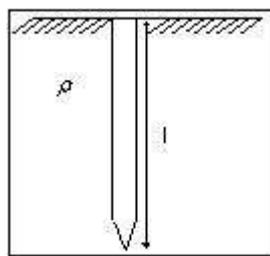
Gambar 1. Konstruksi Elektroda Pentanahan Batang Tunggal [BSN]

Bahan yang digunakan untuk elektroda batang pentanahan adalah logam yang mempunyai konduktivitas cukup tinggi yaitu tembaga, selain itu untuk

mendapatkan nilai yang lebih ekonomis dapat dipergunakan baja yang digalvanisasi atau baja berlapis tembaga. Elektroda batang terbuat dari batang logam bulat atau baja profil yang dipancangkan/ditancapkan kedalam tanah dan salah satu ujungnya lancip dengan kelancipan ($45^\circ \pm 5^\circ$) serta harus dilengkapi dengan klem dan baut klem yang mampu menjepit penghantar seperti pada gambar 1.

Sistem Pentanahan *Driven Rod*

Pentanahan dengan menanamkan batang elektroda tegak lurus kedalam tanah disebut dengan *ground rod electrode* yang terdiri atas satu buah batang elektroda, biasanya berdiameter antara $\frac{3}{4}$ inch sampai 2 inch dan panjangnya 3 meter sampai dengan 15 meter [BSN, Greenwood, A.].



Gambar 2. Elektroda Pentanahan Batang Tunggal [Ketaren, G]

Pada suatu batang elektroda pentanahan yang mempunyai panjang l dan radius d ditanam tegak lurus pada tanah yang mempunyai resistivitas tanah ρ homogen, maka elektroda bersama tanah akan mempunyai tahanan yang besarnya adalah.

$$R = \frac{\rho}{2\pi l} \left(\ln \frac{4l}{r} - 1 \right) \quad (2)$$

dimana:

R = tahanan pengetanahan (ohm)

r = radius batang (m)

ρ = resistivitas tanah (ohm-m)

l = panjang batang (m)

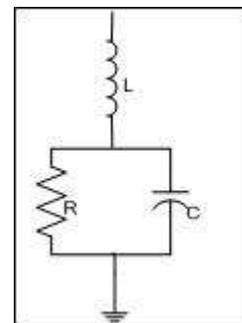
Besar nilai induktansi dan kapasitansi batang elektroda pengetanahan adalah sebagai berikut [Ketaren, G.; Pakpahan, P]:

$$L = 2.l.\ln\left(\frac{2.l}{r}\right).10^{-7} \quad (3)$$

$$C = \frac{\epsilon_r.l}{18.\ln\frac{4.l}{r}}.10^{-9} \quad (4)$$

dimana ϵ_r = konstanta dielektrik tanah (4 untuk tanah kering, 9 untuk tanah basah dan 70 untuk air murni).

Pada keadaan sebenarnya arus yang melalui elektroda dan tanah berbentuk suatu medan magnet dan medan terkuat pada tempat yang konsentrasi arusnya terbesar, yaitu disekitar elektroda. Oleh karena itu induktansi dari elektroda pentanahan terutama ditentukan oleh distribusi arus dalam elektroda pentanahan tersebut.



Gambar 3. Rangkaian Pengganti Satu Elektroda Pentanahan.

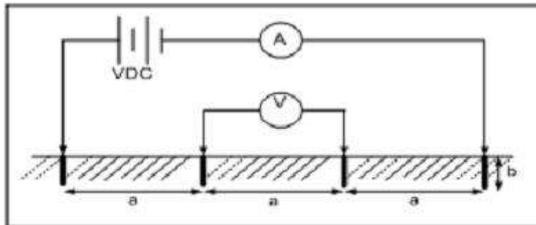
Model arus impuls dapat dituliskan sebagai fungsi ekponensial ganda:

$$i(t) = I_0(e^{-a.t} e^{-b.t}) \quad (5)$$

Metode Pengukuran Resistivitas Tanah

Salah satu metode dalam melakukan pengukuran hambatan jenis tanah atau resistivitas tanah ialah menggunakan metode empat buah elektroda, sebuah sumber DC, sebuah Amperemeter dan sebuah Voltmeter yang sensitif [Greenwood, A].

Prinsip kerja metode empat elektroda di atas adalah apabila arus masuk ke tanah melalui salah satu elektroda dan kembali ke elektroda yang lain yang cukup jauh, maka diameter konduktor dapat diabaikan, sehingga arus yang masuk ke tanah mengalir secara radial.



Gambar 4. Metode empat elektroda

Dengan mengukur besar arus dan tegangannya, maka akan diperoleh hambatan tanah (R), besar hambatan jenis tanah dapat dihitung dengan menggunakan persamaan berikut:

$$\rho = \frac{4\pi aR}{1 + \frac{2a}{\sqrt{a^2 + 4b^2}} - \frac{a}{\sqrt{a^2 + b^2}}} \quad (6)$$

Dimana :

- ρ = hambatan jenis tanah (Ohm-m)
- a = jarak antar elektroda ukur (meter)
- b = Kedalaman elektroda (meter)
- R = besar hambatan tanah (Ohm)

Jika elektroda ukur ditanam rata dengan permukaan tanah ($b=0$ m), maka persamaan menjadi

$$\rho = 2\pi aR \quad (7)$$

dengan merubah-rubah jarak elektroda (a) dapat diperoleh prediksi hambatan jenis tanah pada kedalaman b.

Impedansi Sistem Pentanahan

Apabila suatu sistem pentanahan dikenai arus petir maka pada sistem pentanahan tersebut akan mengalami kenaikan tegangan yang berubah secara cepat. Jika tegangan yang berubah cepat itu dibagi dengan arus petir yang terjadi disebut dengan impedansi sistem pentanahan [Ketaren, G.; Ramli, I. Rajagukguk, M.;

Pakpahan, P.]. Secara matematis dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$Z(t) = \frac{U(t)}{i(t)} \quad (8)$$

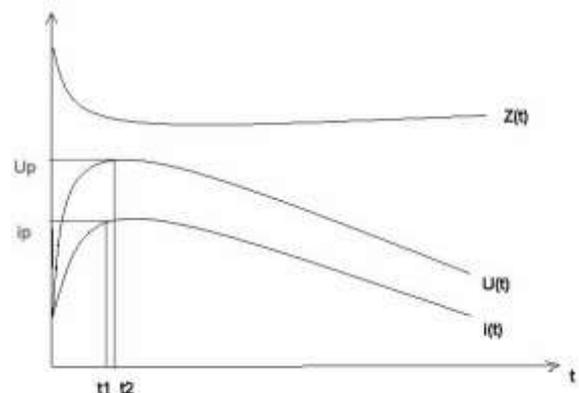
dimana:

Z(t) = impedansi pada sistem pentanahan (ohm).

U(t) = tegangan pada sistem pentanahan (volt)

i(t) = arus petir (ampere)

Dapat diperhatikan pada gambar 5 yang merupakan kurva impedansi sistem pentanahan sebagai berikut:



Gambar 5. Kurva impedansi sistem pentanahan

Dengan demikian kenaikan tegangan yang terjadi pada sistem pentanahan akan sangat tergantung pada impedansi sistem pentanahan. Secara matematis impedansi pentanahan juga dapat dirumuskan sebagai berikut,

$$Z_{impuls} = \frac{U_{puncak}}{i_{puncak}} \quad .. (9)$$

Jadi dengan impedansi impuls ini suatu sistem pentanahan dapat dikatakan baik atau tidak baik, dimana jika impedansi impulsnya kecil maka jatuh tegangannya akan kecil sehingga sistem pentanahan ini dikatakan baik dan jika impedansi impulsnya besar maka jatuh tegangannya

akan semakin besar pula sehingga sistem pentanahan ini dapat dikatakan tidak baik.

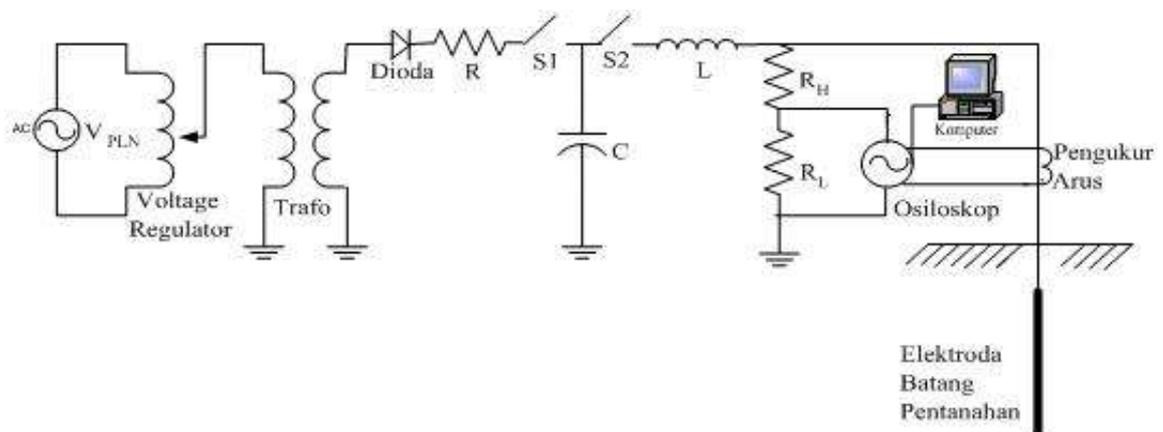
C. Metode Penelitian

Penelitian ekperimental dilakukan di Laboratorium Teknik Tegangan Tinggi Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik Universitas Lampung. Penelitian dilaksanakan dengan mengadakan pengujian menggunakan pembangkit impuls kapasitif yang di injeksikan ke pentanahan batang tunggal yang ditanam dengan kedalaman bervariasi antara 2 sampai 6 meter. Tegangan pada terminal pengujian (batang pentanahan) diukur bersamaan dengan pengukuran arusnya. Sebagai pembanding dilakukan simulasi

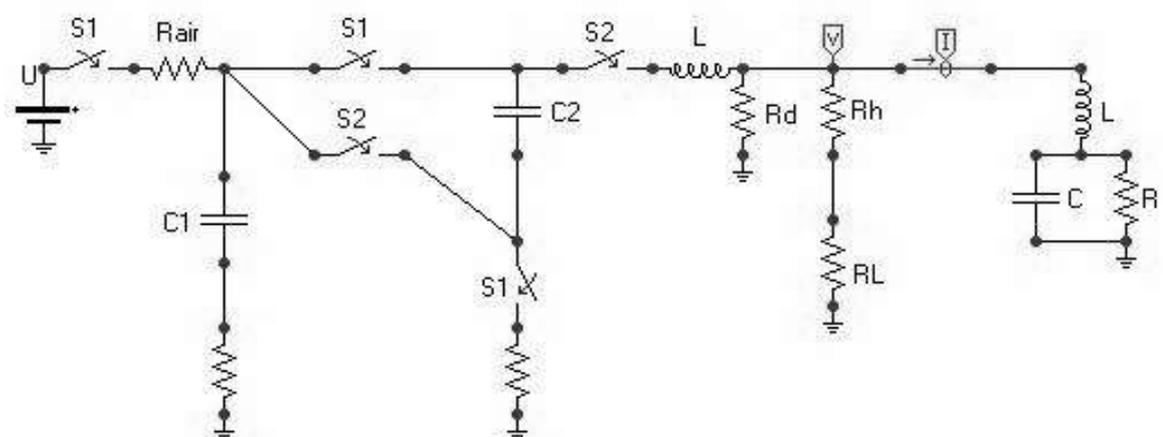
dengan menggunakan perangkat lunak EMTP.

Tegangan keluaran sistem pembangkit impuls kapasitif diukur pada dua kondisi, yakni saat tanpa elektroda batang pentanahan dan setelah elektroda batang pentanahan dihubungkan dengan sistem pembangkit impuls. Pengujian dilakukan dengan tegangan impuls 1400 sampai 1700 volt dengan kenaikan tegangan rata-rata 100 Volt dan waktu muka gelombang bervariasi 3 dan 4 μ s.

Hasil pengujian kemudian dibandingkan dengan simulasi ATP-EMTP, dengan rangkaian seperti gambar 7. Model sistem pentanahan menggunakan model L dan R-C seri.



Gambar 6. Rangkaian pengukuran pembangkitan impuls [Sunardi, A]



Gambar 7. Rangkaian simulasi ATP-EMTP [Sunardi, A]

D. Hasil Dan Pembahasan

Pengujian elektroda pentanahan batang tunggal yang telah dilakukan, menggunakan sumber pembangkit tegangan impuls kapasitif dan tegangan impuls uji yang digunakan bervariasi yaitu antara 1400 Volt hingga 1700 Volt dengan kenaikan rata-rata tegangan 100 Volt. Pada saat pengujian juga tidak hanya memvariasikan nilai tegangannya tetapi juga memvariasikan nilai waktu muka tegangan impuls yang diinjeksikan. Variasi nilai waktu muka impuls tersebut yaitu 3,0 μs dan 4,0 μs dengan mengatur induktor yang ada pada pembangkit tegangan tinggi impuls. Nilai waktu muka ini dipilih karena mendekati nilai waktu muka surja *standard*. Data-data yang dihasilkan dari pengujian di lapangan berupa data-data kurva tegangan dan arus impuls terhadap nilai waktunya. Dari proses pengujian di lapangan maka diperoleh nilai elemen-elemen yang diperlukan untuk dimasukkan ke dalam simulasi pemodelan. Data-data yang diperoleh dari proses simulasi pemodelan dengan menggunakan program *ATP-EMTP* berupa data kurva tegangan dan arus impuls terhadap nilai waktunya. Kemudian data-data pengujian dan hasil simulasi pemodelan dapat dijadikan bahan

perbandingan. Simulasi pemodelan menggunakan gambar 3 sebagai acuan dalam pemodelan elektroda pentanahan batang tunggal.

Resistansi Pentanahan Batang Tunggal

Hasil pengukuran nilai resistansi pentanahan pentanahan batang tunggal ini diperoleh dengan menggunakan metode *fall of potensial* dan alat ukur yang digunakan adalah *earth tester* dengan menggunakan sumber baterai atau sumber DC (Tabel 1).

Pengukuran sistem pentanahan memperlihatkan penurunan resistansi pentanahan yang sangat signifikan seiring dengan semakin bertambahnya kedalaman penanaman konduktor. Hal ini sangat bersesuaian dengan persamaan 2. Namun untuk nilai kapasitansi dan induktansi, semakin dalam penanaman elektroda maka nilai keduanya juga akan semakin besar. Sehingga jika sumber tegangan yang diinjeksikan ke sistem pentanahan merupakan sumber dengan frekwensi tinggi, maka dapat diduga bahwa impedansi sistem pentanahan akan semakin besar jika penanaman konduktor semakin dalam..

Tabel 1. Hasil Pengukuran Nilai Resistansi Pentanahan

No.	Kedalaman (m)	Resistansi (Ω)
1	2	54,7
2	3	35,0
3	4	30,4
4	5	24,8
5	6	21,0

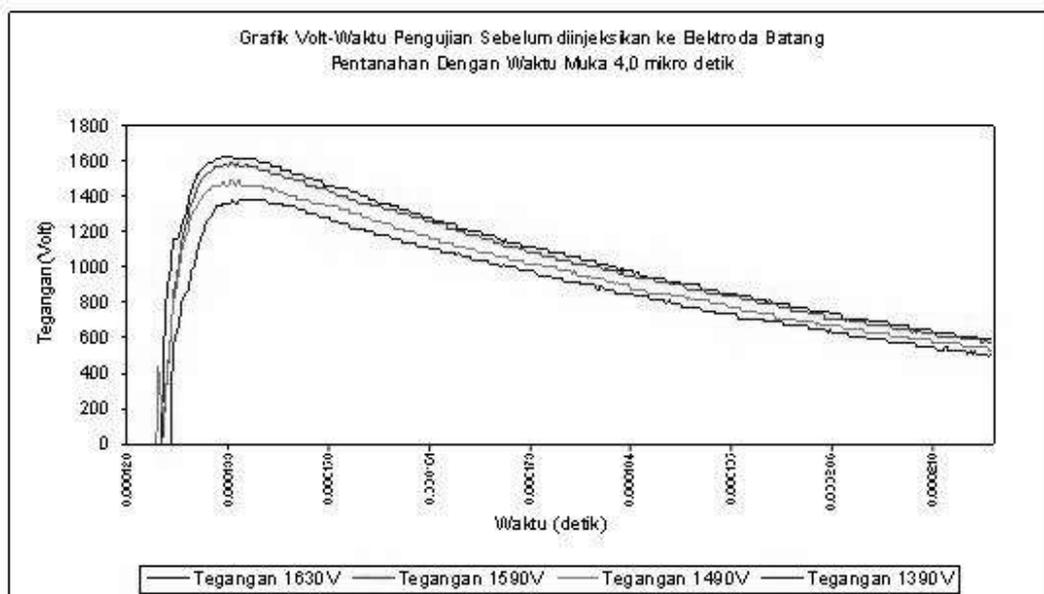
Tabel 2. Hasil Perhitungan Resistansi, Induktansi dan Kapasitansi Pentanahan.

No.	Kedalaman (m)	Resistansi (Ω)	Induktansi (mH)	Kapasitansi (μF)
1	2	54,99	0,00249	0,0001443
2	3	37,46	0,00398	0,0002046
3	4	30,72	0,00554	0,0002624
4	5	25,40	0,00714	0,0003187
5	6	21,70	0,00879	0,0003738

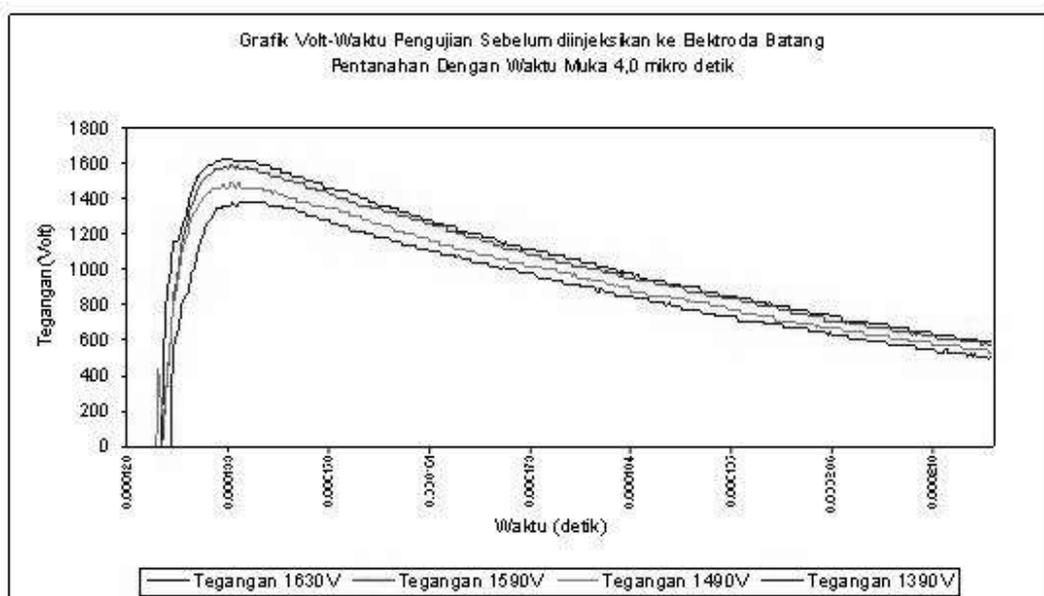
Respons Impuls Elektroda Pentanahan Batang Tunggal.

Pengujian dilakukan dengan menginjeksikan tegangan impuls yang telah diketahui besarnya ke terminal pentanahan. Gambar 8 memperlihatkan variasi tegangan impuls yang diujikan dengan magnitudo antara 1400 volt sampai 1700 volt dengan waktu muka : 3 dan 4 μ s dengan waktu ekor 50 μ s.

Tegangan impuls yang diinjeksikan ke sistem pentanahan *driven-rod*, akan tereduksi menjadi suatu gelombang impuls yang sangat kecil dibandingkan dengan tegangan awal saat di bangkitkan. Hal ini terjadi karena tegangan impuls yang dibangkitkan seolah-olah di hubungsingkatkan langsung ke tanah, dan akibatnya tentu saja tegangan akan langsung terpotong.



Gambar 8. Tegangan Impuls yang diinjeksikan pada sistem pentanahan



Gambar 9. Tipikal tegangan Impuls setelah diinjeksikan ke pentanahan *driven-rod*

Arus akan naik seiring dengan kenaikan tegangan, namun hasil pengukuran juga memperlihatkan adanya arus balik dari tanah ke sistem yang ditunjukkan dengan arus yang bernilai negatif.

Impedansi hasil pengujian dengan menggunakan impuls memperlihatkan nilai yang lebih tinggi dibandingkan dengan nilai resistansi sistem pentanahan yang diuji dengan menggunakan sumber DC.

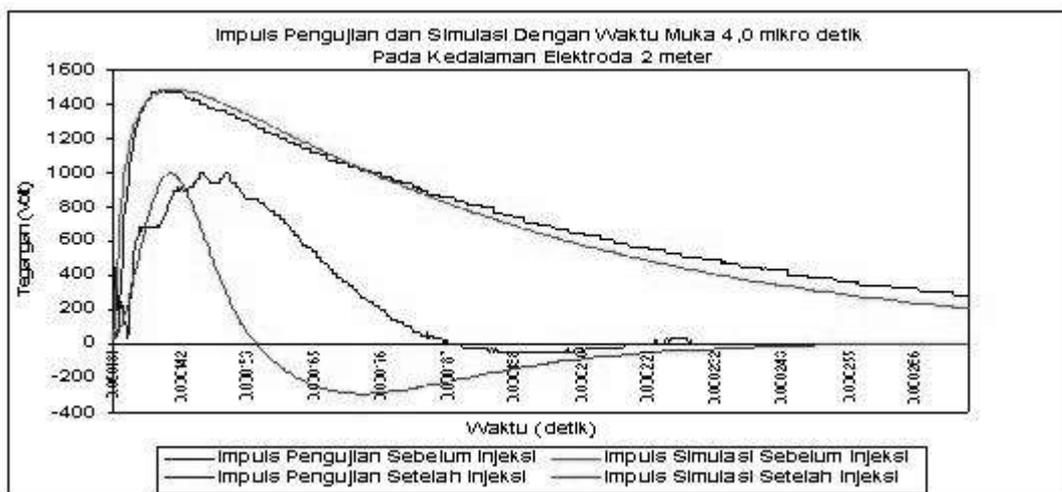
Jika waktu muka impuls yang digunakan sebagai acuan perhitungan impedansi, perbedaan nilai relatif masih sedikit (tabel 3) dengan perbedaan rata-rata sebesar 8%. Namun jika dipergunakan impedansi sebagai hasil perhitungan persamaan 10, hasil yang diperoleh memperlihatkan nilai yang sangat ekstrim dibandingkan dengan hasil pengujian dengan sumber DC (tabel 4)

Tabel 3. Impedansi pentanahan diperoleh dari (V_{max}/I_{max}) respon impuls Injeksi.

Kedalaman n (m)	Impedansi (Ω) Pada Waktu Muka 4,0 μs	Impedansi (Ω) Pada Waktu Muka 3,0 μs
2	57,18	52,58
3	37,63	37,95
4	33,12	33,20
5	27,11	27,33
6	23,01	23,10

Tabel 4. Impedansi Pentanahan Maksimum (V_t/I_t) Dengan Waktu Muka Impuls Injeksi 4,0 mikro detik

Kedalaman Elektroda (m)	Impuls Injeksi 1390V	Impuls Injeksi 1490V	Impuls Injeksi 1590V	Impuls Injeksi 1630V
2	1149,53	1174,02	1146,57	1168,65
3	860,32	873,19	854,82	931,89
4	776,54	760,08	804,40	798,77
5	712,56	708,31	805,71	689,33
6	683,32	693,02	704,57	685,04



Gambar 10. Perbandingan hasil pengujian dan simulasi EMTP

Respons impuls penanahan batang tunggal memperlihatkan bentuk gelombang yang mengikuti bentuk impuls yang diberikan dengan magnitude yang jauh lebih kecil dari gelombang impuls yang diberikan. Gelombang hasil respons impuls juga memiliki waktu muka yang lebih besar namun dengan waktu ekor yang lebih pendek. Hal yang sama dihasilkan arus respons impuls.

Hasil pengukuran juga dibandingkan dengan hasil simulasi ATP-EMTP seperti ditunjukkan gambar 13. Hasil menunjukkan grafik yang masih memiliki perbedaan yang sangat besar, terutama penurunan tegangan setelah waktu puncak yang sangat cepat.

E. Simpulan Dan Saran

Dari hasil penelitian dan analisa yang telah dilakukan, maka penulis dapat mengambil beberapa kesimpulan antara lain:

1. Rata-rata persentase perbedaan antara pengukuran resistansi pentanahan dengan menggunakan sumber DC dan pengukuran impedansi pentanahan dengan menggunakan sumber impuls sebesar 8,0 %.
2. Respons impuls pentanahan batang tunggal menghasilkan bentuk gelombang impuls yang mengikuti bentuk impuls yang dihasilkan dengan waktu muka yang lebih panjang dan waktu ekor yang lebih pendek.
3. Perbedaan hasil simulasi dengan pengujian memperlihatkan waktu ekor impuls hasil simulasi lebih pendek dari hasil pengujian, sehingga masih diperlukan untuk menyempurnakan model sistem pentanahan yang digunakan.

Daftar Pustaka

- [1] Badan Standar Nasional [BSN], 2000, "Persyaratan Umum Instalasi Listrik SNI.04-0225.2000"., Yayasan PUIL, Jakarta.
- [2] Greenwood, Allan, 1991, "*Electrical Transients in Power System Second Edition*". John Wiley & Sons, Inc. New York.
- [3] Idris, N.A.Ramli, A. Nor,Mohamad. Ahmad,H., 2005, "*Performance of Earthing System of Operational/Live Station Under Impuls Conditions*". IPST05-007 Montreal Canada.
- [4] Ketaren,Gamaliel, 2002, "Pengaruh Panjang Sistem Pengetanahan Driven Rod Terhadap Impedansi Impuls". SNWTT'02.
- [5] Liu, Yaqing; 2004, "*Transients Respon of Grounding Systems Caused By Lightning : Modelling And Experiments*". Acta Universitatis Upsaliensis. Uppsala.
- [6] Pakpahan, Parauli, 2002, "Impedansi Konduktor Pengetanahan Pada Kajian Tegangan Lebih Akibat Petir".SNWT V.Yogyakarta
- [7] -----, 1983, "*Power System Instrumentation and Measurment Committee of the IEEE Power Engineering Society., IEEE Guide for Measuring Earth Resistivity, Ground Impedance, and Earth Surface Potensial of a Ground System*". The Institut of Electrical and Electronics Engineers Inc.New York.
- [8] Rajagukguk,Managam, 2002, "Analisis Transien Prilaku Sistem Pembumian Driven Rod"., UNTAN, Pontianak.
- [9] Sunardi, Anang, 2006, "Karakteristik Respon Impuls Pada Elektroda Pentanahan Batang Tunggal (*Single Ground Rod Electrode*) Untuk Menentukan Nilai Impedansi Pentanahan", Tugas Akhir, Jurusan Teknik Elektro UNILA,
- [10] -----, "*The Substation Commite of the IEEE Power Engineering Society. 1985*"., An American

National Standard IEEE Guide for
Safety in AC Substation Grounding.
IEEE Standar Board. American
National Standard Institute.