



Forum Guru Besar
Institut Teknologi Bandung



Forum Guru Besar
Institut Teknologi Bandung

Orasi Ilmiah Guru Besar
Institut Teknologi Bandung

Profesor Bambang Anggoro Soedjarno

**SISTEM PEMBUMIHAN LISTRIK
dan KESELAMATAN**

10 Juli 2021
Balai Pertemuan Ilmiah ITB

**Orasi Ilmiah Guru Besar
Institut Teknologi Bandung**
10 Juli 2021

Profesor Bambang Anggoro Soedjarno

**SISTEM PEMBUMIHAN LISTRIK
dan KESELAMATAN**



Forum Guru Besar
Institut Teknologi Bandung

Hak cipta ada pada penulis

Judul: SISTEM PEMBUMIHAN LISTRIK dan KESELAMATAN
Disampaikan pada sidang terbuka Forum Guru Besar ITB,
tanggal 10 Juli 2021.

Hak Cipta dilindungi undang-undang.

Dilarang memperbanyak sebagian atau seluruh isi buku ini dalam bentuk apapun, baik secara elektronik maupun mekanik, termasuk memfotokopi, merekam atau dengan menggunakan sistem penyimpanan lainnya, tanpa izin tertulis dari Penulis.

UNDANG-UNDANG NOMOR 19 TAHUN 2002 TENTANG HAK CIPTA

1. Barang siapa dengan sengaja dan tanpa hak mengumumkan atau memperbanyak suatu ciptaan atau memberi izin untuk itu, dipidana dengan pidana penjara paling lama 7 (tujuh) tahun dan/atau denda paling banyak Rp 5.000.000.000,00 (lima miliar rupiah).
2. Barang siapa dengan sengaja menyiarkan, memamerkan, mengedarkan, atau menjual kepada umum suatu ciptaan atau barang hasil pelanggaran Hak Cipta atau Hak Terkait sebagaimana dimaksud pada ayat (1), dipidana dengan pidana penjara paling lama 5 (lima) tahun dan/atau denda paling banyak Rp 500.000.000,00 (lima ratus juta rupiah).

Hak Cipta ada pada penulis

Bambang Anggoro Soedjarno
SISTEM PEMBUMIHAN LISTRIK dan KESELAMATAN
Disunting oleh Bambang Anggoro Soedjarno

Bandung: Forum Guru Besar ITB, 2021

x+84 h., 17,5 x 25 cm

ISBN 978-602-6624-49-9

1. Pembumihan Listrik 1. Bambang Anggoro Soedjarno

KATA PENGANTAR

Segala puji dan syukur penulis panjatkan kehadirat Allah SWT Yang Maha Pengasih lagi Maha Penyayang, bahwasanya atas berkat dan rahmatNya, saya dapat menyelesaikan naskah orasi ilmiah ini. Penghargaan dan rasa hormat serta terima kasih yang sebesar-besarnya kepada pimpinan dan anggota Forum Guru Besar Institut Teknologi Bandung, atas perkenannya saya menyampaikan orasi ilmiah ini pada Sidang Terbuka Forum Guru Besar ITB.

Sebagaimana diamanatkan dalam PP 155/2000, Majelis Guru Besar (MGB) adalah unsur ITB yang berfungsi melakukan pembinaan kehidupan akademik dan integritas moral serta etika dalam lingkungan civitas academica ITB. Sehubungan dengan itu, MGB mengemban tanggung jawab atas tegaknya integritas moral dan etika professional sivitas akademika Institut dan atas kukuhnya keserjanaan di lingkungan Institut.

Semoga tulisan ini dapat memberikan wawasan, dan inspirasi yang bermanfaat bagi para pembaca.

Bandung, 10 Juli 2021

Prof. Bambang Anggoro Soedjarno

DAFTAR ISI

KATA PENGANTAR	iii
DAFTAR ISI	v
SINOPSIS	vii
1. PENDAHULUAN	1
1.1. Bagian Instalasi Tenaga Listrik untuk Pembumian	13
1.2. Sistem Tenaga listrik tanpa Pembumian	20
1.3. Sistem Tenaga listrik dengan Pembumian	21
2. KESELAMATAN LISTRIK	26
2.1. Proteksi Kontak Langsung	28
2.2. Pengaruh Arus Listrik melalui Tubuh Manusia	32
2.3. Sistem Kelistrikan Tubuh Manusia	33
2.4. Frekuensi, dan Jalur arus Besar Arus	37
2.5. Ventricular Fibrillation	40
2.6. Thermal Shock	41
2.7. Efek Arus pada Tubuh Manusia	42
2.8. Perbandingan efek yang ditimbulkan arus AC dan DC	43
3. KENAIKKAN POTENSIAL TANAH	44
3.1. Tegangan Langkah, Sentuh dan Transfer	46
3.2. Konfigurasi Pembumian	50
3.3. Bouding dan Diagnosa	56
PENUTUP	60

UCAPAN TERIMAKASIH	60
DAFTAR PUSTAKA	61
CURRICULUM VITAE	63

SINOPSIS

Kualitas suatu Negara salah satunya dinilai dari pemakaian energi listrik per kapita, oleh karena itu pemerintah bersama dengan PT PLN (Persero) bekerja keras agar jumlah elektrifikasi bisa mencapai 100%, agar penggunaan energi listrik per kapita naik. Saat ini di Indonesia sudah mendekati tingkat elektrifikasi 100%. Memang khususnya untuk daerah luar Jawa atau daerah tertinggal lainnya yang susah untuk mendapatkan sumber energi primernya, ataupun ada sumber energi primer tetapi jalur jaringan listrik yang tidak mudah dan ini merupakan kendala untuk mencapai tingkat elektrifikasi 100% tersebut. Selain tingkat elektrifikasi yang akan dikejar, tidak kalah penting adalah tingkat keamanan dan keselamatan pemakai dalam pemakaian energi listrik tersebut, lebih 2 masih banyak pemakai / konsumen energi listrik tersebut sangat awam terhadap bahaya listrik itu sendiri. Oleh karena itu yang harus diperhatikan dalam menyalurkan listrik dari sumber (pembangkit) ke konsumen / pemakai adalah sistem pengamanan / sistem proteksi dari sistem kelistrikannya. Proteksi ini menyangkut dari proteksi terhadap manusia, sistem tenaga listrik, data maupun peralatannya. Dalam orasi ilmiah ini lebih difokuskan proteksi terhadap manusia yaitu keselamatan manusia dalam menggunakan tenaga listrik.

Tanah dilihat dari sudut kelistrikan merupakan “bagian” yang dapat menampung muatan listrik positif maupun negatif yang tak terhingga

kapasitasnya, artinya berapapun besar muatan dapat “diserap” atau “diterima” masuk ke dalam bumi / tanah. Ini adalah SUNATULLOH bumi dimana potensial positif maupun negatif bila dihubungkan dengan bumi selalu “melepas” muatan atau discharge sehingga potensialnya menjadi NOL. Potensial tanah selalu NOL dalam kondisi normal, dengan peristiwa inilah untuk mengamankan agar manusia tidak tersengat tegangan baik positif maupun negatif, dibuatlah koneksi dengan tanah / bumi. Hal ini yang menjadikan dasar SISTEM PEMBUMIAN LISTRIK. Dalam kondisi tidak normal yang biasanya dalam waktu yang singkat, misalnya saat terjadi sambaran petir, titik pembumian tersebut terjadi kenaikan potensial yang sangat besar. Hal ini juga bahaya terhadap manusia yang berdiri didekat titik pembumian yang kebetulan disambar petir, yaitu terjadi tegangan langkah maupun tegangan sentuh.

Banyak macam sistem pembumian listrik, khusus untuk keselamatan terhadap manusia dilakukan harus sesuai dengan kemampuan tubuh dapat menerima seberapa besar arus listrik agar tidak bahaya. Penelitian terhadap ketahanan tubuh terhadap sengatan arus listrik baik AC maupun DC merupakan dasar membuat sistem proteksi ini. Saat ini data tersebut sudah banyak diteliti oleh berbagai peneliti sehingga dibuatlah suatu standard yang digunakan sebagai acuan untuk membuat alat maupun rangkaian termasuk sistem pembumian agar suatu instalasi listrik aman terhadap manusia penggunaannya. Banyak peralatan yang diciptakan untuk proteksi jaringan listrik bila terjadi gangguan sehingga

gangguan tersebut dapat diminimalisir terhadap keselamatan maupun kerugian yang lebih besar seperti kerusakan alat, sistem maupun kebakaran.

Sistem Pembumian Listrik pada dasarnya seperti “asuransi” artinya biaya yang dikeluarkan cukup besar relative terhadap investasi sistem kelistrikan itu sendiri yang akan berfungsi bila terjadi gangguan. Bila tidak terjadi gangguan seakan akan biaya untuk proteksi termasuk sistem pembumian itu terlihat besar, tetapi bila terjadi gangguan maka nilai biaya ini tidak terlihat besar.

Karena sifat tanah selalu fluktuatif terhadap lingkungan khususnya hujan maupun kontaminasi kimia disekitarnya yang mengakibatkan nilai resistansi sistem pembumian menjadi tidak konstan. Oleh karena itu perlu dilakukan pemeliharaan rutin maupun mengujian dengan sistem diagnose tertentu agar bisa diprediksi kondisi resistansi sistem pembumian ini. Perlu diketahui bahwa besar resistansi pembumian ini juga tergantung terhadap bentuk arus yang diinjeksikan searah, bolak balik maupun impuls, sedang arus pengujian biasanya dilakukan dengan sumber tegangan / arus serah. Oleh karena itu perlu adanya korelasi antara kebutuhan dan pengujian.

Dengan uraian yang singkat ini harapan kami adalah untuk kita semua baik yang mengerti listrik maupun yang awam terhadap listrik menyadari kehadiran sistem pembumian listrik untuk keselamatan pengguna listrik.

SISTEM PEMBUMIAN LISTRIK dan KESELAMATAN

1. PENDAHULUAN

Listrik merupakan suatu kebutuhan mutlak yang harus dipenuhi untuk menjamin keberlangsungan hidup masyarakat masa kini. Pemenuhan kebutuhan ini terus meningkat seiring bertambahnya pertumbuhan beban dari tahun ke tahun. Tentunya fasilitas-fasilitas sarana penyedia listrik harus terjamin dengan baik kehandalannya, salah satu yang terpenting adalah menjaga sistem pembumian listrik atau biasa disebut *electrical grounding*, dapat bekerja sebagaimana mestinya, untuk menunjang keberlangsung penyediaan listrik ke konsumen. Sistem pembumian adalah suatu sistem pengamanan terhadap perangkat-perangkat yang mempergunakan listrik sebagai sumber tenaga, dari kenaikan tegangan listrik, petir, dan lain-lain. Pengertian lain dari sistem pembumian adalah, penghubungan suatu titik sirkit listrik atau suatu penghantar yang bukan bagian dari sirkit listrik dengan bumi menurut cara tertentu. (PUIL.2000).

Sistem pembumian memegang peran penting dalam menjamin keberlangsungan penyaluran tenaga listrik sebagai pengamanan peralatan listrik sekaligus memiliki peran untuk menjaga keselamatan para pekerja yang terlibat stabilitas penyaluran energi listrik dari pembangkit sampai ke konsumen. Sehingga dapat dijabarkan mengenai fungsi pembumian secara lebih detail sebagai berikut (Switzer, 1999):

1. Personal Safety, Keselamatan jiwa merupakan tujuan utama dari sistem pembumian listrik ini, dapat dicapai dengan sistem pembumian dengan menggunakan tahanan yang kecil *low impedance* dan bonding antar perangkat berbahan metalik, bodi, dan pipa, serta objek-objek konduktif lainnya, tidak melebihi teralirinya arus gangguan yang sangat berbahaya bagi keselamatan manusia. Hal ini tentu saja perlu didukung dengan studi mengenai seberapa besar arus yang boleh lewat ke tubuh manusia.
2. Proteksi bangunan dan peralatan, hal ini khususnya untuk menjaga agar bila terjadi gangguan tidak sampai merusak peralatan listrik.
3. Proteksi sistem tenaga listrik untuk menjamin keberlangsungan suplai energy yang disinergikan dengan sistem proteksi sistem tenaga listrik.
4. Reduksi *Noise* Elektrik khususnya untuk peralatan yang menggunakan sinyal kecil dan berfrekuensi tinggi.

Pembumian yang tepat mampu meminimalisasi impedansi antara titik pembumian dan bangunan, potensial tegangan antara peralatan yang terhubung, serta efek dari medan elektrik dan magnetik.

Suatu sistem pembumian yang baik harus diinspeksi secara periodik dan melakukan perawatan untuk menjaga keefektifannya. Selain itu pemilihan material dan kelayakan teknik instalasi yang tepat dapat menjamin sistem pembumian dapat bertahan dari kerusakan.

Sistem pembumian mulai dikenal sejak tahun 1900. Sebelumnya sistem-sistem tenaga listrik tidak dibumikan karena ukurannya masih kecil dan tidak membahayakan. Namun setelah sistem-sistem tenaga listrik berkembang semakin besar dengan tegangan yang semakin tinggi dan jarak jangkauan semakin jauh, baru diperlukan sistem pembumian. Kalau tidak, hal ini bisa menimbulkan potensi bahaya listrik yang sangat tinggi, baik bagi manusia, peralatan dan sistem pelayanannya sendiri.

Secara umum, tujuan sistem pembumian adalah:

- a. Menjamin keselamatan orang dari sengatan listrik baik dalam keadaan normal dan tidak dari tegangan sentuh dan tegangan langkah.
- b. Menjamin kerja peralatan-peralatan listrik.
- c. Mencegah kerusakan peralatan-peralatan listrik.
- d. Menyalurkan energi listrik akibat petir ke tanah.
- e. Menstabilkan tegangan saat terjadi gangguan.
- f. Mencegah terjadinya perbedaan potensial antara bagian tertentu dari instalasi secara aman.

Dalam mempelajari sistem pembumian, masalah konfigurasi elektroda merupakan salah satu faktor yang ikut menentukan karakteristik impedansi dari sistem pembumian selain arus yang diinjeksikan. Faktor konfigurasi dalam sistem pembumian dan faktor komposisi tanah yang memberikan harga ρ , ϵ dan μ merupakan faktor

internal sistem pengetanahan. Secara umum besar impedansi sistem pembumian dapat dinyatakan sebagai berikut :

$$Z = Z(T, K, I)$$

Dimana: T = Faktor tanah yang menentukan ρ , ϵ dan μ

K = Faktor Konfigurasi, Vertikal, Horizontal, Grid, Plat

I = Faktor arus yang diinjeksikan, DC, AC, Impuls

Faktor T (tanah) dan K (konfigurasi) disebut sebagai faktor internal dan faktor I (arus) disebut sebagai faktor eksternal, walaupun impedansi sistem pembumian dapat di kelompokkan seperti di atas, akan tetapi dalam kenyataannya, untuk faktor internal yaitu T (tanah) dan K (konfigurasi) merupakan fungsi dari faktor eksternal I (arus) khususnya frekuensi. Untuk faktor T (tanah), besar ρ dan ϵ merupakan fungsi frekuensi yang diinjeksikan pada tanah tersebut. Sedang faktor K (konfigurasi), besar impedansi dari masing konfigurasi (vertikal, horizontal, grid) selain dipengaruhi oleh frekuensi juga di pengaruhi oleh besar amplitudo arus yang diinjeksikan. Baik frekuensi maupun amplitudo arus yang diinjeksikan, besar impedansi & sudut fasa sangat tergantung pada diameter elektroda dan panjang elektroda yang membentuk konfigurasi sistem pembumian.

Panjang elektroda akan berpengaruh terhadap besar impedansi & sudut fasa pada frekuensi tinggi. Arus berfrekuensi tinggi dengan panjang gelombang sebesar λ perlu dibandingkan dengan panjang elektroda ℓ . Apakah panjang gelombang λ jauh lebih kecil, mendekati atau

sama dan jauh lebih besar dari panjang elektroda ℓ .

- $\lambda \ll \ell$, maka arus I yang diinjeksikan ke dalam konfigurasi elektroda sistem pembumian dalam menyalurkan / menyebarkan arus dalam tanah akan mengikuti proses konduksi dan radiasi gelombang elektromagnetik dalam tanah. Hal ini tidak menutup kemungkinan akan terjadinya refleksi gelombang tegangan yang diukur pada elektroda tersebut.
- $\lambda \gg \ell$, maka arus I yang diinjeksikan ke dalam konfigurasi elektroda sistem pembumian dalam menyalurkan arus ke tanah hanya mengikuti proses konduksi sedang radiasi gelombang elektromagnetik cenderung kecil dan dapat diabaikan.
- $\lambda \approx \ell$, maka arus yang diinjeksikan ke dalam konfigurasi elektroda sistem pembumian akan mengikuti proses konduksi dan mungkin radiasi gelombang elektromagnetik dapat terjadi dan besarnya tidak dapat diabaikan begitu saja.

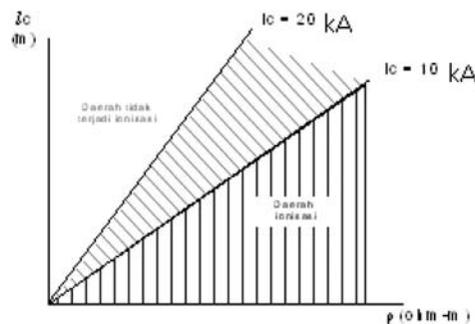
Mousa (1994) dan Correia (1997) menyatakan bahwa amplitudo arus I (atau harga puncak arus impuls) akan berpengaruh terhadap proses penyaluran arus tersebut dari elektroda ke dalam tanah bila telah mencapai harga tertentu, karena akan terjadi peristiwa ionisasi Mousa (1994); Correia (1997); Dawalibi (1979); Noor (2000); Robert (1996); Zeqing (1999); Verma (1981).

$$J = \frac{I}{A} = \frac{I}{2\pi r \ell}$$

Khusus untuk arus yang tinggi $I > 20 \text{ kA}$ (ada yang mengatakan $I > 10 \text{ kA}$), Shonoda (2000); Vela Zquez (1984) memungkinkan terjadinya peristiwa ionisasi yang memperkecil nilai impedansi, Mousa (1994); Noor (2000), bila medan listrik dipermukaan elektroda antara

$$E_c = 50 \frac{kV}{m} \text{ sampai } 500 \frac{kV}{m}$$

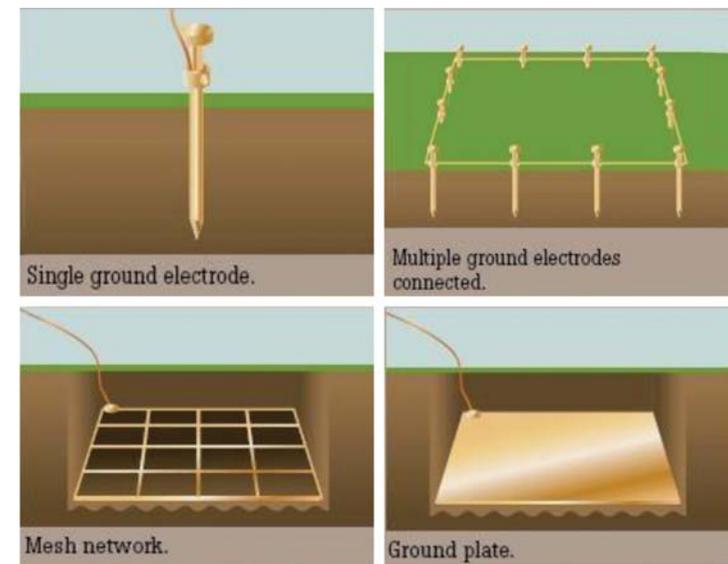
Panjang total elektroda maksimum tidak boleh melebihi ℓ_c bila diinginkan terjadi ionisasi pada sistem pembumian tersebut. Untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada gambar 1-1, korelasi panjang kritis dan resistivitas agar terjadi proses ionisasi dalam sistem pembumian.



Gambar. 1-1 Korelasi panjang kritis elektroda kritis dengan resistivitas agar terjadi proses ionisasi dalam sistem pembumian.

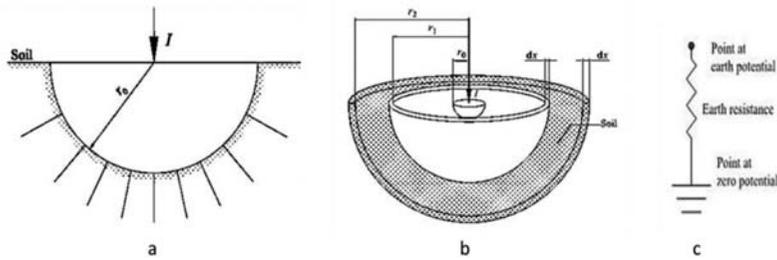
Sistem pembumian adalah sistem yang terdiri dari satu atau beberapa konduktor yang ditanam dalam tanah dengan kedalaman tertentu baik dipasang dengan konfigurasi vertikal, horizontal, ring, radial, grid, plat maupun kombinasi dari padanya. Secara umum yang sering digunakan

adalah konfigurasi vertikal khususnya di daerah perumahan atau daerah-daerah yang mempunyai kondisi tanah dengan luas yang terbatas, konfigurasi horizontal untuk daerah-daerah yang lebih luas cakupan tanahnya seperti menara transmisi, sedang konfigurasi grid atau kombinasi grid dengan vertikal untuk daerah-daerah industri, gardu induk, dan lain-lain yang mempunyai daerah cakupan yang luas, seperti gambar 1.2 di bawah ini.



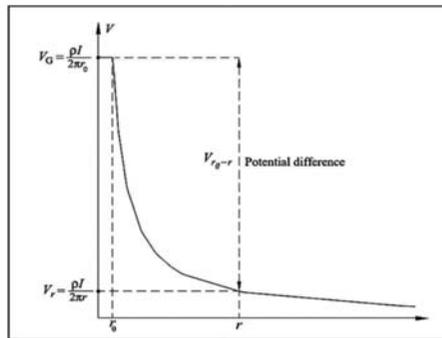
Gambar 1.2 Konfigurasi vertikal, horizontal grid, plat

Adapun ilustrasi dari tanah yang mempunyai resistansi dapat digambarkan seperti gambar 1.3 di bawah ini, dan diinjeksi suatu arus di suatu titik tertentu.



Gambar 1.3.a Ilustrasi Resistansi tanah

Arus yang masuk ke tanah akan meningkatkan potensial elektrik di tiap titik pada permukaan bumi, terhadap titik jauh dari titik injeksi tanah (bias tak terhingga) yang secara konvensional diasumsikan sebagai potensial nol.

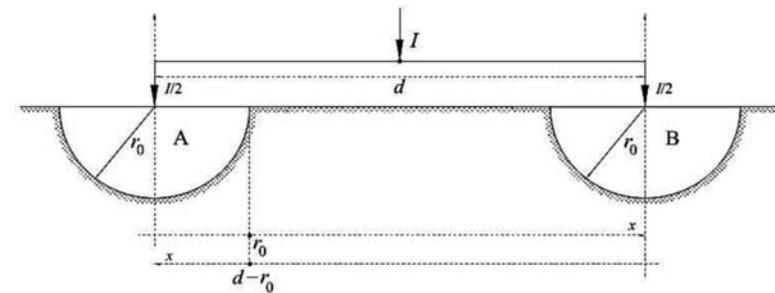


Gambar 1.3.b Potensial Bumi sebagai fungsi dari jarak elektroda

Pada banyak kasus, elektroda pentanahan dihubungkan bersama dengan tujuan untuk mengurangi baik resistansi pembumian maupun potensial pembumiannya. Resistansi tanah dari dua elektroda setengah

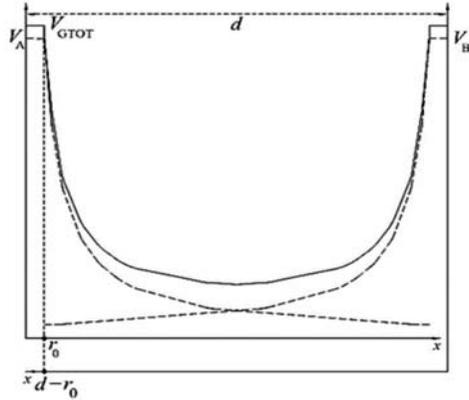
bola yang identik, A dan B, dapat dihitung, dengan masing-masing jari-jari yang terpisah sejauh d dari titik pusat ke pusat lainnya, seperti pada Gambar 1.4. Dengan I adalah arus bocor dan ρ merupakan resistifitas sejenis dari tanah.

Tiap elektroda akan mengalirkan arus sebesar $\frac{1}{2} I$, sebagai fungsi simetri sistem.



Gambar 1.4 Elektroda Setengah Bola Identik yang Terpisah Sejauh d

Jika kedua elektroda terlalu dekat, maka akan saling mempengaruhi, menyebabkan perubahan bentuk potensial total yang terkait dengan kurva potensial masing-masing. Kurva potensial total dapat ditentukan dengan prinsip superposisi, dengan mempertimbangkan peran tiap elektroda secara terpisah, kemudian menjumlahkannya. Pada gambar 1.5 menunjukkan hasil dari proses ini.



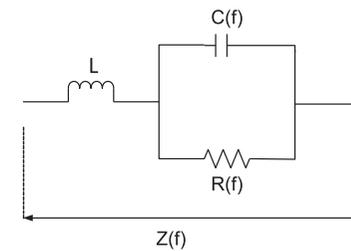
Gambar 1.5 Potensial Ekuivalen Dua Elektroda Saling Mempengaruhi

Sistem pembumian yang terdiri dari banyak batang pembumian yang terhubung, jaringan bertautan (*multiple ground electrodes connected*), *mesh network* atau *loop tanah* dan *ground plate*. Sistem-sistem ini dipasang secara khusus di substasiun pembangkit listrik, kantor pusat, dan tempat-tempat menara seluler. Jaringan kompleks meningkatkan secara dramatis jumlah kontak dengan tanah sekitarnya dan menurunkan tahanan tanah.

Rangkaian Ekuivalen dari sistem pembumian berdasarkan formulasi empiris maupun praktis pengukuran impedansi baik di laboratorium maupun di lapangan menunjukkan bahwa impedansi sistem pembumian Z mengandung komponen tahanan R , induktor L dan kapasitor C . Yang menjadi pertanyaan adalah bagaimana formulasi rangkaian ekuivalen dari sistem pembumian tersebut. Untuk menjawab pertanyaan ini, perlu dilihat dari hasil percobaan di laboratorium dengan menggunakan arus

bolak-balik (AC) frekuensi variabel dari 0 Hz (DC) sampai frekuensi tinggi orde MHz yang diinjeksikan ke dalam elektroda sistem pengetanahan dengan berbagai macam konfigurasi. Dari hasil percobaan menunjukkan peristiwa, bahwa:

Dengan uraian seperti di atas maka rangkaian ekuivalen yang cocok untuk sistem pembumian seperti gambar 1.6 di bawah ini:



Gambar 1.6 Rangkaian ekuivalen impedansi sistem pembumian, Dawalibi dan Mukedar (1976) di mana :

- $Z_{(f)}$ = Impedansi sistem pengetanahan fungsi frekuensi
- $R_{(f)}$ = Tahanan sistem pembumian fungsi frekuensi
- $C_{(f)}$ = Kapasitor sistem pembumian fungsi frekuensi
- L = Induktor sistem pembumian

Berdasarkan rumus penentuan tahanan pembumian dari elektroda yang hemispherical $R = \rho/2\pi r$ terlihat bahwa tahanan pembumian berbanding lurus dengan besarnya ρ . Untuk berbagai tempat harga ρ ini tidak sama dan tergantung pada beberapa faktor:

- a. Sifat Geologi Tanah

Ini merupakan faktor utama yang menentukan tahanan jenis tanah.

Bahan dasar dari pada tanah relatif bersifat bukan penghantar. Nilai resistans jenis tanah, r_t sangat berbeda tergantung komposisi tanah seperti dapat dilihat dalam pasal 320-1 dalam PUIL 1987

b. Komposisi Zat-Zat Kimia di Dalam Tanah.

Kandungan zat - zat kimia dalam tanah terutama sejumlah zat organik maupun anorganik yang dapat larut perlu untuk diperhatikan pula. Daerah dengan tingkat curah hujan tinggi biasanya mempunyai tahanan jenis tanah yang tinggi disebabkan garam yang terkandung pada lapisan atas larut. Pada daerah yang demikian ini untuk memperoleh pentanahan yang efektif yaitu dengan menanam elektroda pada kedalaman yang lebih dalam dimana larutan garam masih terdapat.

c. Kandungan air tanah

Kandungan air tanah sangat berpengaruh terhadap perubahan tahanan jenis tanah (ρ) terutama kandungan air tanah sampai dengan 20%. Dalam salah satu test laboratorium untuk tanah merah penurunan kandungan air tanah dari 20% ke 10% menyebabkan tahanan jenis tanah naik sampai 30 kali. Kenaikan kandungan air tanah di atas 20% pengaruhnya sedikit sekali.

d. Temperatur tanah

Temperatur bumi pada kedalaman 5 feet (= 1,5 m) biasanya stabil terhadap perubahan temperatur permukaan. Bagi Indonesia daerah

tropic perbedaan temperatur selama setahun tidak banyak, sehingga faktor temperatur boleh dikatakan tidak ada pengaruhnya.

1.1 Bagian Instalasi Listrik untuk Penumbumian

Sistem penumbumian ini dihubungkan dengan bagian instalasi listrik dengan berbagai maksud dan tujuan yang berbeda antara instalasi yang satu dengan instalasi yang lain. Instalasi listrik yang perlu dihubungkan dengan sistem pengetanahan dapat dibedakan antara lain:

- a. Bagian instalasi sistem tenaga listrik
- b. Bagian instalasi penangkal petir
- c. Bagian peralatan elektronika / meter / alat medis dan lain-lain.

a. Bagian instalasi tenaga listrik yang perlu dihubungkan dengan sistem penumbumian antara lain

- Titik netral dari suatu sistem 3 fasa yang bertujuan agar titik netral dari sistem tenaga listrik 3 fasa tersebut “selalu” bertegangan sama dengan atau mendekati nol. Titik netral yang bertegangan tidak nol dapat menyebabkan ketidakseimbangannya beban sistem tenaga listrik tersebut. Selain berfungsi sebagai “pengecilan” tegangan netral sistem penumbumian juga bertujuan untuk menentukan koordinasi proteksi rele arus lebih bila terjadi gangguan hubung singkat ke tanah dari sistem tenaga listrik tersebut.

- Body peralatan yang seharusnya tidak boleh bertegangan harus dihubungkan dengan sistem pembumian dengan tujuan agar body tersebut tidak boleh bertegangan sampai batas maksimum ? 50 volt, saat terjadi gangguan pada peralatan tersebut. Hal ini untuk menghindari terjadinya bahaya tegangan sentuh terhadap manusia yang berada di sekitarnya

b. Bagian instalasi penangkal petir.

Fungsi dan tujuan sistem penangkal petir yang dihubungkan dengan sistem pembumian tentu saja jauh berbeda dengan sistem pembumian yang dihubungkan ke instalasi sistem tenaga listrik karena besar arus / tegangan, bentuk gelombang sangat berbeda dan tujuannya pun berbeda pula. Sistem pembumian untuk instalasi penangkal petir harus lebih spesifik lebih-lebih bila ditinjau terhadap bahaya dan kerusakan yang ditimbulkannya. Oleh karena itu pola pendekatan berpikirnya pun juga harus berbeda pula dalam mengevaluasi dan merencanakan sistem pengetanahan untuk penangkalan petir.

c. Bagian peralatan instalasi elektronik, meter, alat-alat komunikasi, medis.

Sistem pembumiannya harus diperlakukan secara khusus yang tidak boleh disamakan dengan sistem pembumian untuk instalasi lainnya. Kekhususan dari peralatan ini adalah bahwa peralatan-peralatan tersebut memerlukan energi listrik 50 Hz / 60 Hz baik dari 1 phasa

maupun 3 phasa. Masukan/keluaran yang lain dari peralatan tersebut adalah berupa sinyal (energi listrik yang kecil) akan tetapi mempunyai frekuensi yang tinggi yang dapat mencapai orde MHz.

Dengan penjelasan dari masing-masing instalasi tenaga listrik, peralatan elektronik dan penangkal petir yang akan dipasang sistem pembumiannya, dapatlah digambarkan diagram arus - frekuensi dari masing-masing daerah instalasi tersebut di atas seperti tabel 1-1.

Tabel 1-1 Besar Arus & Frekuensi untuk masing-masing daerah instalasi

Daerah Instalasi	Arus (A)	Frekuensi (Hz)
A. Tenaga Listrik	0 s/d 50.000	50
B. Peralatan Komunikasi Elektronik	0 s/d 4	0 s/d ratusan Mega Hertz
C. Penangkal Petir	1.000 s/d 100.000	1000 s/d 1.000.000

Sedangkan batas nilai impedansi sistem pembumian untuk masing-masing daerah instalasi tersebut dapat dilihat pada tabel 1-2 di bawah ini.

Tabel 1.2 Batas nilai impedansi pembumian yang diperlukan dari tiap-tiap daerah instalasi

Besaran Dae- rah Instalasi	Arus Injeksi (A)	Frekuensi arus injeksi (HZ)	Impedansi (ohm)	Keterangan	Sifat pengamanan terhadap	
A	Tenaga Listrik	≤ 15	50	≤ 3	Tegangan rendah	Manusia
	-Body peralatan	≤ 100	50	≤ 0,5	Tegangan menengah	Manusia
	-Titik Netral	0 – 50.000	50	Kecil- Besar	Tergantung setting rele proteksi	Peralatan
B	Peralatan komunikasi elektronika	< 4	< 10 MHZ	≤ 50	Tegangan maks 220 V	Peralatan
C	Penangkal Petir	0 – 100.000	< 1 MHZ	≤ 1	Standard	Manusia & Peralatan

Tabel 1.2 di atas merupakan nilai batasan impedansi dari daerah instalasi yang menggunakan sistem pembumian dengan impedansi tertentu pada frekuensi tertentu pula.

Telah diketahui bersama bahwa tegangan nol referensi dari suatu peralatan (elektronik, medis, komunikasi) adalah body peralatannya. Bila body tersebut dihubungkan dengan sistem pembumian, dan netral sumber energi listrik juga ditanahkan bersama maka akan dapat diduga

bahwa referensi nol peralatan sudah tidak nol lagi (dengan tegangan yang kecil).

Tegangan kecil tersebut tidak terasa untuk sistem tenaga tetapi cukup berarti untuk peralatan-peralatan yang orde tegangan kerjanya sangat kecil. Belum lagi banyaknya sinyal frekuensi tinggi di udara yang ikut “menginduksikan” potensial tanah dan juga banyaknya arus-arus tanah yang tidak jelas besar dan frekuensinya ikut membuat referensi nol tanah tersebut menjadi lebih jelas. Akibat yang diderita oleh peralatan tersebut adalah tidak dapat mengukur data dengan ketelitian dan keakuratan yang tinggi. Oleh karena itu sistem pembumian untuk peralatan elektronik, komunikasi, media dan lain-lain perlu mendapat perhatian yang lebih serius.

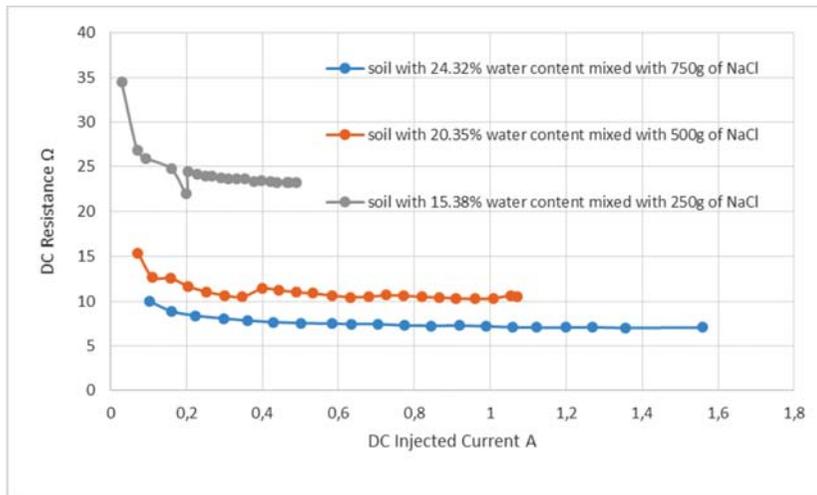
Secara garis besar terdapat 2 faktor yang menentukan besar impedansi suatu suatu sistem pembumian yaitu:

- a) Faktor internal yang berhubungan erat dengan sifat tanah (ϵ = permitivitas, σ = konduktivitas, μ = permeabilitas, kelembaban unsur kimia, komposisi mineral dan temperature) dan konfigurasi elektroda pembumianya itu sendiri yang berbentuk vertikal, horizontal dan grid, dari faktor internal ini dapat diuraikan lagi menjadi:
 1. Sifat tanah (ϵ, σ, μ , kimia, komposisi mineral, temperature)
 2. Konfigurasi elektroda (vertikal, horizontal, grid) termasuk panjang dan diameter elektroda serta luas tanah yang ditanami elektroda.

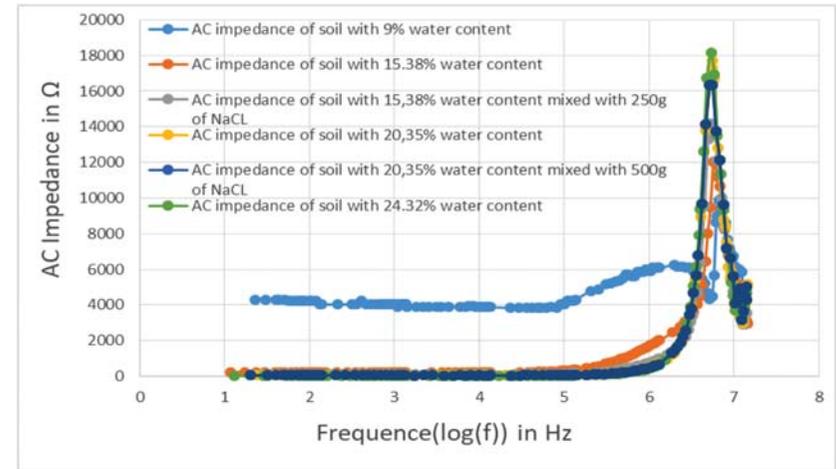
b) Faktor eksternal yang dihubungkan dengan penyebab gangguan yaitu arus yang diinjeksikan ke dalam sistem pembumian yang dapat berupa

1. Arus Searah
2. Arus bolak balik (AC= *Alternating Current*) baik untuk arus kecil maupun besar dan dari frekuensi rendah sampai tinggi berorde MHz.
3. Arus impuls

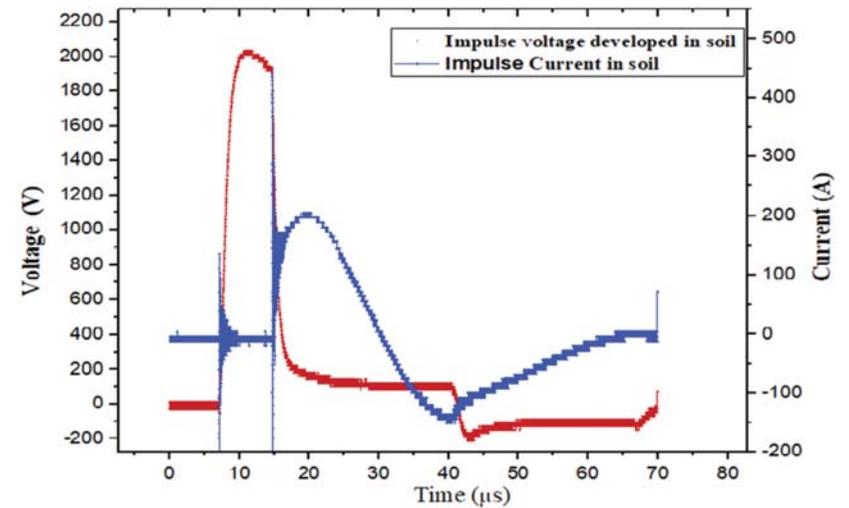
Beberapa hasil pengujian di laboratorium dengan beberapa macam arus terhadap suatu sistem pembumian didapat sbb:



Gambar 1.7 a. Pengujian dengan arus DC



Gambar 1.7 b Pengujian dengan arus AC frekuensi sampai orde MHz



Gambar 1.7.c. Pengujian arus Impuls untuk suatu kondisi tanah tertentu

Dalam sistem tenaga listrik sistem pembumian terbagi ke dalam dua kelas yaitu:

1. Sistem tenaga listrik tanpa pembumian

Sistem ini memiliki pengertian bahwa *titik netral dari transformator atau generator, logam berselubung & peralatan pendukung tidak terhubung ke tanah.*

2. Sistem tenaga listrik dengan pembumian

Sistem ini memiliki pengertian bahwa *titik netral dari transformator atau generator, logam berselubung & peralatan pendukung terhubung ke tanah.*

Pembumian netral dari sistem tenaga merupakan suatu keharusan pada saat ini, karena sistem sudah demikian besar dengan jangkauan yang luas dan tegangan yang tinggi. Pembumian netral sistem tenaga ini dilakukan pada pembangkit listrik dan transformator daya pada gardu-gardu induk dan gardu-gardu distribusi.

Metode-metode pembumian netral dari sistem-sistem tenaga adalah:

- a. Sistem pembumian langsung (tanpa pembumian)
- b. Sistem pembumian melalui resistansi
- c. Sistem pembumian melalui reaktansi
- d. Sistem pembumian melalui transformator pembumian
- e. Sistem pembumian melalui transformator distribusi.

1.2 Sistem Tenaga Listrik Tanpa Pembumian

Pada sistem tenaga listrik tanpa pembumian, netral dari generator

atau transformator daya tidak dibumikan, sehingga disebut *unearthed system*. Bisa diperhatikan sistem tenaga listrik tanpa pembumian, baik dalam operasi normal atau kondisi gangguan tanah.

Keuntungan: Menjaga kontinuitas pasokan daya ketika terjadi gangguan pada jaringan tegangan tinggi.

Kekurangan: Fasa tegangan netral menjadi sama dengan fasa ke fasa tegangan & membuat stress isolasi peralatan

- a. Gangguan satu fasa ke bumi tidak dapat dideteksi oleh relay proteksi arus lebih
- b. Jika gangguan ke bumi adalah jenis busur (misal konduktor aktif dengan bentuk padat tidak bersentuhan dengan bumi) maka sistem induktansi & kapasitansi akan *mencharge & discharge*.

1.3 Sistem Tenaga Listrik Dengan Pembumian

1.3.1 Sistem Pembumian Langsung

Pada sistem-sistem yang dibumikan tanpa impedansi, bila terjadi gangguan tanah selalu mengakibatkan terganggunya saluran (*line outage*), yaitu gangguan itu harus diisolir dengan membuka pemutus daya. Salah satu tujuan untuk membatasi tegangan dari fasa-fasa yang tidak terganggu bila terjadi gangguan.

Pada sistem tenaga listrik dengan pembumian langsung, netral dari generator atau transformator daya dibumikan langsung dengan konduktor, sehingga disebut *solidly earthed system*. Bisa diperhatikan

sistem tenaga listrik dengan pembumian langsung, baik dalam operasi normal atau kondisi gangguan tanah.

Keuntungan:

- a. Netral disambung secara efektif pada potensial pentanahan.
- b. Hubung singkat fasa ke tanah besarnya sama dengan hubung singkat fasa ke fasa; sehingga tidak perlu untuk rele sensitif khusus.
- c. Biaya divais pembatas arus dihilangkan.
- d. Gradasi isolasi terhadap titik netral N mengurangi ukuran dan biaya transformator.

Kekurangan:

- a. Karena sebagian besar hubung singkat sistem adalah fasa ke tanah, guncangan berat lebih besar dibandingkan dengan resistansi pentanahan.
- b. Harmonik ketiga cenderung bersirkulasi antar netral.

Jika tegangan seimbang, juga kapasitasi fasa ke tanah sama, maka arus-arus kapasitasi fasa tanah akan menjadi sama dan saling berbeda fasa 120° satu sama lainnya. Titik netral dari impedansi adalah pada potensial tanah dan tidak ada arus yang mengalir antara netral impedansi terhadap netral trafo tenaga.

1.3.2 Sistem Pembumian melalui Resistansi

Maksud pembumian ini adalah untuk membatasi arus gangguan ke

tanah antara 10% sampai 25% dari arus gangguan 3 fasa. Batas yang paling bawah adalah batas minimum untuk dapat bekerjanya rele gangguan tanah, sedangkan batas atas adalah untuk membatasi banyaknya panas yang hilang pada waktu terjadinya gangguan.

Pada sistem tenaga listrik dengan pembumian melalui resistansi, netral dari generator atau transformator daya dibumikan melalui resistansi, sehingga disebut *resistance earthed system*. Bisa diperhatikan sistem tenaga listrik dengan pembumian melalui resistansi, baik dalam operasi normal atau kondisi gangguan tanah.

Keuntungan:

- a. Metode ini bisa menggunakan arus berdasarkan relay sehingga diskriminasi dapat dicapai, diskriminasi yang dicapai digunakan untuk pengaturan waktu yang pasti.
- b. Bahaya percikan berkurang karena arus gangguan yang lebih rendah
- c. Mengurangi panas konduktor saat *bracing & clamping* karena arus gangguan lebih rendah.

Kekurangan:

- a. Pemutus & selektor dipilih berdasarkan arus gangguan tertinggi, dalam hal ini arus gangguan tiga fasa & karena itu, tidak ada penghematan biaya dibandingkan dengan sistem pembumian langsung.
- b. Titik netral bumi tidak menjadi potensial selama gangguan bumi

& akibatnya akan meningkatkan biaya isolasi generator, potensial transformator, dll. Sistem ini akan mengakibatkan tegangan lebih (tegangan fasa ke tanah bisa sama dengan tegangan fasa ke fasa) & akan membutuhkan rating sambaran petir lebih tinggi (dibandingkan dengan sistem pembumian & kadang-kadang sistem pembumian dengan reaktansi.

1.3.3 Sistem Pembumian melalui Reaktansi

Pembumian melalui reaktansi digunakan bilamana trafo daya tidak cukup membatasi arus gangguan tanah. Reaktansi ini digunakan untuk memenuhi persyaratan dari sistem yang dibumikan dengan reaktansi dimana besar arus gangguan di atas 25% dari arus gangguan 3 fasa.

Pada sistem tenaga listrik dengan pembumian melalui reaktansi, netral dari generator atau transformator daya dibumikan melalui reaktansi, sehingga disebut *reactance earthed system*. Bisa diperhatikan sistem tenaga listrik dengan pembumian melalui reaktansi, dalam kondisi gangguan tanah.

Keuntungan:

- a. Menghilangkan arus gangguan yang bersifat kapasitif
- b. Mengeleminasi fenomena busur listrik ke tanah

Kekurangan:

- a. Tidak cocok digunakan dalam jaringan tegangan rendah

1.3.4 Sistem Pembumian melalui Transformator

Sistem pembumian transformator digunakan ketika suatu sistem tenaga listrik tidak tersedia titik netralnya atau dalam beberapa kondisi, diantaranya:

- a. Transformator sekunder (terhubung ke pasokan pelanggan) terhubung delta.
- b. Transformator generator penaik tegangan terhubung delta ke sistem distribusi.

Pembumian transformator sama dengan tipe transformator tembaga berkaki tiga di mana masing-masing inti memiliki dua gulungan identik. Gulungan saling berhubungan & titik star ditanahkan dan karena ini disebut tipe transformator hubungan bintang. Distribusi arus gangguan yang melalui pembumian transformator, ketika terjadi arus gangguan pada salah satu fasanya, maka arus gangguan dari sumbernya akan terdistribusi ke fasa yang lain melalui tanah. Besarnya arus yang terdistribusi adalah $I_F/\sqrt{3}$ sedangkan arus gangguan yang terjadi pada fasa yang terganggu akan menjadi $2 \times I_F/\sqrt{3}$.

Ini adalah sistem pembumian resistansi & digunakan untuk unit generator terhubung ke transformator penaik tegangan dengan gulungan delta. Ukuran resistor yang dibutuhkan lebih rendah daripada pembumian resistansi tinggi tetapi dalam pandangan biaya transformator lebih tinggi sehingga penghematan tidak mungkin tercapai. Transformator memiliki nilai arus yang sama dengan arus kapasitif.

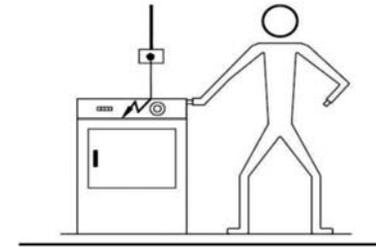
Pada gambar 1.8 diperlihatkan distribusi arus gangguan yang melalui pembumian transformator. Ketika terjadi arus gangguan pada salah satu fasanya, maka arus gangguan dari sumbernya akan terdistribusi ke fasa yang lain melalui tanah. Besarnya arus yang terdistribusi adalah $I_f/\sqrt{3}$ sedangkan arus gangguan yang terjadi pada fasa yang terganggu akan menjadi $2 \times I_f/\sqrt{3}$. Sistem ini digunakan untuk unit pembangkit (generator langsung terhubung ketransformator tanpa pemutus tenaga) pembumian & memiliki jenis sistem reaktansi tinggi. Tegangan sesaat yang bernilai tinggi terjadi ketika perpindahan masuknya pemutus tenaga generator atau terjadinya gangguan tanah. Relay terhubung dengan sisi sekunder potensial transformator dan digunakan sebagai alarm. Nilai resistansi sama dengan $X_{C0}/3$ dimana X_{C0} adalah impedansi kapasitif urutan nol dari lilitan generator.

2. KESELAMATAN LISTRIK

Keselamatan listrik sangat ditentukan oleh perilaku individu terhadap keberadaan benda-benda yang bertegangan disekitarnya. Mencegah kontak langsung terhadap peralatan listrik adalah sesuatu yang mungkin dilakukan, yaitu bersentuhan langsung terhadap bagian-bagian peralatan bertegangan.

Selain kontak langsung, orang juga bisa terkena risiko kontak tidak langsung, yaitu, kontak dengan bagian konduktif terbuka (*Exposed conductive part*) ECPs. ECPs adalah bagian peralatan listrik yang

bersifat konduktif tapi tidak bertegangan dalam kondisi operasi normal, dapat bertegangan bila terjadi kegagalan isolasi.



Gambar 2.1 Kontak tidak langsung

Kontak tidak langsung lebih berbahaya dari kontak langsung, karena dapat terjadi bahkan selama penggunaan normal terhadap peralatan listrik. Keselamatan dilakukan dengan sistematis menerapkan langkah-langkah perlindungan terhadap resiko kedua jenis kontak, yang mungkin terjadi selama interaksi antara manusia dan peralatan listrik. Perlindungan terhadap resiko kontak langsung, juga disebut *basic protection*, dengan cara pemisahan yang efektif dari manusia dengan bagian yang bertegangan, sedangkan terhadap resiko perlindungan kontak tidak langsung, juga disebut sebagai *fault protection*, dilakukan dengan cara memutus secara otomatis pasokan listrik. Dalam beberapa keadaan, *fault protection*, juga dapat dilakukan tanpa pasokan pemutusan.

Penting untuk dicatat bahwa semua sistem listrik harus dirawat dengan baik, sehingga dapat mencegah dari bahaya kontak listrik.

2.1 Proteksi terhadap kontak langsung

Telah diketahui bahwa semua peralatan listrik harus memiliki ketentuan untuk menjamin perlindungan terhadap kontak langsung. Berikut ini, beberapa strategi dasarnya.

2.1.1 Isolasi bagian yang bertegangan

Untuk mengoperasikan peralatan listrik bagian-bagian yang mempunyai perbedaan potensial, harus benar terisolasi dari satu sama lain dari *enclosure* terhadap *functional insulation*.

Basic Insulation mencegah manusia dari kontak dengan bagian yang bertegangan dan merupakan dasar dari proteksi kontak langsung. Agar proteksi efektif bahan isolasi harus benar-benar menutupi bagian yang bertegangan

Basic insulation harus dapat menahan kemungkinan stress selama peralatan berfungsi. Medan listrik, benturan mekanis, temperature tinggi, penuaan material isolasi yang dapat mengakibatkan kegagalan basic insulation. Basic insulation mempunyai kekuatan mekanis yang cukup dan untuk menahan stress yang disebabkan oleh operasi normal peralatan. *Insulating paints* (contoh isolasi antar belitan trafo dan motor) dan produk yang sama tidak dapat dianggap cocok untuk *basic insulation*.

2.1.2 Selungkup (*Enclosures*) dan Penghalang (*Barriers*)

Enclosures (Selungkup) dan *Barriers* (Penghalang) diciptakan untuk mencegah orang dari kesengajaan, atau tidak sengaja, menyentuh bagian

yang bertegangan dengan tanpa bantuan alat. *Enclosures* memproteksi terhadap kontak langsung pada peralatan dengan memberi selungkup. Bagian bertegangan berada dalam konstruksi proteksi, *Barriers* memberikan tingkatan proteksi terhadap kontak langsung tetapi hanya terbatas untuk menghalangi peralatan. Keselamatan dapat dicapai jika bagian bertegangan disimpan dibelakang barrier tapi tetap dalam enclosure.



Gambar 2.2 Enclosure (Selungkup) dan Barrier (Penghalang)

Barriers dapat digunakan peralatan yang *outdoor* karena tingginya, akses dari atas secara alami menghalangi untuk orang. Karena itu dianggap tidak perlu untuk keselamatan menggunakan *Enclosure* tidak diperlukan.

Penghapusan *barriers* atau pembukaan *Enclosure* harus mungkin hanya dengan kunci atau alat sehingga dapat mencegah kecelakaan dan merupakan perlindungan mendasar terhadap kontak langsung.

Minimal isolasi untuk *Enclosure* dan *barriers* adalah bagian bertegangan agar tidak dapat diakses oleh jari manusia. Sehingga membutuhkan batasan ukuran pada peralatan.

IEC Kode proteksi internasional telah distandardisasi terdiri dari huruf IP diikuti dengan dua angka karakteristik, yang menggambarkan tingkat perlindungan untuk berbagai *Enclosure* dan *barrier*. Kode pertama yaitu berupa angka (0 - 6) yang berarti tingkat proteksi terhadap akses jari manusia / belakang tangan punggung tangan ke bagian berbahaya serta terhadap masuknya padat benda asing. Kode angka kedua (0 - 8) yang berarti tingkat proteksi terhadap masuknya air melalui *Enclosure* dan *barrier*. Opsional huruf (A ke D) mempunyai arti seperti angka pertama, tingkat proteksi terhadap kontak langsung. Penjelasan singkat dari karakteristik angka dan opsional huruf seperti pada table 2.1 dibawah ini.

Tabel 2.1 Kode IP

1st Numeral	Protection of Equipment Against Solid Particles	Against Person's Access With
0	Nonprotected	Nonprotected
1	> 50 mm diam.	Back of hand
2	> 12.5 mm diam.	Finger
3	> 2.5 mm diam.	Tool
4	> 1 mm diam.	Wire
5	Dust	Wire
6	Dust proof	Wire

2nd Numeral	Protection of Equipment Against Ingress of Water
0	Nonprotected
1	Vertical dripping
2	Dripping (15° tilted)
3	Rain (spraying water at an angle up to 60° on either side of the vertical)
4	Splashes from any direction
5	Jets from any direction
6	Powerful jets from any direction (flow rate > 12.5 dm ³ /min)
7	Temporary immersion
8	Continuous immersion

Optional Letter	Protection Against Person's Access With
A	Back of hand
B	Finger
C	Tool
D	Wire

2.1.3 Perlindungan dengan rintangan

Rintangan adalah benda yang ditempatkan diantara bagian aktif bertegangan dan manusia (Misalnya, pagar, pegangan, mesh, layar, dll). Dengan tujuan mencegah kontak langsung dengan memberi jarak dari bagian yang bertegangan sehingga tidak dapat diakses oleh manusia. Oleh karena itu, memastikan keselamatan terhadap listrik dengan menjaga agak bagian yang bertegangan di luar jangkauan. Tidak seperti *enclosures* atau *barriers*, rintangan bisa sengaja dielakkan. Oleh karena itu, rintangan hanya batasan tingkat proteksi dan itupun juga hanya untuk sentuhan tidak disengaja. Perlindung ini, hanya untuk wilayah yang dapat diakses oleh tenaga terampil di bidang listrik.

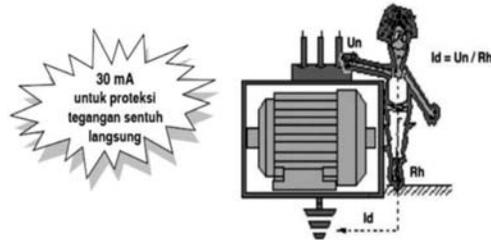
Pada PUIL 2000 (SNI 04-0225-2000) atau IEC 60364 Rintangan dimaksudkan untuk mencegah sentuh tidak sengaja dengan bagian aktif, tetapi tidak mencegah sentuh disengaja dengan cara menghindari rintangan secara sengaja. Rintangan harus dapat mencegah

1. mendekatnya badan dengan tidak sengaja ke bagian aktif
2. sentuh tidak sengaja dengan bagian aktif selama operasi dari perlengkapan aktif dalam pelayanan normal

2.1.4 Proteksi tambahan dengan *Residual Current Devices*

Residual current devices (RCDs) juga dapat disebut sebagai *residual current operated circuit-breakers* (RCCBs) atau *ground-fault circuit interrupters* (GFCIs). RCD dengan arus I_{dn} beroperasi tidak melebihi 30 mA merupakan perlindungan tambahan apabila terjadi kontak langsung. RCDs biasanya

digunakan untuk peralatan rumah tangga dan sejenisnya, orang yang tidak berpengalaman pun mengoperasikannya dengan mudah.



Gambar 2.5 Peralatan yang mengalami gangguan isolasi

2.2 Pengaruh Arus Listrik Melalui Tubuh Manusia

Tanah merupakan material yang memiliki sifat konduktif dan bisa menjadi jalur balik arus ground serta tanah mempunyai potensial sama dengan NOL dan dapat menampung semua muatan positif maupun negatif. Sehingga bila suatu benda konduktif yang bertegangan baik positif maupun negatif bila dibumikan maka akan berpotensi sama dengan NOL dan semua muatan positif/negatif masuk ke tanah, itulah *Sunatulloh* yang memberi manfaat terhadap kehidupan manusia. Jika manusia bersentuhan dengan objek yang bertegangan dan berdiri di tanah maka akan mengakibatkan adanya arus yang mengalir pada tubuh manusia. Efek dari adanya arus pada tubuh manusia, dapat berakibat adanya sengatan listrik.

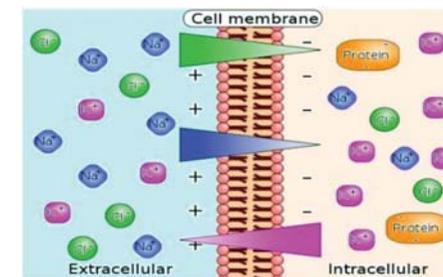
Suatu peralatan yang mengalami kegagalan isolasi berakibat pada adanya tegangan pada body peralatan tersebut. Pada keadaan normal,

body peralatan tidak bertegangan dan aman bagi manusia jika menyentuhnya. Namun dengan adanya tegangan yang tidak seharusnya, manusia yang menyentuh bagian bertegangan akan teraliri arus melewati tubuhnya.

2.3 Sistem kelistrikan tubuh manusia

Sistem kelistrikan pada tubuh manusia terdapat mulai dari bagian terkecil penyusun tubuh manusia yaitu sel. Sistem tersebut terdiri dari muatan positif dan negative yang dibawa oleh ion. Otot jantung merupakan bukti adanya sifat listrik pada tubuh manusia.

Tubuh manusia terdiri dari sel-sel yang membentuk banyak jaringan dan dilingkupi oleh cairan yang sama. Sel itu sendiri dikelilingi oleh membran yang kemudian memisahkan sel bagian dalam dan sel bagian luar. Baik bagian dalam maupun bagian luar sel masing-masing memiliki muatan ion yang berbeda. Ion tersebut bermuatan positif dan juga negative sehingga menghasilkan sifat listrik. Sel pada tubuh manusia dapat diilustrasikan pada gambar 2.6.



Gambar 2.6 Sel pada tubuh manusia

Gambar 2.6 menunjukkan membran memisahkan sel bagian luar dan bagian dalam. Sel bagian dalam memiliki potensial negatif dikarenakan ion negatif lebih banyak daripada ion positif. Begitu juga sebaliknya, bagian luar sel memiliki potensial positif karena ion positif lebih banyak dari ion negatif. Pada kenyataannya masing-masing ion dari sel dalam maupun luar saling berinteraksi (berdifusi).

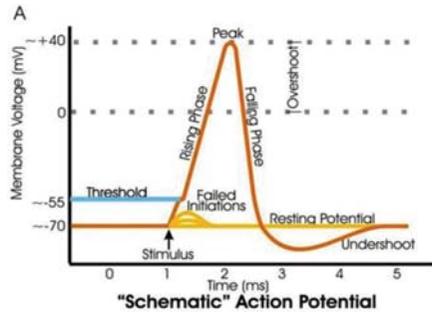
Saat keadaan stabil struktur kelistrikan sel pada tubuh manusia ini dapat dianggap sebagai sebuah kapasitor. Membran yang memisahkan sel bagian luar dan sel bagian dalam berperan sebagai dielektrik dan kedua bagian sel tersebut dianggap sebagai elektroda.

Action Potential

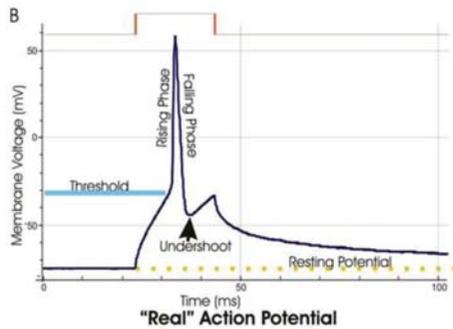
Sel yang mudah terkena rangsangan memiliki sifat permeabilitas membran yang mudah meningkat. Hal ini berarti membran menjadi mudah ditembus oleh ion baik dari dalam maupun dari luar. Action potential itu sendiri adalah proses perubahan potensial yang terjadi pada sel saat terkena rangsangan. Proses terjadinya action potensial terbagi menjadi beberapa langkah yaitu depolarizing stimulus, repolarizing stimulus dan hyperpolarizing stimulus. Ketiga langkah tersebut ditunjukkan pada gambar 2.7.

Ketika ada rangsangan, tegangan membran mulai meningkat. Gambar 2.7 terlihat adanya batas threshold. Batas threshold ini adalah batas tegangan membran yang menunjukkan apakah rangsangan tersebut bisa menimbulkan action potential atau tidak. Jika rangsangan tersebut

tidak bisa menaikkan resting potensial hingga melebihi threshold, maka efek yang ditimbulkan tidak terlalu signifikan. Jika suatu rangsangan bisa mengubah resting potential melebihi threshold maka terjadi depolarizing stimulus. Depolarizing stimulus adalah proses ion positif dari sel bagian luar berdifusi melalui membran menuju sel bagian dalam. Dalam hal ini ion tersebut adalah Na^+ yang perlahan jumlahnya melebihi ion negatif. Proses naiknya tegangan setelah melewati threshold sangat cepat. Tegangan awal (resting potential) sebesar -70mV perlahan naik hingga mencapai puncak sekitar $+40\text{mV}$. Setelah mencapai puncak, tegangan membran kembali turun menjadi negatif. Proses ini disebut repolarizing stimulus. Repolarizing stimulus itu sendiri merupakan proses berdifusinya ion K^- dari sel bagian dalam ke sel bagian luar. Difusi ini terjadi melalui membran. Tegangan membran kembali pada titik setimbangnya yaitu sesuai resting potential awal. Ketika sudah mencapai resting potential kembali maka efek rangsangan dapat dikatakan sudah selesai. Hal tersebut merupakan skema secara teori. Pada kenyataannya proses action potential sedikit memiliki perbedaan seperti dapat terlihat pada gambar 2.8. Pada gambar 2.8 terdapat satu spike atau impulse pada bagian falling phase atau saat repolarizing stimulus. Keadaan ini menunjukkan ketika ion negatif berdifusi ke bagian luar sel, jumlah ion tersebut meningkat dengan sangat cepat sehingga tegangan yang harusnya turun menjadi naik sesaat. Setelah melalui proses hyperpolarizing, sel kembali ke keadaan awal dengan potensial sekitar -70mV (resting potential). Action potential ini terjadi selama 2ms .



Gambar 2.7 Proses terjadinya action potensial



Gambar 2.8 Kondisi riil terjadinya action potensial

Arus memiliki beberapa parameter yang mempengaruhi respon tubuh manusia yaitu frekuensi, besar, durasi dan jalur arus.

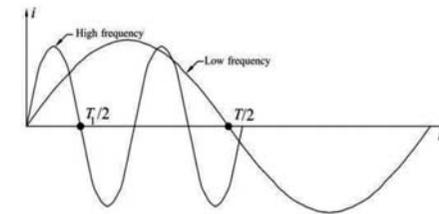
Secara umum terdapat dua jenis level arus terhadap respon tubuh diantaranya yaitu:

- Arus threshold: arus minimum yang menyebabkan kontraksi otot di dalam tubuh. Besar arus ini sekitar 0,5 mA.

- Arus let-go: merupakan arus maksimum yang masih memungkinkan adanya reflek tubuh untuk melepas kontak bagian bertegangan. Besar arus ini sekitar 10 mA.

2.4 Frekuensi, Besar dan Jalur arus

Frekuensi arus yang mengalir pada tubuh mempengaruhi respon tubuh terhadap arus tersebut. Respon tubuh terhadap arus dengan frekuensi rendah berbeda jika dibandingkan dengan arus berfrekuensi tinggi.



Gambar 2.9 Arus frekuensi rendah dan tinggi

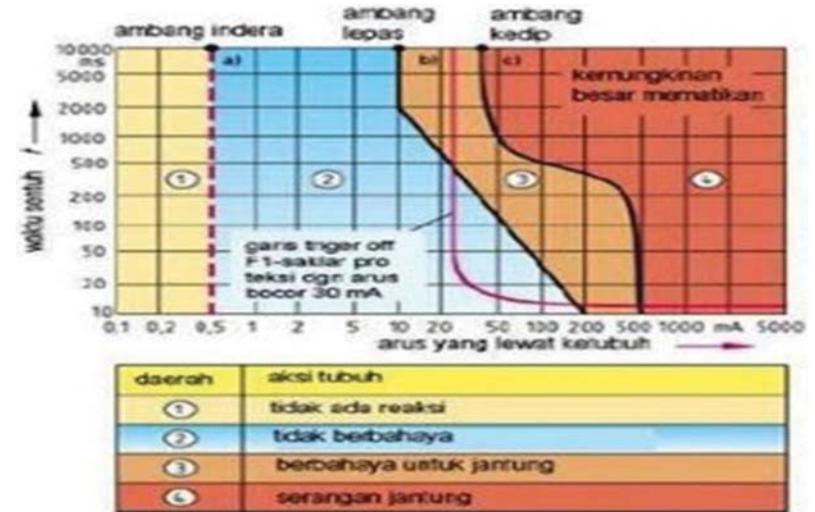
Arus dengan frekuensi tinggi tidak lebih berbahaya jika dibandingkan dengan arus frekuensi rendah untuk besar arus yang sama. Hal ini dikarenakan, arus dengan frekuensi tinggi memiliki periode yang lebih singkat dibandingkan dengan arus dengan frekuensi rendah. Dengan periode yang singkat, arus dengan besar tertentu bisa ditahan oleh tubuh. Sebaliknya dengan besar arus yang sama namun frekuensi lebih rendah, tubuh harus menahan arus tersebut dalam periode yang lebih lama. Dalam rentang periode tersebut, arus dengan periode yang lama dapat

merusak jaringan bahkan organ di dalam tubuh itu tersebut. Fakta inilah yang kemudian memunculkan pendapat bahwasanya arus DC lebih berbahaya dibandingkan dengan arus AC (frekuensi nol).

Tubuh memiliki respon yang berbeda terhadap besar arus yang diterimanya. Dalam tabel 2.2 disebutkan pengaruh besar arus terhadap respon tubuh itu sendiri.

Tabel 2.2 Respon tubuh terhadap besar arus

EFEK SENGATAN LISTRIK	
Besar arus yang melewati tubuh	Akibat yang timbul
1 mA, atau kurang	Tidak ada akibat, tidak terasa
1 – 8 mA	Sengatan terasa tetapi tidak sakit dan tidak mengganggu kesadaran
8 – 15 mA	Sengatan terasa sakit, tetapi masih bisa melepaskan diri, kesadaran tidak hilang
15 – 20 mA	Sengatan sakit kesadaran bisa hilang dan tidak bisa melepaskan diri
20 – 50 mA	Kesakitan, susah bernafas, terjadi kontraksi pada otot & kesadaran hilang
100 – 200 mA	Kondisi mematikan langsung dan susah ditolong
200 mA atau lebih	Terbakar dan jantung berhenti berdetak



Gambar 2.10 Grafik bahaya arus listrik

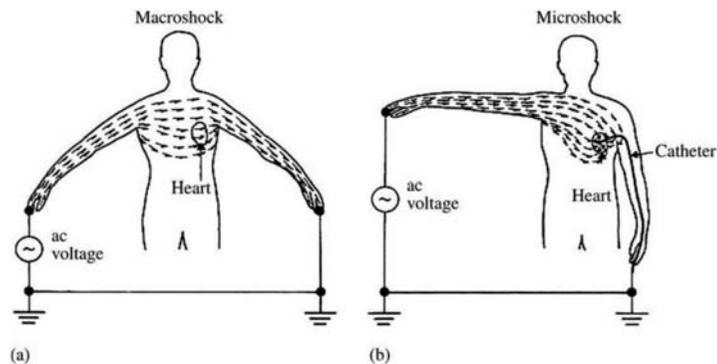
Jalur arus merupakan parameter yang juga penting terhadap respon tubuh jika dialiri arus. Tubuh tidak bisa mengendalikan atau mengatur jalur arus yang melewatinya. Jika arus mengalir melalui organ-organ vital tubuh, meskipun magnitudenya tidak begitu besar, arus tersebut tetap dapat berakibat fatal. Jalur arus dalam tubuh terbagi menjadi dua:

Macroshock: Jalur arus yang melewati jantung tersebar sehingga rapat arus yang dirasakan jantung kecil.

Microshock: Jalur arus yang melewati jantung terpusat sehingga rapat arus yang dirasakan jantung sangat besar.

Dari dua jenis jalur arus yang melewati tubuh, dapat dikatakan microshock jauh lebih berbahaya dibandingkan dengan macroshock. Hal

ini terlihat dari arus yang melewati jantung. Perbedaan kedua jalur arus tersebut ditunjukkan pada gambar 2.11.



Gambar 2.11 Microshock dan macroshock

2.5 Ventricular Fibrillation

Pada dasarnya, otot jantung merupakan otot yang bekerja secara tidak sadar dan berfungsi untuk memompa darah kemudian disalurkan ke seluruh tubuh bersama oksigen. Selain memiliki kemampuan untuk berkontraksi, otot jantung ini juga memiliki kemampuan untuk menghantarkan listrik. Pada atrium kanan jantung terdapat Sinoatrial Node (SA) yang berfungsi untuk membangkitkan impuls dan mengendalikan kontraksi otot jantung. Impuls tersebut kemudian sampai ke Atrioventricular Node (AV) melalui otot jantung. Berbeda dengan SA, AV diselubungi oleh jaringan yang tidak konduktif. Meskipun begitu, AV tetap bisa mengalirkan impuls ke ventrikel hingga jantung bisa

berkontraksi untuk memompa darah. Proses normal memompa darah yang dilakukan jantung diakhiri dengan jantung berelaksasi dan kemudian darah kembali mengisi jantung.

2.6 Thermal Shock

Tubuh manusia pada dasarnya memiliki nilai resistansi tertentu. Jika ada arus yang mengalir pada jaringan tubuh manusia dalam rentang waktu tertentu akan menimbulkan panas pada jaringan tersebut sesuai dengan hukum joule. Arus yang mengalir melalui resistansi tertentu dengan rentang waktu akan menimbulkan panas bahkan hingga terbakar.

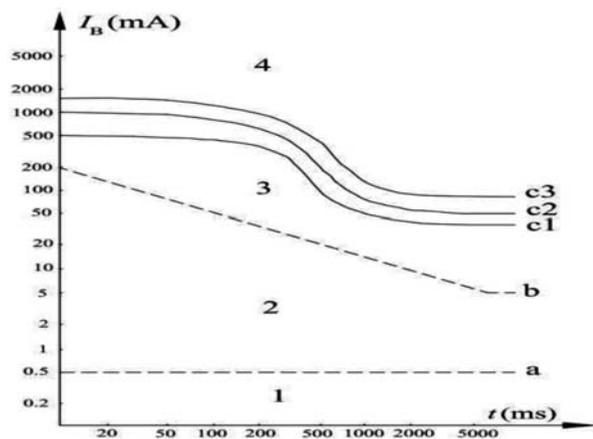
Dari persamaan di atas dapat dikatakan bahwa perubahan temperature pada jaringan tubuh berbanding lurus dengan kuadrat rapat arus dan lamanya arus mengalir pada jaringan tersebut. Dengan area kontak (S) yang besar maka rapat arus (J) akan mengecil dan jaringan dapat dikatakan akan baik-baik saja tanpa kerusakan. Jika S sangat kecil maka rapat arus pada suatu jaringan akan sangat besar hingga dapat menyebabkan terjadinya luka bakar pada kulit seperti pada gambar 2.13.



Gambar 2.13 Luka bakar akibat arus

2.7 Efek arus pada tubuh manusia

Saat terjadi kontak antara manusia dengan bagian bertegangan, arus akan mengalir pada tubuh manusia dan membuat suatu jalur atau loop tertutup. Jalur tertutup ini misalnya dari tangan kiri dan melewati kedua kaki. Arus yang mengalir pada tubuh manusia itu mengakibatkan efek yang berbeda-beda pada tubuh. Secara umum, hasil pengujian efek arus pada tubuh manusia dibagi menjadi 4 bagian terhadap lama waktu terpaparnya arus. Arus yang ditekankan disini adalah arus AC dengan frekuensi (15-100 Hz)



Gambar 2.14 Arus AC terhadap waktu

Dari gambar 2.14 dapat dijelaskan beberapa zona seperti berikut:

- Zona 1 dengan rentang arus 0-0.5 mA (kurva a), adanya arus mungkin akan terasa pada tubuh manusia namun tidak sampai menimbulkan

efek apa-apa.

- Zona 2 dengan rentang arus dari 0.5 mA- hingga kurva b, adanya arus mengakibatkan munculnya kontraksi otot namun tidak menimbulkan efek yang berbahaya.
- Zona 3 dimulai dari kurva b. Adanya arus menimbulkan efek fisiologis dan kontraksi otot yang cukup kuat. Efek tersebut lama kelamaan akan menimbulkan sesak nafas, fibrilasi atrial bahkan serangan jantung.
- Zona 4 dengan batas bawah dari c1, adanya arus akan menimbulkan fibrilasi ventrikel dan kemungkinan terjadinya fibrilasi ventrikel akan meningkat seiring membesarnya arus dan durasi mengalirnya arus tersebut. Kurva c1-c2 menunjukkan area dimana kemungkinan 5% terjadinya fibrilasi ventrikel, sedangkan area yang diantara kurva c2 dan c3 menunjukkan kemungkinan terjadinya fibrilasi ventrikel meningkat hingga 50%. Di atas kurva c3 kemungkinannya menjadi lebih dari 50%.

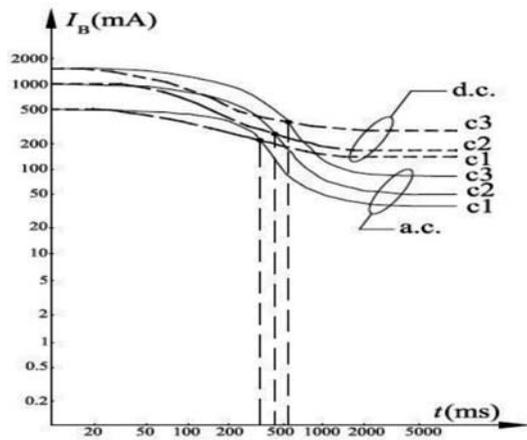
Standar IEC dan IEEE memiliki perbedaan metodologi mengenai arus yang masih dapat ditahan oleh tubuh manusia.

2.8 Perbandingan efek yang ditimbulkan arus AC dan DC

Baik arus DC maupun arus AC, keduanya akan menimbulkan efek bagi tubuh manusia yang terpapar arus tersebut. Efek dari arus AC dan DC ini dapat dibandingkan agar bisa diketahui dan sebagai pertimbangan

proteksi bagi manusia itu sendiri. Perbandingan kedua arus ini dapat dilihat pada gambar 2.15.

Dari gambar 2.17 dapat dilihat bahwa pada titik tertentu misalnya di kurva c3, nilai batas arus DC lebih rendah dibandingkan dengan arus AC. Hal ini menunjukkan bahwa kemungkinan tubuh mengalami fibrilasi ventrikel lebih besar terjadi pada arus DC dibandingkan dengan arus AC. Pada kasus ini arus DC lebih berbahaya dibandingkan dengan arus AC.



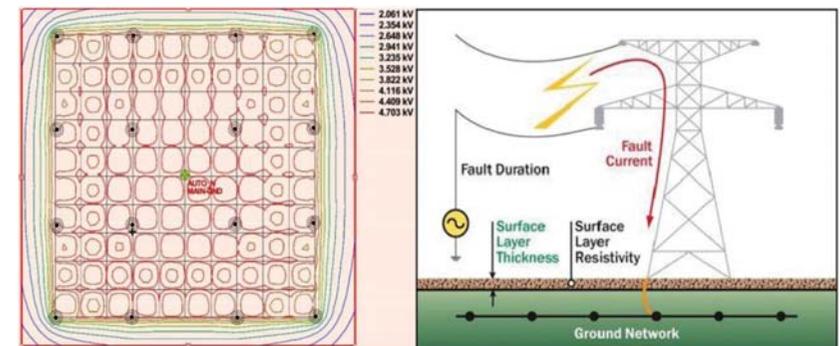
Gambar 2.15 Perbandingan efek arus AC dan DC

3. KENAIKKAN POTENSIAL TANAH

Fungsi pembumian pada perangkat-perangkat Listrik misalnya di Gardu Induk (*switchyard*) adalah untuk menyediakan hubungan sistem pembumian ke body peralatan atau netral system atau traformator untuk menyediakan jalan arus gangguan maksimum ke tanah. Sistem

pembumian menjamin agar tidak terjadi gangguan mekanis atau termal yang dapat terjadi pada peralatan di gardu induk, sekaligus menghasilkan keselamatan personel saat bekerja maupun melakukan perawatan. Sistem pembumian juga berfungsi menjamin bonding ekipotensial agar tidak terjadi gradien potensial yang berbahaya.

Gradien tegangan merupakan suatu akibat dari sebuah fenomena yang disebut Kenaikkan Potensial Tanah (*Earth Potential Rise / EPR*). EPR adalah fenomena yang terjadi ketika suatu arus dalam jumlah besar mengalir ke tanah sehingga permukaan tanah akan naik potensialnya yang tidak sama dengan NOL. Hal ini biasanya disebabkan ketika terjadi kegagalan pada gardu induk atau ketika terjadi sambaran petir. Sementara berdasarkan IEEE 367, EPR adalah produk hasil impedansi elektroda pentanahan dan arus yang mengalir melalui impedansi elektroda tersebut.



Gambar 3.1 a) Bidang Ekipotensial akibat ERP; b) Mekanisme terjadi ERP

Besar potensial elektrik pada bumi akan turun di sekitar sistem pembumian meski tidak sampai bernilai nol di tempat yang jauh dari titik terjadinya arus ke tanah tersebut. Secara fakta, pada suatu tanah homogen, potensial tanah berbanding terbalik dengan jarak dari pusat pembumian.

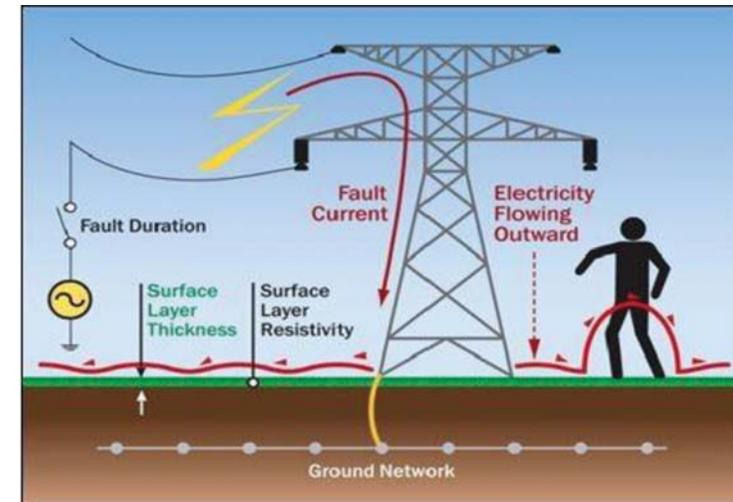
Tegangan yang dihasilkan EPR dapat membahayakan baik personel maupun peralatan. Kita tahu bahwa tanah memiliki resistivitas tanah, yang bisa menjadi tahanan / impedansi sistem pembumiannya. Adanya perbedaan potensial mengakibatkan arus mengalir ke atau pada bodi peralatan yang bersifat konduktif yang ditanahkan, termasuk pipa, kabel tembaga, atau bahkan manusia bila manusia memegang body tersebut.

Terdapat beberapa bahaya yang diakibatkan EPR, yaitu:

3.1 Tegangan Langkah, Sentuh dan Transfer

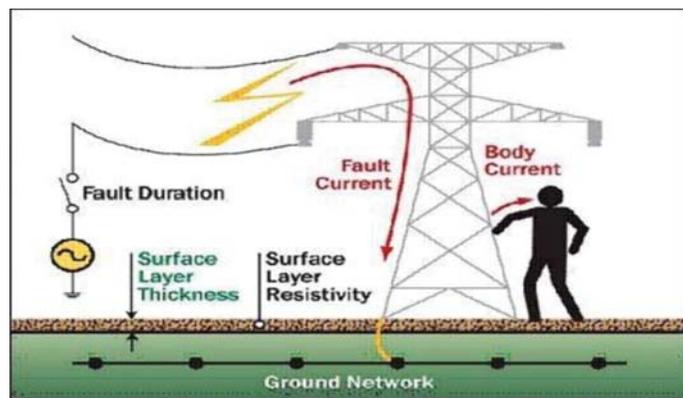
Tegangan langkah adalah tegangan yang muncul di antara kaki seseorang yang berdiri dekat suatu benda bertegangan yang diketanahkan. Hal ini sama dengan perbedaan tegangan antara dua titik pada jarak yang berbeda dari elektroda. Pada saat terjadi suatu gangguan pada gardu induk, arus akan mengalir menuju bumi. Akibat adanya distribusi resistivitas tanah, distribusi tegangan yang sesuai pun juga akan terjadi. Jatuh tegangan pada tanah di sekitar sistem pentanahan akan mengakibatkan bahaya bagi orang - orang yang berdiri di sekitarnya. Pada kasus tegangan langkah, arus akan mengalir apabila terdapat perbedaan potensial antara dua kaki. Semakin besar arus yang mengalir ke tanah,

akan semakin besar bahaya yang ditimbulkan. Resistivitas tanah juga berperan pada bahaya yang mungkin terjadi. Semakin tinggi resistivitas tanah mengakibatkan semakin tinggi pula tegangan langkah yang dihasilkan. Resistivitas tanah yang tinggi pada lapisan paling atas dan resistivitas tanah yang rendah pada lapisan bawah cenderung menghasilkan tegangan langkah paling tinggi dekat dengan elektroda pentanahan, dimana resistivitas tanah yang rendah pada lapisan bawah akan menarik arus lebih banyak dari elektroda melalui lapisan dengan resistivitas tinggi, dan akhirnya menghasilkan jatuh tegangan yang besar dekat elektroda. Ketika tanah memiliki lapisan atas yang konduktif dan lapisan bawah yang resistif, arus gangguan akan tetap mengalir pada lapisan atas untuk jarak yang lebih jauh dari elektroda.



Gambar 3.2 Tegangan Langkah (esggroundingsolution.com, 2015)

Tegangan sentuh adalah tegangan antara objek bertegangan dengan kaki seseorang yang bersentuhan dengan objek tersebut. Hal ini sama dengan perbedaan tegangan antara objek dan suatu titik yang berjarak x jauhnya. Ketika arus gangguan terjadi, arus akan mengalir melalui suatu objek metal dan memasuki tanah. Sebagai contoh, apabila ada seseorang menyentuh *tower* tegangan tinggi ketika terjadi arus gangguan, maka arus akan mengalir turun dari *tower* menuju tangan orang tersebut dan mengalir selanjutnya ke organ vital lainnya. Arus kemudian akan terus mengalir melalui jalurnya dan ke luar melalui kaki untuk selanjutnya ke dalam tanah.



Gambar 3.3 Tegangan Sentuh (*esgroundingsolution.com*, 2015)

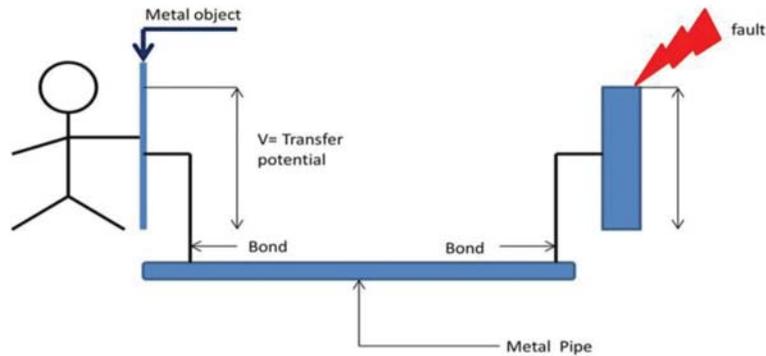
Dengan beberapa asumsi dan perhitungan, diketahui batas tegangan sentuh yang dapat terjadi seperti dalam Tabel 3.1 berikut.

Tabel 3.1 Batas Waktu Pemutusan Pelindung Berdasar Tegangan Sentuh

Prospective touch voltage (V)	Maximum disconnecting time of the protective device(s)	
	alternating current	direct current
< 50	5	5
50	5	5
75	0.60	5
90	0.45	5
120	0.34	5
150	0.27	1
220	0.17	0.40
280	0.12	0.30
350	0.08	0.20
500	0.04	0.10

Terdapat beberapa faktor yang berkontribusi untuk meningkatkan bahaya dari ketiga macam tegangan di atas. Seperti yang sudah dijelaskan sebelumnya, semakin tinggi resistivitas tanah pada tanah tertentu akan mengakibatkan kejutan listrik yang signifikan meskipun arus yang mengalir cukup kecil. Hasil pengukuran in Wyoming menemukan apabila nilai resistansi 500 ohms atau lebih tinggi, hanya membutuhkan arus sebesar satu Amper untuk menghasilkan tegangan 500V. Kondisi lainnya yang dapat mengakibatkan tegangan tinggi pada suatu gardu induk adalah akibat arus sirkulasi pada lebih dari satu titik sistem pentanahan. Hal ini akan mengakibatkan arus terinduksi bersirkulasi melalui pipa atau benda konduktif pada setiap titik sepanjang saluran. Peristiwa inilah yang disebut *transfer potential*. Jenis tegangan ini sangat berbahaya karena seseorang yang berada jauh dari sumber arus gangguan tetap memiliki

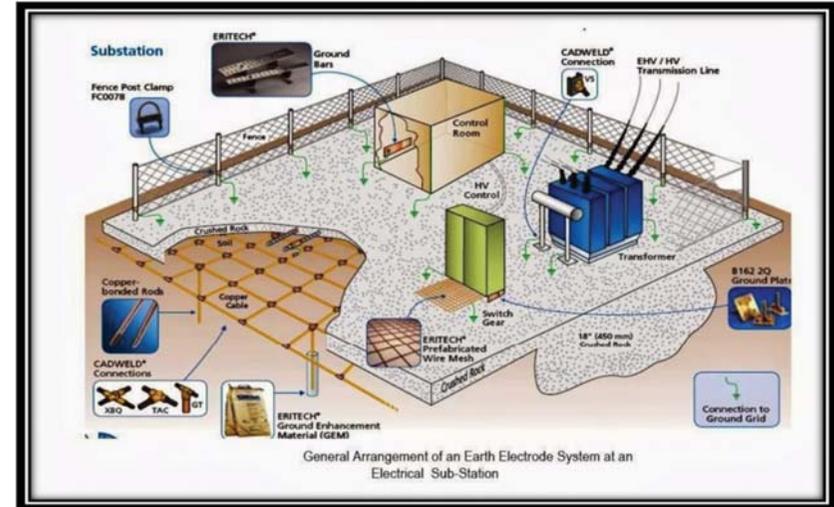
resiko tersengat listrik, sepanjang *bonding* dari objek yang dia sentuh terhubung oleh suatu jalur metalik yang berhubungan dengan *bonding* objek lain yang terkena arus gangguan.



Gambar 3.4. Transfer Potential

3.2 Konfigurasi Pembumian

Sistem pembumian pada suatu *switchyard* ditunjukkan pada gambar 3.5.



Gambar 3.5 Sistem Pembumian di *Switchyard*

Terdapat beberapa tipe konfigurasi untuk sistem pembumian yang dapat diaplikasikan, yaitu:

1. Konfigurasi pembumian konvensional:

Sistem pentanahan konvensional dilakukan dengan cara menggali suatu lubang dengan ukuran yang besar, dimana di dalamnya dimasukkan suatu pipa atau piringan tembaga dengan diberi bubuk arang atau garam di antara lapisannya. Sistem pembumian konvensional ini membutuhkan perawatan dan penyiraman air secara berkala.

Konfigurasi ini kurang layak untuk diterapkan pada *switchyard*.

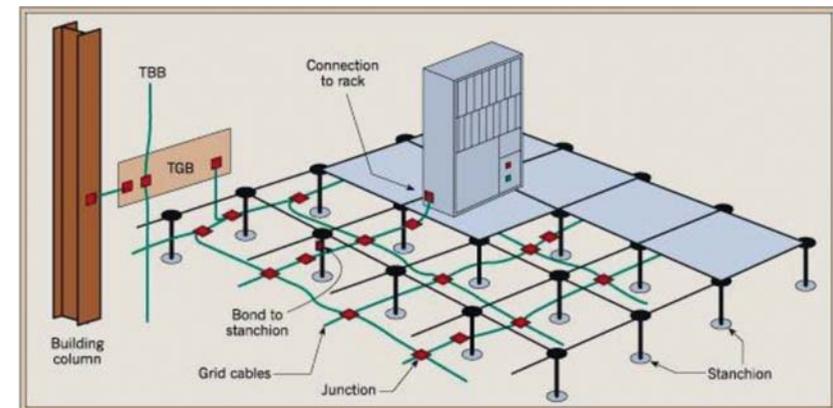
2. Konfigurasi Earth Mat

Desain jenis ini dibedakan lagi menjadi dua, yaitu:

- a. Beberapa elektroda, batang pentanahan, terhubung satu sama lain pada netral peralatan, bodi, dan struktur yang diketanahkan. Hasilnya didapatkan sebuah elektroda batang yang tersusun secara grid / jaring-jaring. Jika link penghubungnya ditanam dalam suatu tanah yang memiliki konduktivitas yang baik, jaringan ini mampu menghasilkan pembumian yang layak untuk suatu switchyard.
- b. Terdiri atas kombinasi:
 - Konduktor yang ditanam secara horizontal membentuk baris, dan konduktor yang ditanam secara vertikal membentuk kolom.
 - Piringan metalik yang terhubung pada konfigurasi konduktor di atas, ditanam pada suatu kedalaman yang dangkal di atas ground grid. Piringan tersebut berfungsi sebagai pengaman lebih untuk terjadinya tegangan sentuh atau tegangan langkah yang tinggi.
 - Kisi-kisi logam yang diketanahkan diletakkan pada atau di atas permukaan tanah. Atau kabel mesh diletakkan langsung dibawah permukaan material.
 - Mesh ditanam pada kedalaman 300 – 500 mm, sementara untuk konduktor dipisahkan sebesar 4 – 8 meter.

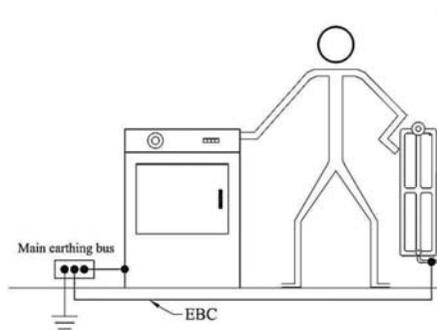
Konfigurasi (b) memiliki beberapa keuntungan, yaitu:

1. Batang elektroda yang ditanam pada resistivitas tanah yang lebih kecil akan jauh lebih efektif untuk membuang arus gangguan, kapanpun dalam keadaan lapisan tanah memiliki kondisi sebagai berikut: resistivitas tinggi pada lapisan atas dan resistivitas rendah pada lapisan bawah.
2. Jika batang-batang elektroda ditanam sepanjang grid dalam suatu tanah yang memiliki kondisi lapisan resistivitas dari tinggi ke rendah secara seragam, batang akan sangat mengurangi kenaikan gradien permukaan.
3. Penghematan lahan akibat pengurangan earth pits mengakibatkan koordinasi yang lebih mudah



Gambar 3.6. Mesh Grounding Pada Switchyard

Tambahan ekupotensial ikatan ('bonding tambahan') dianggap sebagai perlindungan tambahan terhadap kejut listrik pada kondisi gangguan, bonding tambahan menghubungkan bagian konduktif barang listrik (ECP) dan barang-barang non-listrik (EXCP) untuk mencegah terjadinya tegangan yang berbahaya di bawah kondisi gangguan ke tanah.

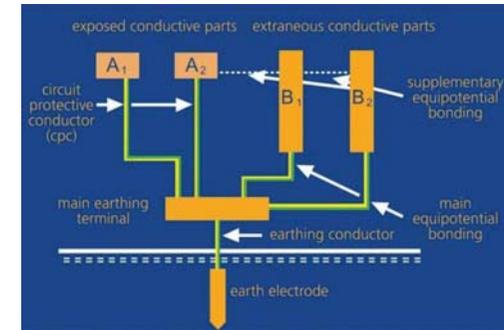


Gambar 3.7 Ekipotensial Antara ECP dan EXCP

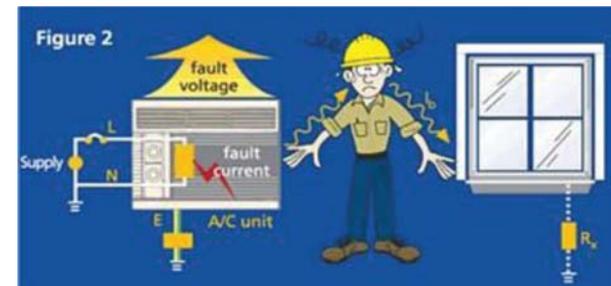
Seorang, yang tidak terisolasi dengan bumi, tetap rentan terhadap sengatan listrik, tetapi setidaknya dapat “menyembuhkan” RBG nya dalam hubungan seri dengan tahanan tubuhnya RB, seperti pada gambar 3.7. Sangat penting untuk EXCP dalam tujuan mengimplementasikan ekipotensial pada instalasinya.

Pada kondisi umum, dapat ditentukan tahanan tubuh RBG seseorang terhadap tanah sekitar 1000Ω pada hubungan seri dengan tahanan tubuhnya, bahkan tanpa menyentuh lantai. Pada lokasi khusus (seperti rumah sakit, bangunan konstruksi, dan daerah pertanian), dimana

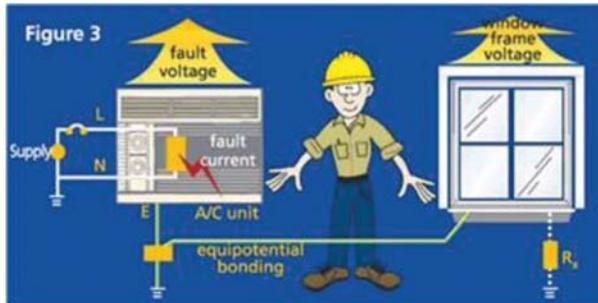
tahanan tubuh manusia ke tanah menjadi lebih rendah, nilai 200Ω digunakan untuk RBG karena permintaan keselamatan tambahan harus terpenuhi (batas tegangan sentuh yang diijinkan diturunkan dari 50 V ke 25 V).



Gambar 3.8 a. Bonding ECP dan EXCP



Gambar 3.8 b. ECP dan EXCP Tidak Dihubungkan

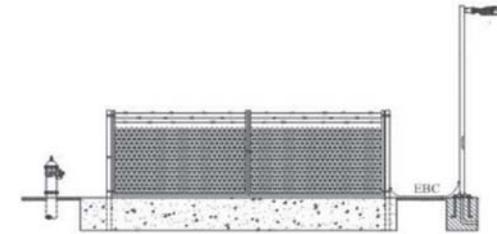


Gambar 3.8 c. ECP dan EXCP Dihubungkan dengan Ekipotensial

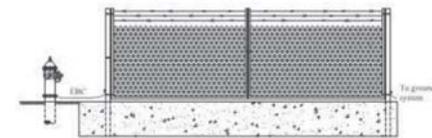
3.3 Bounding dan Diagnosa

Saat ekipotensial antara ECP dan EXCP tidak dihubungkan, arus dapat mengalir melalui tubuh manusia yang menyentuhnya (Gambar 3.8 b). Ketika sambungan/bonding ekipotensial dihubungkan, perbedaan tegangan antara bingkai jendela dengan peralatan menjadi kecil. Oleh karena itu arus yang mengalir melalui tubuh seseorang menjadi sangat kecil dan tidak mengakibatkan kerusakan (Gambar 3.8 c).

Koneksi bonding, menyalurkan tegangan sentuh sepanjang pagar. Seseorang yang secara langsung bersentuhan dengannya atau EXCP lainnya (contoh hidran) akan terkena potensial bumi. Haruskah kita melakukan bonding ke hidran juga yang mengakibatkan transfer fault menjadi lebih jauh lagi?



Gambar 3.9a Ekipotensialisasi antara ECP (tiang lampu) dan pagar



Gambar 3.9b Ekipotensialisasi antara pagar dan hidran

Pagar logam EXCP ($\text{resistensi tanah} < 1000 \text{ Ohm}$) dan tiang ECP. Karena kegagalan isolasi tiang, seseorang mungkin kontak langsung dengan tiang dan pagar, dan terkena potensial bumi. Kondisi berbahaya ini dapat dihindari dengan EBC. Equipotentialization dilakukan dengan menghubungkan seluruh EXCP ke sistem grounding.

Berikut contoh peralatan yang mesti dihubungkan ke main grounding bus pada suatu gedung

- Pemipaan (gas, AC, air dll)
- Sistem pemanas / pendingin ruangan
- Struktur logam dari gedung
- Lempengan logam dalam lantai/cor
- Rangkaian pelindung konduktor

PENUTUP

Assalamualaikum wr.wb

Salah satu cabang ilmu Pembumian Listrik merupakan cabang ilmu yang jarang disentuh oleh banyak ilmuan di bidang teknik ketenagalistrikan, sedangkan kebutuhan ilmu sangat penting ditinjau dari sudut keselamatan, baik keselamatan manusia, sistem tenaga listrik, data maupun peralatan secara individual maupun secara sistem. Yang menyangkut keselamatan terhadap manusia adalah yang paling utama diantara yang lainnya artinya lebih baik sistem tenaga listrik tidak terselamatkan bila dibandingkan dengan keselamatan manusia. Oleh karena itu penelitian masalah efek listrik terhadap manusia terus dikembangkan termasuk terhadap medan listrik dan medan magnetik, sehingga dapat didesain peralatan yang dapat mengurangi atau bahkan menghilangkan efek listrik yang berbahaya terhadap manusia. Yang kami sampaikan dalam orasi ilmiah ini hanya sebagian saja akan tetapi dengan harapan dapat diketahui dan dipahami oleh masyarakat sebagai pengguna energy listrik, sehingga keselamat pemakai listrik dapat terjamin.

Masalah yang besar khususnya untuk keselamatan suatu sistem akibat sambaran petir yang mempunyai karakteristik frekuensi yang besar sampai orde MHz serta arus sampai ratusan KA, bila tidak diketahui dengan baik karakteristik impedansi dari sistem pembumian akan berakibat yang lebih fatal seperti kebakaran. Mendalami sifat tanah

dengan berbagai macam treatment sangat diperlukan khususnya di daerah yang sering terjadi petir dan disitu terletak peralatan atau sistem yang sangat vital, penelitian ini masih dilakukan di laboratorium tegangan tinggi dan arus tinggi, program studi teknik ketenagalistrikan STEI ITB.

Sebagai pertanggungjawaban akademik khususnya untuk memberikan perlindungan terhadap masalah kelistrikan terhadap keselamatan manusia maupun sistem dan peralatan yang dapat dilakukan dengan sistem pembumian, maka kami tetap akan melakukan penelitian lanjutan.

Kami menyadari bahwa menjadi seorang Guru Besar dilingkungan institusi yang besar seperti ITB bukanlah hal yang mudah dan harus tetap berkarya yang tiada hentinya. Dengan segala kerendahan hati dan izin serta petunjuk dari ALLAH SWT, kami siap bersama dengan seluruh sivitas akademika Institut Teknologi Bandung untuk memikul beban yang mulia ini.

Semuanya ini kupersembahkan untuk Bangsa, Negara, Almamater, Agama dan Keluarga

Wassalamuallaikum wr.wb

UCAPAN TERIMA KASIH

Pertama-tama saya memanjatkan puji syukur kehadiran Allah SWT, bahwasannya atas segala karuniaNya yang telah dilimpahkan hingga saat

ini. Pada hari yang berbahagia ini, perkenankanlah saya menyampaikan kepada yang terhormat Rektor dan Pimpinan ITB, Pimpinan dan seluruh Anggota Forum Guru Besar ITB, atas kesempatan yang diberikan kepada saya untuk menyampaikan orasi ilmiah di hadapan para hadirin sekalian pada forum yang terhormat ini. Terimakasih dan salam hormat kepada pimpinan dan keluarga besar Sekolah Teknik Elektro dan Informatika ITB. Terimakasih atas segala dukungan pengorbanan dari bapak Soedjarno (alm), Ibu Hj. Sakiyem yang telah berikan. Terimakasih Prof. Adang Suwandi Achmad (alm), Prof. Tati R Mengko, para Guru Besar STEI yang telah memberikan dorongan dan perhatiannya. Terimakasih kepada semua teman sealmamater Elektro 74 ITB, SMA negeri 1 Madiun lulusan 1973 khususnya kelas 3 Pas 1 yang selalu memberikan semangat untuk maju. Terimakasih kepada istri tercinta dr. Juliati yang telah menjalani kehidupan bersama dengan segala perjuangan, anak dr. Inggita Diah Shintowati MPH, Anggandanu Dwi Pramestyo ST.MSc, dr. Anggindita Diah Widihidayati, menantu Ardi Pradana ST,MSc, Ratri Indri Hapsari Sutarto ST.MSc, cucu Arthasena Sidney Pradana, Tiara Amarisha Pradana, Ganendra Wikrama Pramestyo, Nayala Rayadinata Pramestyo yang telah memberikan kehangatan dan keceriaan dalam keluarga.

Akhir kata yang harus disampaikan adalah jabatan Guru Besar yang telah diberikan oleh Pemerintah ini bukan untuk kepentingan pribadi semata tetapi juga untuk kepentingan institusi Institut Teknologi Bandung secara khusus dan Pemerintah secara umum agar memberikan

manfaat sebesar-besarnya untuk kemaslahatan masyarakat serta bangsa Indonesia secara luas. Oleh karena itu orasi ilmiah ini merupakan janji untuk terus melakukan penelitian, pengembangan keilmuan yang bermanfaat kepada Nusa Bangsa dan Negara serta masyarakat keilmuan itu sendiri.

DAFTAR PUSTAKA

1. Almeida M.E., dan Correia de Barros M.T., (1999), Modelling of LongGround Electrodes For Lightning Studies, High Voltage Engineering Simposium 22-27 Agust 1999 Conference Publication No 467©IEEE
2. Anggoro.B, N.I Sinisuka P.M.Pakpahan, Impedance Characteristics of Grounding Sumulation for Grid - Rod Configuration Which Injected by Variable Frequency Current, Electrical Power, Electronics, Communications, Control, & Informatics Seminar, Brawijaya University, Malang 2008.
3. Almeida M.E., dan Correia de Barros M.T., (1996), Accurate Modelling of Rod Driven Tower Footing, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol 11 No 3 July.
4. Anggoro B, Pakpahan P.M,, dan Widodo S, (2002), The Pattern of Ground Potential Rise (GPR) in the Resistance Grounding Measurement With many Return Electrodes, Proceeding, 2002 Joint Conference of ACED & K - J Symposium ED and HVE, Soongsil

- University, Seoul, Korea.
5. Anggoro.B; Irman.D.B, The Characteristics of Soil Which is Treated by Salt Solution, and Water as the Basic of Grounding Diagnostics, IEEE International Conference on Condition Monitoring and Diagnostics, Bali 2012.
 6. Anggoro.B, The Concept of Grounding Impedance Diagnostics Method, IEEE International Conference on Condition Monitoring and Diagnostics, Bali 2012
 7. Anggoro.B; Ichwan.C The Impedance Characteristics and Equipotential pattern in Ground Surface of Horizontal and Grid Configuration of Grounding Systems which are injected by Frequency Variable Alternating Current. International Research Journal of Engineering Science, Technology and Innovation (ISSN-2315-5663) Vol. 2(2) pp. 17-28, February, 2013.
 8. Anggoro.B; Yutadhia.R.E, The Grounding Impedance Characteristics of Grid Configuration, The 4th International Conference on Electrical Engineering and Informatics (ICCEI 2013), Kuala Lumpur, 2013.
 9. Anggoro.B; Yunandar.E Impedance Characteristics of Grounding Simulation for Grid and Combination of Grid-Rod Configuration which Injected by Variable Current Frequency. International Journal of Electrical Engineering ISSN 0974-2158 Vol 6, No 3, 2013 pp 319 - 328.
 10. Abdullah, N., Marican, A.M.A., Osman, M. and Rahman, N.A.A., 2011, November. Case study on impact of seasonal variations of soil

resistivities on substation grounding systems safety in tropical country. In 2011 7th Asia-Pacific International Conference on Lightning (pp. 150-154). IEEE.

11. Bambang Anggoro, Junaidy, Moh Room, The Bandung Soil Characteristics as a Function of Injection Current Frequency for Electric Grounding Systems” International Journal of Applied Engineering Research ISSN 0973 - 4562, Volume 11 Number 2 (2016) pp 1361 - 1368 .
12. Bambang Anggoro, The Grounding Potential Profile on the Earth Surface of 3 Vertical Rods of Grounding Systems, 2017 International Conference on High Voltage Engineering and Power Systems (ICHVEPS 2017), pp 538 - 544
13. Bambang Anggoro, Rio Hakim D, Hanifah Nue K, Junaidy B, M.R Tamjis, Grounding Impedance Characteristics for Two Layers Soil of Vertical Rod Configuration with Variation of Length and Diameter, International Journal on Electrical Engineering and Informatics, ISSN 2085-6830, Volume 10, Number 4, December 2018, 799-815.
14. Blattner C.J, (1980), Prediction of Soil Resistivity and Ground Resistance Deep Ground Electrodes, IEEE Transaction Apparatus and System Vol PAS 99, No 5 Sept/Oct.
15. Blattner C.J, (1985), Analysis of Soil Resistivity Test Methods in Two-Layer Earth, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol PAS 104 No 12 December

16. Chisholm W.A, dan.Janisehewskyi W (F),(1989), Lightning Surge of Grounding Grids, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol 4 No 2 April.
17. Correia de Baros M.T, Simoes S, dan Festas J, (1997), The Effect of Soil Ionization on BFR Calculations, Foudre ET Montagne '97 Lightning and Mountains.
18. Chanzy, A., Gaudu, J.C. and Marloie, O., 2012. Correcting the temperature influence on soil capacitance sensors using diurnal temperature and water content cycles. *Sensors*, 12(7), pp.9773-9790.
19. Dawalibi F, dan Mukhendar D, (1979), Influence of Ground Rods on Grounding Grids, IEEE Transaction Apparatus and System Vol PAS 98 No 6, Nov /Dec.
20. Dawalibi F, dan Mukhedkar D, (1976), Multi Step Analysis of Interconnected Grounding Electrodes, IEEE ransactions on Power Apparatus and Systems, Vol PAS 95 No 1, Jan / Feb.
21. Dawalibi F, dan Mukhedkar D, (1984), Ground Electrode Resistance Measurements in Non Uniform Soils, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol PAS-103 No 2 February
22. Dahiya, R., Phogat, V.K. and Sheoran, H.S., 2019. Hydraulic Properties and Their Dependence on Physico-chemical Properties of Soils: A Review. *Current Journal of Applied Science and Technology*, pp.1-7.
23. Dick W., dan Holiday H.R, (1978), Impulse and Alternating Current

- Test on Grounding electrodes in Soil Environment, IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems Vol PAS 97, No 1 Jan / Feb.
24. Eldon, J.R., (1981), Impedance Characteristics of Large Tower Footings to A 100 ?s Wide Square Wave of Current, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol PAS-100 No 1, January.
25. EI Fakahany, R. M, dan Anis H.I, (2001), Step Voltage - based categorization and assessment of grounding grid, Proceeding of 12th International Symphosiuon on High Voltage Engineering - (ISH), Volume 1 - Agustus.
26. Eduful, G., Cole, J.E. and Okyere, P.Y., 2009, January. Optimum mix of ground electrodes and conductive backfills to achieve a low ground resistance. In 2009 2nd International Conference on Adaptive Science & Technology (ICAST) (pp. 140-145). IEEE.
27. Gupta, B.R, dan Thapar B, (1980), Impulse Impedance of Grounding Grids, IEEE Transactions on Power Apparatus and System, Vol PAS 99 No.6 Nov /Dec
28. Grecev L, dan Arnautovski V, (1997), Software Methods For Analysis of The Efficiency of Different Grounding Arrangement For Lightning Protections, Foudre Et Montagne '97 Lightning and Mountains.
29. Grecev L, dan Helimbach M, (1997), Frequency Dependent and Transient Characteristics of Substation Grounding Systems, IEEE Transactions on on Power Delivery, Vol 12 No 1 January

30. Grecev L dan Popov M (2005), IEEE on High Frequency Circuit Equivqlent of a Vertical ground Rod, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol20 No2 April.
31. Ghania, S.M., 2019. Grounding systems under lightning surges with soil ionization for high voltage substations by using two layers capacitors (TLC) model. Electric Power Systems Research, 174, p.105871.
32. Hara T, Yasuda Y, Hirakawa Y, Hayanose N., Nomura K, dan Kawabata K, (1999), Flashover Analyses of 500kv Transmission Towers With Non Linear and Capacitive Grounding Impedance Model, High Voltage Engineering Simposium 22-27 Agust1999 Conference Publication No 467 ©IEEE.
33. He J., Yu G., Yuan J, Zeng R, Zhang B, Zou J, dan Guan Z, (2005), Decreasing Grounding Resistance of Substation by Deep-Ground-Well Method, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol20 No2 April.
34. Heimbach M dan Greey L, (1997), Grounding System Analysis in Transient Program Applying Electromagnetic Field Approach, IEEE Transaction on Power Delivery Vol 12 No 1, January.
35. Hanifah Nur Kumala; Anggoro.B, Characteristic Study Of Two-Layer Vertical Grounding System For Variation Of Length Rod And High Frequency Injection Current (100kHz-14MHz), The 2nd IEEE Conference on Power Engineering and Renewable Energy, ICPERE, Bali 2014.

36. Horchue, T., Tangtheerajaronwong, W., Wojtas, S. and Woloszyk, M., 2019, March. Impulse Impedance Measurements of Lightning Protection Earthings. In 2019 IEEE PES GTD Grand International Conference and Exposition Asia (GTD Asia) (pp. 945-949). IEEE.
37. Karahi S, dan Yamazaki T, (1995), Transient Impedance of GIS Grounding Grid, IEEE Transaction on Power Delivery “ Vol 10 No 2, April.
38. Korasli C, (2005), Ground Resistance Measurement With Alternative Fall-of-Potential Method, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol 20 No 2, April.
39. Kustaluk R, Loboda M, dan Mukhedar.D (1981), Experimental Study Transient Ground Impedance, IEEE Transaction on Power Apparatus and System, Vol PAS 100, No 11 November.
40. Lee C.H, dan Chang C.N, (2005), Comparison of 161 / 69-kv Grounding Grid Design Between Indoor-Type and Outdoor-Type Substations, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol 20 No 2 April.
41. Liu Y, Zitnik M, dan Thottappillie R, (2001), A time domain transmission line model of grounding system 12th, ISH, Vol 1, Agustus.
42. Liu Y, Theethayi N, dan Thottappillil R, Member, IEEE, (2005), An Engineering Model For Transient Analysis of Grounding Systems Under Lightning Strikes : Nonuniform Transmission-Line Approach, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol 20 No 2 April.

43. Mattos M.A.F, (2005), Grounding Grids Transient Simulation, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol 20 No 2 April.
44. Mazetti C dan. Veca G.M, (1983), Impulse Behavior of Ground Electrodes, IEEE Transaction Apparatus and System Vol PAS 102 No 9 September.
45. Mousa A.M., (1994), The Soil Ionization Gradient Associated with Discharge of High Currents Into Concentrated Electrodes, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol 9 No 3 July.
46. Meliopolous A.P, dan Moharam M.G (1983), Transient Analysis of Grounding System, IEEE Transaction on Power Apparatus and System, Vol, PAS 10, No.2.
47. Meliopoulos, A.P, Papalexopoulos A.D, Webb R.P, dan Blattner C, (1984), Estimations of Soil Parameters From Driven Rod Measurements, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol PAS 103 No 9, September
48. Mitchell, J.K, (1976), Fundamental of Soil Behavior, University of California, Barkley, John Willey & Sons, Inc.
49. Mokhtari, M., Abdul-Malek, Z. and Gharehpetian, G.B., 2016. A critical review on soil ionisation modelling for grounding electrodes. Archives of Electrical Engineering, 65(3), pp.449-461.
50. Otte E.E., (1988), A New General Estimation Curve For Predicting The Impulse Impedance of Concentrated Earth Electrodes, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol 3 No 4, October.

51. Opara, F.K; Nduka, O.S; Ilokah N.C.; Amaizu P.C.; and Onyebuchi M.A., 2014 Comparative Deterministic Analysis of Bentonite, Pig Dung and Domestic Salt and Charcoal Amalgam as Best Resistance Reducing Agent for Electrical Earthing Applications. International Journal of Scientific & Engineering Research, Volume 5, Issue 10, October-2014 575. ISSN 2229-5518
52. Papalexopoulos, A.D, dan Meliopoulos A.P, (October 1987), Frequency Dependent Characteristics of Grounding Systems, IEEE Transactions on Power Delivery Vol PWRD 2 No.4 February.
53. Rio Hakim D; Anggoro.B, Characteristic Study Of Vertical Configuration Grounding System With Two Layers Modified Using Type Of Different Soil For Variation Of Diameter And Frequency Injection, The 2nd IEEE Conference on Power Engineering and Renewable Energy, ICPERE, Bali 2014.
54. Ramamoonty M, dan Narayan MM, (1989), Transient Performance of Grounding Grids, IEEE Transaction on Power Delivery Vol 4, October
55. Reynolds J.M, (1997), An Introduction to Applied and Environmental Geophysics, John Wiley and Sons.
56. Rioual M, (1990), Measurements and Computer Simulation of Fast Transients Through Indoor and Outdoor Substations, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol 5 No 1 January.
57. Robert G. Olsen Mark, dan Willis C, (1996), A Comparasion of Exact and Quasistatic Methods for Evaluating Grounding Systems at high

- Frequencies, IEEE Transactions on Power Delivery Vol 11 No 2, April.
58. Reffin, M.S., Ali, A., Wali, A., Mohamad Nor, N., Ahmad, N.N., Abdullah, S.A.S., Mahmud, A. and Hanaffi, F., 2019. Seasonal Influences on the Impulse Characteristics of Grounding Systems for Tropical Countries. *Energies*, 12(7), p.1334.
 59. Salam, M.A., Rahman, Q.M., Ang, S.P. and Fushuan, W.E.N., 2017. Soil resistivity and ground resistance for dry and wet soil. *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, 5(2), pp.290-297.
 60. Sargent M.A, dan Darveniza M, (1969), Tower Surge Impedance, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol PAS-ss No 5 May.
 61. Shonoda T, Hidemi. T, dan Shozo.S, (2000), Measurement of surge characteristic of grounding resistance of counterpoises for impuls currents 25th ICLP Vol 2 September
 62. Thapar B, Gerev V, Balakrishnan A, dan Blank D.A, (1992), Substations Grounding Grids Intertied With Buried Conductors, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol 7 No 3 July.
 63. Takasima T., Nakac T, dan Ishibashi R, (1981), High Frequency Characteristic of Impedance to Ground and Field Distribution of Ground Electrodes, IEEE Transaction on Power Apparatus and System Vol PAS 100, No 4 April.
 64. Talford W.I., Geldart L.P, dan Sheriff R.E., (1990), *Applied Geophysics*, 2nd Edition, Cambridge Press.

65. Texas Instrument design, "High Accuracy AC Current Measurement Reference Design Using PCB Rogowski Coil Sensor" TIDUBV4A-June 2016-Revised July 2016
66. Velazquez R., dan Mukhedkar D, (1984), Analytical Modelling of Grounding Electrodes Transient Behavior, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems Vol PAS 103 No 6 July.
67. Verma R., dan Mukhedkar D, (1980), Impulse Impedance of Buried Ground Wire, IEEE Transactions on Power apparatus and Systems, Vol PAS 99 No 5 Sept/Oct.
68. Visarco F, Soares A, Vale HMM, dan Sehrolder MAO, (2000), Evaluation of current and potential distribution for lightning protection System Including the behavior of grounding electroce 25th, ICLP, Vol 2, September.
69. Visácro, S., Guimaraes, M.B. and Oliveira, C.H., 2018, September. Achievements in the Measurement of Tower-footing Impulse Impedance of Transmission Lines. In 2018 34th International Conference on Lightning Protection (ICLP) (pp. 1-4). IEEE.
70. Wiener P, (1970), A Comparison of Concrete Encased Grounding Electrodes to Driven Ground Rods, IEEE Transactions on Industry and General Applications, Vol IGA-6 No 3 May/June.
71. Wen-Rong, S., Chen-Zhao, F., Bing-Bing, L., Xiang, G. and Zhi-Bing, X., 2016, September. Research on impulse impedance measurement for grounding device of transmission tower. In 2016 IEEE International

Conference on High Voltage Engineering and Application (ICHVE) (pp.1-4).IEEE.

72. Zeng R, Jin Liang HE, dan Yang GAD, (2001), Arrangement of Grounding measurement circuit for grounding System in vertical - layer soil, Proceeding 12th - Vol 1, Agustus.
73. Zeqing S, Jingliang H, dan Raghuvver M.R, (1999), Experimental Study on Lightning Breakdown Channels in The Soils, High Voltage Engineering symposium, 22 - 27 August 1999 Conference Publication No 467 © IEE

CURRICULUM VITAE



Nama : **BAMBANG ANGGORO SOEDJARNO**

Tempat/tgl lahir : Madiun, 15 Februari 1955

Kel. Keahlian : Teknik Ketenagalistrikan

Alamat Kantor : Jalan Ganesha 10 Bandung

Nama Istri : dr. Juliati, AIF

Nama Anak : 1. dr. Inggita Diah Shintowati MPH
2. Anggandanu Dwi Pramestyo ST, MSc
3. dr. Anggindita Diah Widihidayati

I. RIWAYAT PENDIDIKAN

- Doktor, STEI - ITB, 2006
- Magister Teknik, Teknik Elektro ITB, 1990
- Sarjana Teknik Elektro (Ir), Institut Teknologi Bandung (ITB), 1979.

II. RIWAYAT KERJA di ITB

- Staf Pengajar FTI/ STEI - ITB, 1980 - Sekarang
- Ketua Program Studi Magister Teknik Elektro ITB, 2013-2017.

III. RIWAYAT KEPANGKATAN

- CPNS, III/A, 1 Maret 1980
- Penata Muda, III/A, 1 Maret 1981

- Penata Muda TK 1, III/B, 1 oktober 1983
- Penata, III/C, 1 Oktober 1985
- Penata Tk 1 III/D, 1 April 1992
- Pembina, IV/A, 1 Oktober 1999
- Pembina Tk 1, IV/B, 1 Oktober 2002.

IV. RIWAYAT JABATAN FUNGSIONAL

- Asisten Ahli Madya, 1 Maret 1981
- Lektor Muda, 1 Oktober 1985
- Lektor Madya, 31 Maret 1992
- Lektor, 1 Oktober 1999
- Lektor Kepala, 1 Oktober 2001
- Profesor/Guru Besar, 1 Desember 2019.

V. KEGIATAN PENELITIAN

- Penelitian awal dengan objek Losses Energi di Jaringan Distribusi PLN Kota Jakarta, Surabaya dan Medan yang dilakukan dari 1985-1988. Penelitian bersama dengan beberapa Universitas di Jepang (Tokyo University, Nagoya University, Osaka University, Nagoya Institut og Technology, Tokyo Institut of Tecknologi) mengenai medan listrik dan medan magnetic di Jaringan Transmisi dan Gardu Induk tahun 1990 - 1993. Penelitian penganrus medan listrik dan medan magnetik terhadap makhluk hidup dengan Kyushu

University, Nagoya Institut of Technology 1996 -1997, Penelitian sistem pembumian diperbagai macam obyek, karakteristik tanah dengan berbagai macam treatmen dilakukan sejak tahun 2000 sampai saat ini. Sejak tahun 1985 sampai sekarang telah dihasilkan lebih dari 100 makalah baik yang dipublikasi melalui konferen Nasional, Internasional, maupun Jounal Nasional dan Internasional, Antara lain yang disampaikan di bagian Publikasi dibawah ini.

VI. PUBLIKASI

1. **Anggoro.B;** Irman.D.B, The Characteristics of Soil Which is Treated by Salt Solution, and Water as the Basic of Grounding Diagnostics, IEEE International Conference on Condition Monitoring and Diagnostics, Bali 2012.
2. **Anggoro.B,** The Concept of Grounding Impedance Diagnostics Method, IEEE International Conference on Condition Monitoring and Diagnostics, Bali 2012
3. **Anggoro.B;** Ichwan.C The Impedance Characteristics and Equipotential pattern in Ground Surface of Horizontal and Grid Configuration of Grounding Systems which are injected by Frequency Variable Alternating Current. International Research Journal of Engineering Science, Technology and Innovation (ISSN-2315-5663) Vol. 2(2) pp. 17-28, February, 2013.
4. **Anggoro.B;** Yutadhia.R.E, The Grounding Impedance

- Characteristics of Grid Configuration, The 4th International Conference on Electrical Engineering and Informatics (ICCEI 2013), Kuala Lumpur, 2013.
5. **Anggoro.B;** Yunandar.E Impedance Characteristics of Grounding Simulation for Grid and Combination of Grid-Rod Configuration which Injected by Variable Current Frequency. International Journal of Electrical Engineering ISSN 0974-2158 Vol 6, No 3, 2013 pp 319-328.
 6. Hanifah Nur Kumala; **Anggoro.B**, Characteristic Study Of Two-Layer Vertical Grounding System For Variation Of Length Rod And High Frequency Injection Current (100kHz-14MHz), The 2nd IEEE Conference on Power Engineering and Renewable Energy, ICPERE, Bali 2014.
 7. Rio Hakim D; **Anggoro.B**, Characteristic Study Of Vertical Configuration Grounding System With Two Layers Modified Using Type Of Different Soil For Variation Of Diameter And Frequency Injection, The 2nd IEEE Conference on Power Engineering and Renewable Energy, ICPERE, Bali 2014.
 8. **Anggoro.B;** Qodir A, The Induced Current Density Calculation by Charge Simulation Method for Grounded and Isolated Man Model Exposed Under 500 kV Transmission Line, 2014 IEEE Joint International Conference on Electrical Engineering and Computer Science and the Second International Conference on Electric Vehicular Technology 24-25 November 2014, Bali, Indonesia

9. Jayandi, **Bambang Anggoro**, New Probabilistics Approach for Identification Event Severity Index Due To Short Circuit Fault", 2014 IEEE International Conference on Electrical Engineering and Computer Science, 24 - 25 November 2014, Bali, Indonesia
10. Jayandi, **Bambang Anggoro**, Alternative Method for Testing Overcurrent Protection Function by Using Least Square Method" 2015 International Conference on Electrical Engineering and Informatics at (ICEEI 2015).
11. Nugroho H.W. **Bambang Anggoro**, Measurement for electromagnetic interference of the household appliances by using shielded room", Seminar Nasional Ketenagalistrikan dan Aplikasinya, SENKA 2015.
12. Boby, **Bambang Anggoro**, Nasrun, Studi Karakteristik Impedansi Pentanahan Konfigurasi Vertikal dengan Variasi Panjang Batang Elektroda Menggunakan Injeksi Arus Bolak Balik Berfrekwensi 50 - 2 MHz, Seminar Nasional Ketenagalistrikan dan Aplikasinya SENKA 2015
13. Ika Mustika, Waluyo, **Bambang Anggoro**, Studi Karakteristik Impedansi Pentanahan Konfigurasi Vertikal dan Modifikasi Batang Elektroda Variasi Kedalaman Tabung dengan Injeksi Arus Bolak Balik Frekuensi 50 Hz - 2 MHz, Seminar Nasional Ketenagalistrikan dan Aplikasinya, SENKA 2015
14. Sylvia Oktobella, Waluyo, **Bambang Anggoro**, Studi Karakteristik

- Impedansi Pentanahan dengan Modifikasi Variasi Diameter Tabung yang Berkonfigurasi Vertikal dan di Injeksi Arus Bolak Balik Frekwensi 50Hz - 2 MHz", Seminar Nasional Ketenagalistrikan dan Aplikasinya SENKA 2015.
15. Ika Mustika, Waluyo, **Bambang Anggoro**, Study Karakteristik Impedansi Imajiner dan Riil Pentanahan Konfigurasi Vertikal dengan Variasi Panjang Batang Elektroda Menggunakan Injeksi Arus Bolak Balik Berfrekwensi 50 Hz - 2 Mhz" Jurnal Reka Elkomika Institut Teknologi Nasional Vol 3 no 1, 2337-439X, Januari 2015, hal 62 - 74.
 16. Sylvia Oktobella, Waluyo, **Bambang Anggoro**, Nilai Riil dan Imajiner Impedansi Pentanahan dengan Modifikasi Batang Elektroda Diinjeksi Arus Berfrekwensi 50 Hz - 2 MHz" Jurnal Reka Elkomika Institut Teknologi Nasional Vol 3 no 1, 2337-439X, Januari 2015, hal 31 - 40.
 17. Bobby B, **Bambang Anggoro**, Nasrun Study Karakteristik Nilai Impedansi Imajiner dan Riil Pentanahan Konfigurasi Vertikal dengan Variasi diameter dan Injeksi Arus Bolak Balik Berfrekwensi 50 Hz - 2 Mhz" Jurnal Reka Elkomika Institut Teknologi Nasional Vol 3 no 1, 2337-439X, Januari 2015, hal 17 - 30.
 18. Karel. O, Adang. S, **Bambang Anggoro**, Power Transformer Condition Monitoring and Performance Calculation Method based on Information Fusion" 2015 IEEE International Conference

on Quality in Research, 978 - 4799 - 6551 - 15, Lombok August 2015, page 163 - 166.

19. Karel O, Adang S, **B. Anggoro**, Transformer End-Of-Life Estimation Using Condition - Based Sampling Period Method" 2015 IEEE International Symposium on Intelligent Signal Processing and Communication Systems (ISPACS), Bandung, November, 9 - 12, 2015.
20. O. Bachri, **B. Anggoro**, A. S. Ahmad, Transformer performance calculation using information fusion based on DGA interpretation, K. 2016 International Symposium on Electronics and Smart Devices (ISESD)
21. K. O. Bachri, **B. Anggoro**, A. S. Ahmad, Interpreting DGA Key Gas using Fuzzy OMA3S, 2016 International Symposium on Electronics and Smart Devices (ISESD)
22. **Bambang Anggoro**, Junaidy, Moh Room, The Bandung Soil Characteristics as a Function of Injection Current Frequency for Electric Grounding Systems" International Journal of Applied Engineering Research ISSN 0973 - 4562, Volume 11 Number 2 (2016) pp 1361 - 1368 .
23. **Bambang Anggoro**, Burhanuddin H, Potency of Waste to Energy - Bandung City Case Study, 2017 International Conference on High Voltage Engineering and Power Systems (ICHVEPS 2017), pp 131 - 135.

24. K. O. Bachri, **B. Anggoro**, A. S. Ahmad, The implementation of A3S information fusion algorithm for interpreting Dissolved Gas Analysis (DGA) based on Doernenburg Ratio, 2017 International Symposium on Electronics and Smart Devices (ISESD)
25. **Bambang Anggoro**, The Grounding Potential Profile on the Earth Surface of 3 Vertical Rods of Grounding Systems, 2017 International Conference on High Voltage Engineering and Power Systems (ICHVEPS 2017), pp 538 - 544
26. K O Bachri, **B Anggoro Soedjarno**, A D W Sumari, A S Ahmad, Cognitive Artificial Intelligence Method for Interpreting Transformer Condition Based on Maintenance Data, Advances in Science, Technology and Engineering Journal (ASTESJ)
27. K O Bachri, U Khayam, **B Anggoro**, A D W Sumari, A S Ahmad, Cognitive Artificial-Intelligence for Doernenburg Dissolved Gas Analysis Interpretation, Telecommunication Computing Electronics and Control (Telkomnika)
28. K O Bachri, U Khayam, **B Anggoro Soedjarno**, A D W Sumari, A S Ahmad, CAI for Transformer Fault Identification Based on the Combination of DRM and SGR DGA Interpretation, International Journal of Electrical Engineering and Informatics (IJEI)
29. **Bambang Anggoro**, Burhanuddin Halimi, P.M.Siagian, Junaidy Burhan, M.R Tamjis, M. Abu Bakar, Vallapan Raju, Waste Power Generation Analysis Using Landfill Gas, Eurasian Journal of

Analytical Chemistry, ISSN: 1306-3057 OPEN ACCESS 2018 13(6): 285 - 302.

30. **Bambang Anggoro**, Rio Hakim D, Hanifah Nue K, Junaidy B, M.R Tamjis, Grounding Impedance Characteristics for Two Layers Soil of Vertical Rod Configuration with Variation of Length and Diameter, International Journal on Electrical Engineering and Informatics, ISSN 2085-6830, Volume 10, Number 4, December 2018, 799-815.
31. Rahman Azis Prasojo, Winanda Riga Tamma, Suwarno, Nur Ulfa Maulidevi, **Bambang Anggoro Soedjarno**, A Method to Calculate Uncertainty due to Unavailable Data in Transformer Assessment Index, Conference Proceedings of ISEIM 2020
32. Rahman Azis Prasojo, Suwarno, Nur Ulfa Maulidevi, **Bambang Anggoro Soedjarno**, A Multiple Expert Consensus Model for Transformer Assessment Index Weighting Factor Determination, International Conference of Material Dielectric, 2020 .

VII. PENGHARGAAN

- Tanda Jasa Penghargaan Pengabdian dari Pemerintah RI 10 Tahun
- Tanda Jasa Penghargaan Pengabdian dari Pemerintah RI 20 Tahun
- Tanda Jasa Penghargaan Pengabdian dari Pemerintah RI 30 Tahun
- Tanda Jasa Penghargaan Pengabdian dari ITB 15 Tahun

- Tanda Jasa Penghargaan Pengabdian dari ITB 25 Tahun
- Tanda Jasa Penghargaan Pengabdian dari ITB 35 Tahun.

VIII. SERTIFIKASI

- Sertifikasi Dosen, 2008. Kementerian Pendidikan Nasional

