

Tinjauan Teoritis pada Pelaksanaan Prosedur Konstruksi Sistem Pembumian Model *Grid* di Gardu Induk

Arief Goeritno

Program Sudi Teknik Elektro, Universitas Ibn Khaldun Bogor, Kota Bogor, Jawa Barat.

Informasi Artikel

Naskah Diterima : 17 Maret 2018

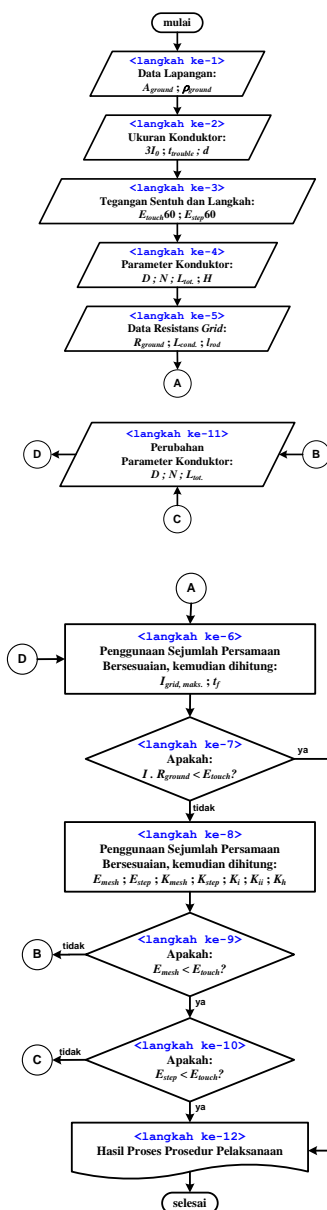
Direvisi : 21 Juni 2018

Disetujui : 25 Juni 2018

*Korespondensi Penulis:

arief.goeritno@uika-bogor.ac.id

Graphical abstract



Abstract

A theoretical review into implementation of construction procedure for the grounding grid system at substation has been done. The construction procedure based on a number of International standards, through a number of objectives in the form of (a) determination of conductor and connection selection; (b) determination of soil conditions; (c) calculating the value of earth resistance in the ground system; (d) maximum grid current calculation; and (e) calculation of mesh voltages and steps, and (f) flow chart of construction implementation procedures. The selection of conductors and connections, including (i) material and the size of the conductor and (ii) the connections. Determination of soil conditions, including structure, resistivity, and soil model. Calculation of the earth resistance value in the grounding grid system is based on the number of layers soil and soil uniformity. Maximum grid current calculation, including (i) determination of the location and type of worst disturbance, (ii) calculation of the noise current dividing factor, (iii) the calculation of the descending factor, (iv) the determination of the projection correction factor. Mesh and step voltage calculations include (i) mesh voltage and (ii) step voltage, (iii) limits for mesh and step voltage, and (iv) minimum length of embedded conductor. The flowchart of the implementation of construction procedure for the grounding grids system at substation is a sequence of criteria that must be met for the acquisition of an efficient security system, but safe for humans according to IEEE standards

Keywords: Implementation of construction procedure, grounding grids system, substation

Abstrak

Telah dilakukan tinjauan teoritis pelaksanaan untuk perolehan prosedur konstruksi terhadap sistem pembumian model grid di gardu induk. Prosedur konstruksi didasarkan kepada sejumlah standar Internasional, melalui sejumlah tujuan berupa (a) penetapan pemilihan konduktor dan sambungan; (b) penentuan kondisi tanah; (c) perhitungan nilai resistans bumi pada sistem pembumian; (d) perhitungan arus *grid* maksimum; dan (e) perhitungan tegangan *mesh* dan langkah, dan (f) diagram alir prosedur pelaksanaan konstruksi. Pemilihan konduktor dan sambungan, meliputi (i) material dan ukuran konduktor dan (ii) sambungan. Penentuan kondisi tanah, meliputi struktur, resistivitas, dan model tanah. Perhitungan nilai resistans bumi pada sistem pembumian model *grid* didasarkan kepada jumlah lapisan dan keseragaman tanah. Perhitungan arus *grid* maksimum, meliputi (i) penentuan lokasi dan jenis gangguan terburuk, (ii) penghitungan faktor pembagi arus gangguan, (iii) penghitungan faktor penurunan, dan (iv) penentuan faktor koreksi proyeksi. Perhitungan tegangan *mesh* dan langkah, meliputi (i) tegangan *mesh* (*mesh voltage*) dan (ii) tegangan langkah (*step voltage*), (iii) batasan-batasan untuk tegangan *mesh* dan langkah, dan (iv) panjang minimum konduktor tertanam. Diagram alir pelaksanaan prosedur konstruksi sistem pembumian model *grid* di gardu induk merupakan urutan kriteria parameter-parameter yang wajib dipenuhi untuk perolehan sistem pengaman yang efisien, tetapi aman bagi manusia sesuai standar-standar IEEE.

Kata kunci: Pelaksanaan prosedur konstruksi, sistem pembumian model *grid*, gardu induk

© 2018 Penerbit Jurusan Teknik Elektro UNTIRTA Press. All rights reserved

1. PENDAHULUAN

Mayoritas keberadaan sumber energi primer sebelum dikonversi menjadi tenaga listrik di pusat-pusat pembangkitan terletak jauh dari pusat-pusat beban listrik (elektrik) [1]-[3]. Pusat-pusat beban listrik tersebut direpresentasikan dengan kelompok rumah tangga, prasarana umum, pusat-pusat kegiatan komersial, dan/atau kelompok industri [4], sehingga keberadaan saluran transmisi (pengiriman) dan sistem distribusi (penyaluran) menjadi suatu keharusan [5]. Keberadaan Gardu Induk (GI) atau *substation* dalam sistem tenaga listrik (*electrical power system*) dengan fungsi sebagai penaik tegangan di daerah pembangkitan maupun sebagai penurun tegangan di lokasi penghubung antara saluran transmisi dan sistem distribusi merupakan suatu keniscayaan [6]. Gardu Induk merupakan bagian penting dalam sistem tenaga listrik [7], termasuk keberadaan pemutus tenaga (PMT) bermedia minyak jenis *bulk oil circuit breaker (BOCB)* [8] atau lainnya, juga sebagai bentuk dukungan terhadap upaya pengiriman dan penyaluran tenaga listrik ke konsumen [6],[9]. Kebutuhan terhadap keberadaan GI didasarkan kepada pertimbangan praktis dan teknis [10]. Pertimbangan praktis berupa (i) pemenuhan terhadap pertumbuhan beban-beban listrik, (ii) pengakomodasian terhadap pembangkit-pembangkit baru, dan (iii) penjagaan (*maintaining*) terhadap pemenuhan keadilan sistem [10]. Pertimbangan teknis ditekankan kepada (i) penggunaan transformator sebagai penaik atau penurun tegangan arus bolak-balik (*alternating current, ac*), (ii) pengalihan aliran listrik akibat keberadaan saluran lain yang terganggu, dan (iii) pemberian dukungan terhadap proses keberlangsungan dan keberlanjutan (*ongoing and sustainability*) aliran daya (*power flow*) [10].

Peranan GI demikian besar dan penting [10],[9], telah terciptakan upaya untuk perlindungan (proteksi) terhadap GI dari gangguan secara elektrik maupun non-elektrik [11], [12]. Salah satu upaya perlindungan terhadap gangguan elektrik, berupa pembuatan sistem pembumian untuk GI [9]-[12]. Dua alasan penting keberadaan sistem pembumian di GI [11]-[16], yaitu (a) penyediaan prasarana untuk penyaluran arus listrik gangguan ke bumi yang tidak lebih dari nilai batas operasi peralatan dan (b) penyediaan lingkungan yang aman untuk perlindungan personal di sekitar fasilitas pembumian dari bahaya sengatan listrik karena kondisi kesalahan, yaitu terbebas dari bahaya tegangan langkah dan sentuh. Cakupan sistem pembumian meliputi semua fasilitas pembumian yang saling terhubung di area GI, termasuk jaring pembumian (*grounding grids*), kawat pembumian saluran udara (*overhead ground wire*), konduktor netral, kabel daya dalam tanah (*underground power cable*), semua pondasi bangunan, sumur-sumur dalam (*deep wells*), dan lainnya [13]. Jaring atau anyaman pembumian terdiri atas jaring atau jala-jala konduktor yang ditanam secara horizontal dan elektrode bumi (*ground rods*) terbuat dari logam yang saling dihubungkan [11]. Perancangan anyaman pembumian digunakan untuk pengendalian level tegangan pada nilai aman dan harus dengan pertimbangan terhadap sistem pembumian secara keseluruhan sebagai penyedia sistem yang aman dengan biaya ekonomis [17],[18].

Lokasi dan penempatan sistem pembumian GI tidak terlepas dari problematika penyediaan luas tanah yang berkaitan dengan kebutuhan untuk konstruksi bangunan maupun sistem pembumiannya [19]-[22]. Penempatan GI di kawasan dengan nilai jual tanah sangat tinggi, telah menjadi kendala tersendiri [23]. Solusi terhadap hal itu, dapat ditempuh dengan konstruksi GI yang sangat kompak (tidak terlalu diperlukan luas tanah sebagaimana GI konvensional), sedangkan terhadap masalah luas tanah untuk tempat sistem pembumian dapat ditempuh dengan perencanaan yang teliti untuk perolehan luas tanah seminimum mungkin [23]. Pemasangan sistem pembumian diperlukan untuk tempat-tempat dengan: (i) pengaruh tegangan pembumian dibatasi pada suatu nilai tertentu yang tidak berbahaya bagi keamanan seseorang, (ii) peralatan dalam kondisi normal dan gangguan, dan (iii) jaminan kesinambungan pelayanan [11]-[16]. Sistem pembumian pada area pembangkitan tenaga listrik, biasanya merupakan suatu *grid* [24], yaitu gabungan antara elektrode bumi (batang logam berbentuk silinder) ditanam secara vertikal di dalam tanah [25]-[30] dan konduktor (*bare conductor*) yang dibuat saling berhubungan berbentuk suatu *grid* atau jaring atau anyaman yang ditanam secara horizontal di dalam tanah [11]-[16],[24], sehingga dapat digunakan istilah sistem pembumian elektrode dan konduktor jaring atau dikenal dengan model *grid* atau *grounding grid* [11]-[16],[24],[31],[32].

Tinjauan teoritis terhadap pelaksanaan prosedur konstruksi ini didasarkan kepada sejumlah standar, yaitu sesuai IEEE Std 80-2013 [11], IEEE Std 81-2012 [19], IEEE Std 665-2011 [24], IEEE Std 837-2014 [33], dan CEI/IEC 497-1: 1994 [17] untuk perolehan sejumlah tujuan. Tujuan pada tinjauan teoritis ini, memperoleh (a) penetapan pemilihan konduktor dan sambungan; (b) penentuan kondisi tanah; (c) perhitungan nilai resistans bumi pada sistem pembumian; (d) perhitungan arus *grid* maksimum; dan (e) perhitungan tegangan mesh dan langkah, dan (f) diagram alir pelaksanaan

prosedur konstruksi [11]. Pemilihan konduktor dan sambungan, meliputi (i) material dan ukuran konduktor dan (ii) sambungan. Penentuan kondisi tanah, meliputi struktur, resistivitas, dan model tanah. Perhitungan nilai resistans bumi pada sistem pembumian berkenaan dengan jumlah lapisan dan keseragaman tanah. Perhitungan arus *grid* maksimum, meliputi (i) penentuan lokasi dan jenis gangguan terburuk, (ii) penghitungan faktor pembagi arus gangguan, (iii) penghitungan faktor penurunan, dan (iv) penentuan faktor koreksi proyeksi. Perhitungan tegangan *mesh* dan langkah, meliputi (i) tegangan *mesh* (*mesh voltage*) dan (ii) tegangan langkah (*step voltage*), (iii) batasan-batasan untuk tegangan *mesh* dan langkah, dan (iv) panjang minimum konduktor tertanam.

2. METODE PENELITIAN

2.1 Bahan

Tinjauan terhadap sejumlah pustaka berkenaan dengan pelaksanaan prosedur konstruksi sistem pembumian model *grid*, meliputi (a) konsepsi umum dasar-dasar prosedur, (b) aspek-aspek dasar untuk prosedur, (c) kriteria dalam prosedur, dan (d) parameter-parameter kritis.

2.1.1 Konsepsi umum dasar-dasar pelaksanaan prosedur

Dua alasan penting sehubungan dengan pemakaian sistem pembumian model *grid* [11], adalah (i) di dalam suatu GI, sebuah batang elektrode bumi tunggal tidak cukup untuk penjaminan keamanan sistem pembumian, sehingga dalam perkembangannya, ketika beberapa batang elektrode bumi dihubungkan satu dengan lainnya dan dihubungkan ke semua bagian netral peralatan elektrik, *body* mesin, dan struktur bangunan suatu gedung, dihasilkan sebuah bentuk *grid* pembumian dengan elektrode bumi dan (ii) untuk kondisi dimana nilai arus disipasi ke dalam tanah tinggi, hal ini perlu pemasangan sistem pembumian model *grid* dengan nilai resistans rendah untuk penjaminan, bahwa gradien tegangan tidak terbangkitkan sebagai tegangan permukaan yang berbahaya bagi seseorang. Kombinasi elektrode bumi dan *grid* diperoleh keuntungan [11], yaitu (i) bentuk *grid* pada sistem pembumian sangat efektif dalam pengurangan bahaya tegangan langkah (*step voltage*, E_{step}) dan tegangan sentuh (*touch voltage*, E_{touch}) pada permukaan tanah, saat *grid* ditanam pada kedalaman 0,3-0,5 meter di bawah permukaan bumi [34],[35]; (ii) elektrode bumi tertanam di dalam bumi sangat efektif dalam penetralisasian nilai arus gangguan apabila bertemu dengan tanah bumi yang berlapis-lapis dan lapisan tanah tersebut dengan nilai resistivitas elektrik lebih tinggi dari lapisan di bawahnya; dan (iii) jika elektrode bumi yang dipasang lebih tertonjolkan sepanjang sekeliling *grid* dalam kondisi tanah yang tidak *uniform* (seragam), elektrode bumi berpotensi sebagai penambah nilai gradien tegangan dekat cabang di sekelilingnya. Keadaan umum keberadaan elektrode bumi dalam sistem pembumian terdapat 2 (dua) grup pembumian, yaitu (i) grup elektrode bumi utama dan (ii) grup elektrode bumi bantu [25]-[30]. Grup elektrode bumi utama dirancang khusus untuk perlepasan arus gangguan ke dalam bumi, sedangkan grup elektrode bumi bantu direncanakan terbatas atau tertentu dalam implementasinya [11],[16], [25]-[30].

2.1.2 Aspek-aspek dasar untuk pelaksanaan prosedur

Prosedur pelaksanaan konstruksi terhadap sistem pembumian model *grid* biasanya dimulai dari peninjauan lokasi, diobservasi semua peralatan utama, dan keberadaan struktur bangunan. Untuk penentuan ide dasar dan konsepsi model *grid*, beberapa hal dapat dijadikan patokan untuk awal pelaksanaan [11,19]. *Loop* konduktor dipasang secara praktis untuk penutupan bagian areal GI. Penutupan areal tersebut digunakan untuk pengurangan konsentrasi arus yang besar dan gradien tegangan yang tinggi antara daerah *grid* dan ujung kawat, selain untuk pengurangan nilai resistans pembumian model *grid* [11]-[16],[34]. Uraian berkenaan dengan hal itu, yaitu:

- (a) Dalam *loop*, konduktor terletak secara paralel dengan *grid* sepanjang struktur bangunan dan di sela-sela peralatan untuk kemudahan pemasangan kawat pembumian pada peralatan [11];
- (b) Sebuah bentuk sistem *grid* untuk GI dapat digunakan konduktor tembaga ukuran 4 mm² ditanam pada kedalaman 0,3-0,5 m di bawah permukaan dan jarak antar konduktor 3-7 meter, setiap percabangan atau persilangan, konduktor diikat bersama, elektrode bumi dapat dipasang di setiap percabangan atau pada setiap 2 (dua) percabangan atau ditempatkan pada peralatan yang penting [11]; dan
- (c) Sistem *grid* dapat diperluas pada sebuah GI dan sering lebih dari garis pagar, kawat berserat banyak atau dengan diameter lebih besar dapat digunakan pada tempat-tempat dengan konsentrasi arus tinggi yang mungkin terjadi, seperti pada generator atau susunan kapasitor atau lainnya [11].

2.1.3 Kriteria dalam prosedur

Kemungkinan terburuk keberadaan tegangan sentuh di dalam GI berupa tegangan *mesh*, sedangkan tegangan langkah kurang begitu berbahaya, jika dibandingkan dengan tegangan *mesh*. Untuk pengurangan tegangan langkah dapat dilakukan dengan penanaman kerikil atau batu pada permukaan tanah untuk perolehan nilai resistans yang cukup tinggi [11]. Untuk ruang *grid* pembumian yang sama, tegangan *mesh* bertambah dari titik tengah ke sudut *grid*. Penambahan tersebut bergantung kepada ukuran *grid*, jumlah dan letak elektroda, jarak paralel penghantar, diameter dan kedalaman penanaman konduktor, dan resistans dan struktur tanah. Jenis *grid* pembumian di dalam tanah dengan resistivitas tanah seragam dan ukuran *grid*, dihasilkan perbandingan tegangan *mesh*. Rasio tegangan *mesh* dari posisi pojok ke tengah [11], seperti ditunjukkan pada Tabel 1.

Tabel 1 Rasio tegangan *mesh* dari posisi pojok ke tengah

Ukuran <i>Grid</i> (<i>meshes</i> . <i>meshes</i>)	Tegangan <i>mesh</i> (sudut/tengah)
10 . 10	2,71
20 . 20	5,55
30 . 30	8,85

Grid pembumian berbentuk segi empat dan jarak antar penghantar paralel sama, tanpa elektrode. Tegangan *mesh* dihitung di tengah-tengah *grid* [11], [16].

2.1.4 Parameter-parameter Kritis

Parameter-parameter kritis, meliputi (i) arus maksimum *grid* ($I_{grid,maks.}$), (ii) waktu gangguan ($t_{trouble}$) dan waktu kejut (t_{shock}), (iii) resistivitas tanah (ρ), (iv) resistivitas lapisan permukaan ($\rho_{surface}$), dan (v) ukuran *grid* pembumian [11],[16]. Nilai waktu gangguan dan kejut pada umumnya sama, kecuali kejutan yang berturut-turut (seperti penutupan kembali pada saklar). Pemilihan ini berpengaruh terhadap kecepatan peniadaan gangguan, faktor penurunan (D_f), dan aliran arus yang diizinkan pada. Nilai umum untuk $t_{trouble}$ dan t_{shock} berkisar 0,25–1 detik [19]. Tegangan gradien dan resistans *grid* secara langsung bergantung kepada resistivitas tanah. Dalam kenyataan, resistivitas tanah bervariasi, sehingga dibutuhkan data yang cukup untuk kondisi tanah yang digunakan. Penentuan resistivitas tanah dapat berpedoman pada kondisi [36]-[39], dengan (a) tanah dapat diklasifikasi dalam jenis tanah seragam, apabila perbedaan antara dua nilai pengetesan terbaik dan terburuk tidak lebih dari 30% dan (b) pada model tanah 2 (dua) lapis dan *grid* pembumian berada pada lapisan atas, nilai resistivitas tanah lapisan atas ($\rho_{surface}$) dapat digunakan untuk penyederhanaan persamaan, sedangkan apabila lapisan atas lebih resistif pada perencanaan dengan model tanah seragam, maka tegangan langkah dan sentuh lebih besar dibanding perencanaan dengan model tanah 2 (dua) lapis [36]-[39]. Untuk pengurangan aliran arus melalui tubuh seseorang, lapisan permukaan dapat di tambah batu kerikil, karena lapisan batu kerikil dengan resistans jenis berkisar antara 1000–5000 $\Omega.m$ [36]-[39]. Pembatasan ukuran *grid* didasarkan kepada faktor keekonomian dan teknis pemasangan. Berdasarkan faktor keekonomian, semakin besar ukuran *grid* semakin banyak bahan yang diperlukan. Ukuran luas daerah sistem pembumian merupakan salah satu faktor terpenting dalam penentuan resistans *grid* pembumian, yaitu semakin luas daerah pembumian, maka nilai resistans pembumian, *ground potential rise* (*gpr*), dan tegangan *mesh* semakin kecil [40],[41].

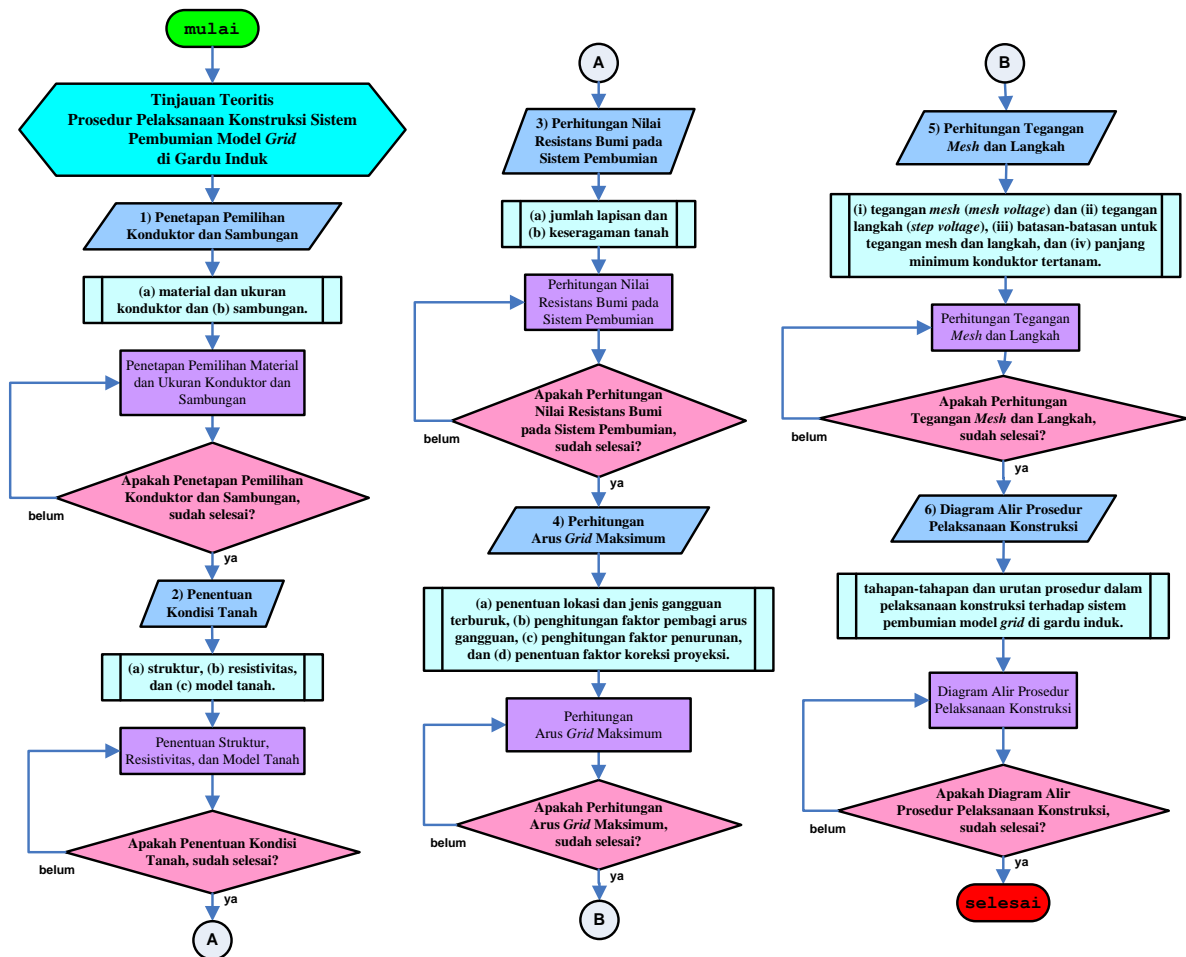
Sejumlah parameter dalam pelaksanaan prosedur konstruksi sesuai IEEE Std 80-2013 [11],[16], yaitu:

- $3I_0$ = arus gangguan simetris di dalam GI, [ampere];
- $I_{grid,maks.}$ = arus *grid* maksimum teralirkan antara *grid* pembumian dan tanah di sekitarnya termasuk komponen dc, [ampere];
- ρ_{ground} = resistivitas tanah, [$\Omega.m$];
- $\rho_{surface}$ = resistivitas tanah permukaan, [$\Omega.m$];
- $h_{surface}$ = ketebalan lapisan permukaan, [m];
- C_p = faktor proyeksi untuk pengambangan;
- $C_{surface}$ = faktor pengurangan untuk resistivitas lapisan permukaan;

- $t_{trouble}$ = keberlangsungan arus gangguan terhadap penghantar pembumian, [detik];
- t_f = keberlangsungan arus gangguan untuk faktor penurunan, [detik];
- t_{shock} = keberlangsungan arus kejut untuk penentuan arus yang diizinkan pada tubuh, [detik];
- $h_{cond.}$ = kedalaman penanaman *grid* pembumian, [meter];
- d = diameter penghantar *grid* pembumian, [mm];
- A_{ground} = luas daerah cakupan *grid* pembumian, [m²];
- D = jarak antar konduktor pada *grid* dalam posisi paralel, [meter];
- D_f = faktor penurunan untuk penentuan arus *grid* maksimum ($I_{grid,maks.}$);
- N = jumlah konduktor pada posisi paralel dalam satu sisi;
- K_{mesh} = faktor jarak untuk penentuan tegangan *mesh* (E_{mesh});
- K_{step} = faktor koreksi terhadap tegangan langkah (E_{step});
- K_i = faktor koreksi terhadap ukuran panjang pada penyesuaian dan pengaruh konduktor;
- K_{ii} = faktor koreksi terhadap ukuran berat pada penyesuaian dan pengaruh konduktor;
- K_h = faktor koreksi berat pada pengaruh panjang konduktor;
- $L_{tot.}$ = jumlah panjang konduktor *grid* dan elektrode;
- R_{ground} = nilai resistans system pembumian, [Ω];
- E_{mesh} = tegangan mesh pada titik pusat dari sudut *mesh*, [volt];
- E_{step} = tegangan langkah antara titik di atas pojok luar grid dengan suatu titik berjarak 1 meter dari diagonal sisi luar grid, [volt];
- E_{touch}^{50} = tegangan sentuh (*touch*) yang diizinkan (untuk berat seseorang = 50 kg);
- E_{touch}^{70} = tegangan sentuh (*touch*) yang diizinkan (untuk berat seseorang = 70 kg);
- E_{step}^{50} = tegangan langkah (*step*) yang diizinkan (untuk berat seseorang = 50 kg); dan
- E_{step}^{70} = tegangan langkah (*step*) yang diizinkan (untuk berat seseorang = 70 kg).

2.2. Metode

Metode merupakan urutan tahapan-tahapan dalam pembuatan tinjauan teoritis untuk sebuah prosedur pelaksanaan konstruksi sistem pembumian model *grid* yang didasarkan kepada sejumlah standar Internasional maupun standar nasional Indonesia (SNI), agar sesuai tujuan pembuatan tinjauan teoritis ini. Diagram alir metode penyusunan tinjauan teoritis prosedur pelaksanaan konstruksi sistem pembumian di gardu induk, seperti ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1 Diagram alir metode penyusunan tinjauan teoritis prosedur pelaksanaan konstruksi sistem pembumian di gardu induk

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Pemilihan Konduktor dan Sambungan

3.1.1 Material dan ukuran konduktor

Setiap elemen sistem pembumian, termasuk konduktor untuk *grid*, sambungan-sambungan, kawat-kawat penghubung, dan elektrode bumi harus sesuai kriteria [40],[41], yaitu: (i) nilai konduktivitas cukup, agar tidak sebagai penyumbang pada perbedaan tegangan di titik pembumian; (ii) tahan terhadap kerusakan mekanis dalam kondisi nilai arus gangguan dan waktu keberlangsungan gangguan; dan (iii) secara mekanis dapat diandalkan dan kuat, khususnya pada lokasi yang berakibat korosi atau tidak terlindungi dari korosi. Bahan tembaga sering digunakan, karena (i) nilai konduktivitas tinggi dan (ii) tahan terhadap korosi saat digunakan di dalam tanah, karena tembaga bersifat katode terhadap bahan lain. Tembaga yang diperkuat baja biasa digunakan untuk elektrode bumi dan kadang-kadang untuk konduktor *grid* [11],[16].

Bahan aluminium juga dapat digunakan, meskipun dalam frekuensi yang lebih sedikit. Penggunaan aluminium harus diperhatikan tingkat kemurniannya. Dua kerugian yang perlu diperhatikan berkaitan penggunaan aluminium, yaitu (i) aluminium dapat rusak dengan sendirinya, khususnya yang ditanam dalam tanah (bagian yang rusak ini menjadi kurang konduktif untuk penggunaan pembumian) dan (ii) kerusakan yang disebabkan oleh arus bolak-balik, juga dapat ditimbulkan sejumlah masalah dalam beberapa kondisi. Baja juga digunakan untuk konduktor pembumian model *grid* di beberapa negara Eropa dan berangsur-angsur diterima secara luas di Amerika, utamanya untuk perbaikan kekurangan-kekurangan yang ada pada tembaga, seperti kekuatan mekanis. Hal tersebut juga berkaitan dengan pengurangan biaya pelaksanaan terhadap sistem pembumian, karena penggunaan tembaga. Untuk penggunaan baja sebagai bahan konduktor atau lainnya, biasanya dalam bentuk baja galvanis atau baja anti karat dan diproteksi terhadap sifat

katodik. Permasalahan korosi dan proteksi katodik merupakan permasalahan yang kompleks pada perencanaan sistem di dalam tanah.

Kenaikan nilai suhu saat berlangsung gangguan hubung singkat dapat ditentukan dengan persamaan Sverak [31],[34], seperti pada persamaan (1).

$$I = A_{cond.} \cdot \sqrt{\left(\frac{TCAP \cdot 10^{-4}}{t_c \cdot \alpha_r \cdot \rho_{cond.,r}}\right) \ln \frac{K_0 + T_m}{K_0 + T_a}} \tag{1}$$

dengan:

I = arus efektif (*root mean square, rms*), [kA];

$A_{cond.}$ = luas penampang konduktor, [mm²];

$TCAP$ = kapasitas termal per satuan volume, [Joule/cm³/°C];

t_c = waktu aliran arus listrik, [detik];

α_r = koefisien panas resistivitas konduktor pada T_r (suhu referensi untuk konstanta benda), [°C];

$\rho_{cond.,r}$ = resistivitas konduktor pembumihan pada suhu referensi, [$\mu\Omega$.cm];

$K_0 = \frac{1}{\alpha_0} = \frac{1}{\alpha_r} - T_r$, dengan α_0 = koefisien panas resistivitas pada 0 °C;

T_m = suhu maksimum yang diizinkan (*fusing temperature*), [°C]; dan

T_a = suhu kamar, [°C].

Parameter-parameter tersebut diperlukan untuk penentuan daya hantar arus pada suatu konduktor. Konstanta-konstanta bahan pada konduktor [11],[16], seperti ditunjukkan pada Tabel 2.

Tabel 2 Konstanta-konstanta bahan pada konduktor

Uraian	Kond. Mat. (%)	α_r pada 20 °C	$K_0 = \frac{1}{\alpha_r}$	Fusing Temp. T_m (°C)	ρ_r pada 20 °C	$TCAP$ J/cm ³ /°C
Standard Annealed Soft Copper Wire	100,0	0,00393	234	1083	1,7241	3,422
Commercial Hard Drawn Copper Wire	97,0	0,00381	242	1084	1,7774	3,422
Copper Clad Steel Core Wire	40,0	0,00378	245	1084 / 1300	4,3970	3,846
Copper Clad Steel Core Wire	30,0	0,00378	245	1084 / 1300	5,8620	2,556
Commercial EC Alluminium Wire	61,0	0,00403	228	657	2,8620	2,556
Alluminium Alloy Wire 5005	53,5	0,00353	263	660	3,2226	2,598
Alluminium Alloy Wire 6201	52,5	0,00347	268	660	3,2840	2,598
Alluminium Clad Steel Core Wire	20,3	0,00360	258	660 / 1300	8,4805	2,670
Zinc Coated Steel Core Wire	8,5	0,00320	293	419 / 1300	20,1000	3,931
Stainless Steel No. 304	2,4	0,00130	749	1400	72,0000	4,032

Penggunaan satuan *circulair mil (cmil)* untuk penampang konduktor, maka persamaan (1) diubah menjadi persamaan (2).

$$I = 5,0671 \cdot 10^{-6} \cdot A_{cond.} \cdot \sqrt{\left(\frac{TCAP}{t_c \cdot \alpha_r \cdot \rho_{cond.,r}}\right) \ln \frac{K_0 + T_m}{K_0 + T_a}} \tag{2}$$

Bahan tembaga dengan resistivitas ($\rho_{cond.,r}$) sebesar 1,589 $\mu\Omega$.cm pada suhu 0 °C, dengan $TCAP$ = 3,4964 joule/cm³/°C dan koefisien suhu = 0,004274 pada suhu 0°C dinyatakan oleh Onderhonk's [31],[34] untuk pengubahan persamaan (2) menjadi persamaan (3).

$$I = A_{cond.} \cdot \sqrt{\left(\frac{1}{33 s}\right) \log_{10} \left(1 + \frac{T_m - T_a}{234 + T_a}\right)} \quad (3)$$

dengan:

s = waktu selama arus digunakan, [detik].

Dalam penentuan nilai $TCAP$, perlu diketahui terlebih dahulu hubungan antara (i) panas spesifik (kal./gr.⁰C), (ii) berat spesifik (gr./cm³), dan (iii) kapasitas per unit (watt.detik/cm³/⁰C), yaitu (kal./gr.⁰C).(gr./cm³) = 4,184 (watt.detik/cm³/⁰C) = 4,184 (joule/cm³/⁰C) [5]. Berdasarkan nilai-nilai tersebut, $TCAP$ [11],[16], didefinisikan seperti pada persamaan (4).

$$TCAP = 4,184 \cdot SH \cdot SW \quad (4)$$

dengan:

SH = *Specific Heat*, panas spesifik, (kal./gr.⁰C);

SW = *Specific Weight*, berat spesifik (gr./cm³).

Berdasarkan penggunaan persamaan (1) dan (3), dapat ditentukan luas penampang (dalam satuan mm²) konduktor yang digunakan [11],[16], seperti ditunjukkan pada persamaan (5).

$$A_{cond.} = I \cdot \sqrt{\frac{t_c \cdot \alpha_r \cdot \rho_{cond.,r} \cdot 10^4}{TCAP \cdot \ln \left(1 + \frac{T_m - T_a}{K_0 + T_a}\right)}} \quad (5)$$

Penggunaan luas penampang konduktor dalam satuan *cmil*, dihitung dengan persamaan (6).

$$A_{cond.} = 1973,52 \cdot I \cdot \sqrt{\frac{t_c \cdot \alpha_r \cdot \rho_{cond.,r} \cdot 10^4}{TCAP \cdot \ln \left(1 + \frac{T_m - T_a}{K_0 + T_a}\right)}} \quad (6)$$

3.1.2 Pemilihan sambungan

Semua sambungan sebagai penghubung antara bagian penting dan sistem pembumian secara terus-menerus harus dievaluasi dalam hal konduktivitas, kemampuan terhadap panas, kekuatan mekanik, dan ketahanan. Hal itu sebagai bentuk penjaminan, bahwa kondisi sambungan tidak menjadi buruk akibat korosi dan tekanan elektromagnetik [33],[11],[16].

3.2. Penentuan Kondisi Tanah

3.2.1 Struktur

Penelitian tanah atau tes tanah pada lokasi GI atau instalasi sangatlah penting dilakukan untuk penentuan komposisi tanah secara umum dan untuk perolehan rancangan terhadap suatu struktur tanah. Sampel tanah dan penelitian geologi lainnya diberikan dalam bentuk lapisan tanah dan material terkandung di dalamnya, sekurang-kurangnya beberapa temuan, seperti resistivitas dan nilai-nilai batasan pada daerah tersebut. Resistivitas tanah direpresentasikan dengan ρ_{ground} dan didefinisikan dengan faktor keseimbangan antara resistans pembumian dan nilai kapasitans di sekelilingnya. Sejumlah nilai resistivitas tanah pada sejumlah jenis tanah [11],[16], seperti ditunjukkan pada Tabel 3.

Tabel 3 Sejumlah nilai resistivitas jenis tanah pada sejumlah jenis tanah

Jenis Tanah	Resistivitas rerata ($\Omega.m$)
<i>Wet organic soil</i>	10
<i>Moist soil</i>	100
<i>Dry soil</i>	1000
<i>Bedrock</i>	10000

3.2.2 Resistivitas (ρ_{ground})

Suatu kawasan tertentu yang telah dilakukan penelitian terhadap struktur tanah, jarang sekali dengan nilai resistivitas tanah yang *uniform* (seragam). Struktur tanah secara umum terdiri atas beberapa lapisan dan tiap-tiap lapisan dengan nilai resistivitas berbeda. Perubahan secara bertahap ke arah vertikal, meskipun terjadi juga ke arah horizontal. Pengambilan data hasil pengukuran resistivitas tanah dilakukan terhadap beberapa titik dalam suatu lokasi. Sejumlah teknik pengukuran diterangkan secara detail dalam IEEE Std 81-2012 [19]. Metode 4-pin Wenner [25],[11],[16]

merupakan metode umum di samping metode 3-pin yang digunakan, dilakukan dengan bantuan *earth tester* atau *megger ground tester* yang dikenal dengan metode *fall of potential* [11],[16].

3.2.3 Model

Berdasarkan hasil penyelidikan dan pengukuran terhadap resistivitas tanah, maka dapat ditentukan model tanah. Model tanah secara umum dikenal 2 (dua) jenis, yaitu model tanah seragam (*uniform*) dan tidak seragam [36]-[39]. Model tanah *uniform*, baik arah horizontal maupun vertikal dan dari hasil pengukuran diberikan nilai yang relatif sama, sehingga tanah *uniform* dengan nilai resistivitas *uniform* pada semua titik di suatu kawasan dengan sistem pembumian *grid* yang dibangun dinyatakan sama. Untuk kondisi dimana terdapat variasi nilai resistivitas yang tidak terlalu besar, maka perbedaan dapat diabaikan [36]-[39],[11],[16], Model tanah tidak *uniform* merupakan kondisi tanah tidak *uniform*, baik arah horizontal maupun vertikal dan berlapis-lapis (*multi layers*). Untuk penggunaan tanah tidak *uniform*, dikenal dengan model tanah 2 (dua) lapis (*two layers*). Sistem pembumian pada model tanah 2 lapis dengan karakter berbeda dari model tanah *uniform* [36]-[39].

3.3. Perhitungan Resistans Bumi untuk Sistem Pembumian

Sebuah sistem pembumian ideal, merupakan sistem dengan nilai resistans mendekati nol. Nilai resistans pembumian pada sebagian besar sistem saluran transmisi dan GI lebih kurang 1 Ω atau kurang, sedangkan pada gardu listrik ukuran kecil atau sistem distribusi dapat diizinkan untuk nilai 1 sampai 5 Ω yang bergantung kondisi tempat [11],[24],[16],[26],[27]. Nilai minimal resistans pembumian dapat dihitung dengan persamaan berdasarkan asumsi sebuah piringan logam tertanam pada kedalaman nol, sehingga nilai resistans bumi [11],[16] dapat ditentukan dengan persamaan (7).

$$R_{ground} = \frac{\rho_{ground}}{4} \sqrt{\frac{\pi}{A_{ground}}} \quad (7)$$

dengan:

R_{ground} = resistans pembumian, [Ω],

ρ_{ground} = resistivitas tanah (diambil rata-rata), [$\Omega.m$],

A_{ground} = luas cakupan *grid*, [m^2].

Batasan tertinggi resistans pembumian suatu GI ditentukan dengan penambahan nilai perbandingan resistivitas terhadap panjang total konduktor yang digunakan sebagai *grid* yang tertanam ke persamaan (7). Resistans pembumian yang terdiri atas sejumlah konduktor, bernilai resistans lebih tinggi dari nilai resistans piringan logam, maka persamaan (7) berubah menjadi persamaan (8) [11],[16].

$$R_{ground} = \frac{\rho_{ground}}{4} \sqrt{\frac{\pi}{A_{ground}}} + \frac{\rho_{cond}}{L_{cond}} \quad (8)$$

dengan:

L_{cond} = jumlah panjang seluruh konduktor yang ditanam (meter).

Perbedaan tersebut berkurang seiring dengan pertambahan panjang konduktor tertanam dan mendekati nilai nol untuk nilai L_{cond} tidak berhingga. Persamaan (7) dan (8) dapat digunakan untuk sistem pembumian model *grid* dengan kedalaman penanaman konduktor *grid* kurang dari 0,25 m. Untuk kedalaman penanaman konduktor *grid* 0,25-2,5 m, faktor koreksi perlu ditambahkan, sesuai pendekatan yang dikemukakan Sverak [5], seperti pada persamaan (9).

$$R_{ground} = \rho_{ground} \left[\frac{1}{L_{ground}} + \frac{1}{\sqrt{20 A_{ground}}} \left(1 + \frac{1}{1 + h_{cond} \cdot \sqrt{20/A_{ground}}} \right) \right] \quad (9)$$

dengan:

h_{cond} = kedalaman penanaman *grid*, [meter].

Pendekatan untuk *grid* tanpa batang elektrode (*ground rod*) telah dicoba di lapangan dan dihasilkan suatu persamaan seperti yang dikemukakan Schwarz [27],[11],[24],[16],[26], seperti persamaan (10).

$$R_{ground} = \frac{R_1 \cdot R_2 - R_{12}^2}{R_1 + R_2 - 2 R_{12}} \quad (10)$$

dengan:

R_1 = resistans *grid*, [Ω].

R_2 = resistans seluruh batang elektrode, [Ω].

R_{12} = resistans total (gabungan *grid* dan batang elektrode), [Ω].

Penentuan lebih lanjut oleh Schwarz [27],[11],[24],[16],[26], seperti ditunjukkan pada persamaan (11), (12), dan (13).

$$R_1 = \left(\frac{\rho_1}{\pi \cdot L_{cond.}} \right) \left[L_{tot.} \left(\frac{2 L_{cond.}}{h} \right) + K_1 \left(\frac{L_{cond.}}{\sqrt{A_{ground}}} - K_2 \right) \right] \quad (11);$$

$$R_2 = \left(\frac{\rho_2}{2 \cdot n \cdot \pi \cdot l_{rod}} \right) \left[L_{tot.} \left(\frac{8 l_{rod}}{d_{rod}} \right) - 1 + 2 K_1 \left(\frac{l_{rod}}{\sqrt{A_{ground}}} \right) (\sqrt{n-1})^2 \right] \quad (12);$$

$$R_{12} = \left(\frac{\rho_2}{2 \cdot n \cdot \pi \cdot L_{cond.}} \right) \left[L_{tot.} \left(\frac{2 L_{cond.}}{l_{rod}} \right) + K_1 \left(\frac{L_{cond.}}{\sqrt{A_{ground}}} \right) - K_2 + 1 \right] \quad (13),$$

dengan:

ρ_1 = resistivitas tanah tempat *grid* ditanam pada kedalaman $h_{cond.}$, [$\Omega \cdot m$];

ρ_2 = resistivitas tanah tempat batang elektrode tertanam, [$\Omega \cdot m$];

$L_{cond.}$ = panjang keseluruhan konduktor yang digunakan sebagai *grid* dan ditanam, [meter];

$L_{tot.}$ = panjang total konduktor dan batang elektrode, [meter];

l_{rod} = panjang rerata batang elektrode, [meter];

n = jumlah keseluruhan batang elektrode yang digunakan pada luas cakupan *grid* (A_{ground}), [jumlah batang];

$h' = \sqrt{d_{cond.} \cdot h_{cond.}}$ (untuk konduktor yang ditanam pada kedalaman $h_{cond.}$, m), atau $0,5 d_{cond.}$ (untuk konduktor yang ditanam pada $h_{cond.} = 0$);

$d_{cond.}$ = diameter konduktor;

d_{rod} = diameter batang elektrode, [m];

K_1, K_2 = konstanta-konstanta.

Persamaan (11), (12), dan (13) cocok untuk penghitungan nilai resistans pembumian pada tanah dengan model 2 lapis dengan ketebalan lapisan atas (H) dan elektrode ditanam pada lapisan yang lebih konduktif. Untuk kasus $\rho_1 \geq \rho_2$, dengan *grid* ditanam pada lapisan tanah dengan resistivitas ρ_1 dan elektrode ditanam di lapisan tanah dengan resistivitas ρ_1 dan ρ_2 , maka nilai R_2 dan R_{12} dapat dihitung penggunaan resistivitas antara keduanya ($\rho_{mut.}$) atau dinyatakan:

$$\rho_{mut.} = \frac{l_{rod} (\rho_1 \cdot \rho_H)}{[\rho_H (H - h_{cond.}) + \rho_1 (l_{rod} + h_{cond.} - H)]} \quad (14),$$

dengan:

H = ketebalan lapisan atas, [m];

ρ_1 = resistivitas tanah di bawah kedalaman lapisan atas H , [$\Omega \cdot m$].

Nilai perbedaan yang terjadi antara nilai ρ_1 dan ρ_H tidak begitu besar (nilai ρ_H tidak kurang dari 0,2 ρ_1) dan ketebalan lapisan atas (H) sekurang-kurangnya 0,1 sisi panjang *grid*, hasil perhitungan cukup akurat dan dapat digunakan.

3.4 Perhitungan Arus Grid Maksimum

Nilai arus *grid* maksimum yang diizinkan dirumuskan sebagai berikut:

$$I_{grid, maks.} = C_p \cdot D_f \cdot I_{grid, rms} \quad (15),$$

dengan:

$I_{grid, maks.}$ = arus *grid* maksimum yang mengalir antara *grid* pembumian dan tanah di sekitarnya termasuk komponen *dc*, [ampere],

C_p = faktor koreksi proyeksi untuk pengembangan yang dihitung untuk penambahan arus gangguan selama umur pakai GI (GI tanpa pengembangan, nilai $C_p = 1$),

D_f = faktor penurunan untuk menentukan $I_{grid, maks}$.

$I_{grid, rms}$ = arus *grid rms* simetris, [ampere].

Arus *grid rms* simetris, adalah bagian arus gangguan pembumian simetris yang mengalir di antara *grid* dan tanah di sekitarnya, nilai arus *grid rms* simetris dirumuskan:

$$I_{grid, rms} = S_f \cdot I_f \quad (16),$$

dengan:

S_f = faktor arus gangguan divisi,

I_f = nilai *rms* arus gangguan pembumian, [ampere].

Faktor arus gangguan divisi (S_f), adalah sebuah faktor perrefleksi nilai arus gangguan (yaitu perbandingan terbalik arus gangguan simetris terhadap bagian arus yang mengalir antara *grid* pembumian dan tanah di sekitarnya), besarnya:

$$S_f = \frac{I_{grid, rms}}{3 I_0} \quad (17).$$

3.4.1 Penentuan lokasi dan jenis gangguan terburuk

Jenis gangguan terburuk untuk sistem pembumian cenderung dihasilkan arus *grid* (I_g) maksimum yang tinggi nilainya. Jenis gangguan terburuk didefinisikan sebagai sesuatu nilai arus urutan nol yang tinggi ke bumi, yaitu arus gangguan simetris di dalam GI ($3 I_0$). Untuk gangguan 1 (satu) fase ke *ground* menjadi gangguan terburuk, jika $Z_0 \cdot Z_1 > Z_2^2$, sedangkan untuk gangguan 2 (dua) fase ke *ground* menjadi gangguan terburuk, jika $Z_0 \cdot Z_1 < Z_2^2$, dengan kondisi masing-masing diasumsikan $Z_2 = Z_1$, maka sehingga masing-masing menjadi $Z_0 > Z_1$ dan $Z_0 < Z_1$.

3.4.2 Penghitungan faktor pembagi arus gangguan (S_f)

Asumsi keberadaan arus urutan nol dengan aliran terus-menerus sejak awal untuk keseluruhan gangguan ($I_0 = I_0'' = \text{konstan}$), maka arus *grid rms* simetris dihitung dengan persamaan (17).

$$I_{grid, rms} = S_f \cdot (3 I_0) \quad (18).$$

Untuk penentuan arus *grid rms* simetris, maka harus dihitung nilai faktor arus gangguan divisi (S_f).

Nilai faktor arus gangguan divisi bergantung kepada: (i) lokasi gangguan; (ii) besar resistans *grid* pembumian; (iii) hubungan antara sistem pembumian dengan pipa atau kawat yang ditanam di dekatnya, terhubung tau tidak; dan (iv) kawat pembumian di atas saluran udara (*overhead ground wire*), kawat nol atau bagian pembumian yang dilalui arus balik gangguan. Arus *grid rms* simetris dan arus *grid* maksimum, relatif hanya berada pada lokasi gangguan. Untuk penghitungan faktor arus gangguan divisi, maka kondisi (iii) dan (iv) tersebut diabaikan.

3.4.3 Penghitungan faktor penurunan, D_f

Arus *grid* maksimum sebagaimana telah dijelaskan, merupakan arus bolak-balik maksimum taksimetris yang terdiri atas arus bolak-balik simetris ($I_{grid, rms}$) dan komponen *dc* [24],[11],[27],[16],[26], Arus gangguan taksimetris terdiri atas komponen *ac*, transien, subtransien, dan *dc* atau tunak (*steady state*). Komponen transien, subtransien, dan *dc* berbentuk eksponensial, sehingga arus gangguan tidak simetris merupakan fungsi waktu, sehingga dihitung dengan persamaan (19) [11],[16].

$$i_f(t) = \sqrt{2} \cdot E \left[Y_{ac}(t) \cdot \cos(\omega t) + \frac{1}{Z''} \cdot e^{-t/T_a} \right] \quad (19),$$

dengan:

$i_f(t)$ = arus gangguan taksimetris, [ampere];

E = tegangan efektif (*rms*) fase-netral sebelum gangguan, [volt];

$Y_{ac}(t)$ = admitans *ac* ekuivalen sistem, [siemens] atau [mho];

Z'' = impedans subtransien sistem, [Ω];

T_a = konstanta waktu *steady state* (s) atau X/R

Nilai admitans *ac* ekivalen sistem dihitung dengan persamaan (20):

$$Y_{ac}(t) = \frac{1}{Z} + \left(\frac{1}{Z'} - \frac{1}{Z}\right) \cdot e^{-t/T'} + \left(\frac{1}{Z''} - \frac{1}{Z}\right) \cdot e^{-t/T''} \tag{20}$$

dengan:

Z = impedans *steady state* sistem, [Ω];

Z' = impedans transien sistem, [Ω];

T' = konstanta waktu transien;

T'' = konstanta waktu subtransien.

Dalam banyak analisis digunakan $Y_{ac}(t) = \frac{1}{Z''}$, sehingga arus taksimetris pada persamaan (19) berubah menjadi seperti persamaan (21) [11],[16].

$$i_f(t) = \frac{\sqrt{2} \cdot E}{Z''} \left(\cos(\omega t) + e^{-t/T_a} \right) \tag{21}$$

Nilai arus gangguan *rms* taksimetris dihitung dengan persamaan (22).

$$I_F = \sqrt{\frac{1}{t_f} \int_0^{t_f} (i_f(t))^2 \cdot dt} \tag{22}$$

dengan:

I_F = pendekatan nilai arus *rms* tak simetris selama gangguan, [ampere];

t_f = durasi (lama) waktu gangguan, [detik].

Substitusi nilai $i_f(t)$ ke persamaan (22) dan diintegrasikan, persamaan (22) berubah menjadi seperti persamaan (23) [11],[16].

$$I_F = I_f \sqrt{\frac{2}{t_f} \int_0^{t_f} \left(\cos(\omega t) + e^{-t/T_a} \right)^2 \cdot dt} \tag{23}$$

dengan $I_f = \frac{E}{Z''}$, [ampere].

Faktor penurunan D_f didefinisikan sebagai I_F/I_f (pendekatan nilai *rms* arus taksimetris selama gangguan dan nilai *rms* arus gangguan pembumian) atau digunakan persamaan (24).

$$I_f = \sqrt{1 + \frac{T_a}{t_f} \left(1 - e^{-t_f/T_a} \right)} \tag{24}$$

dengan:

T_a'' = konstanta waktu ekivalen subtransien, atau $X''/\omega R''$

Penggunaan semua konstanta di titik dimana gangguan terjadi, maka ditetapkan nilai faktor penurunan. Nilai factor penurunan (D_f) untuk berbagai durasi gangguan dengan $X/R = 20$, [24],[11],[16]., seperti ditunjukkan pada Tabel 4.

Tabel 4 Nilai faktor penurunan (D_f) untuk berbagai durasi gangguan dengan $X/R = 20$

Durasi Gangguan (t_f)	Siklus (pada 60 hertz <i>ac</i>)	D_f
0,008	0,5	1,65
0,1	6	1,25
0,25	15	1,10
0,5 atau lebih	30 atau lebih	1,00

3.4.4 Penentuan faktor koreksi proyeksi (C_p)

Faktor koreksi diperlukan pada saat awal perencanaan yang berguna untuk pengembangan di masa yang akan datang, baik penambahan kapasitas atau penyambungan baru suatu peralatan ke sistem pembumian. Untuk kasus penambahan kapasitas, maka arus gangguan (dalam hal ini



pendekatan nilai arus *rms* taksimetris selama gangguan, I_F) lebih dari arus gangguan maksimum [24],[11],[27],[16],[26]. Untuk penyambungan baru dapat terjadi penambahan atau pengurangan arus *grid* maksimum. Kondisi lokasi GI yang dalam perencanaannya tidak untuk dikembangkan, maka pembumian menjadi tidak aman. Penambahan arus *grid* maksimum (I_g) dapat dilakukan dengan penurunan nilai impedans yang digunakan dalam perhitungan atau pengalihan suatu nilai arus gangguan dengan faktor yang cocok berupa faktor koreksi proyeksi (C_p), dengan $C_p \geq 1$. Hal itu telah dikemukakan saat berkaitan dengan persamaan (15), sedangkan untuk GI tanpa pengembangan dengan nilai $C_p = 1$.

3.5 Perhitungan Tegangan Mesh dan Langkah

3.5.1 Tegangan mesh

Secara umum tegangan *mesh* dihitung dengan persamaan (25) [11],[16].

$$E_{mesh} = \frac{\rho \cdot K_{mesh} \cdot K_i \cdot I_{grid, maks.}}{L_{tot.}} \tag{25}$$

Definisi menurut Sverak [31],[34],[11],[16],[24] berkenaan dengan nilai K_{mesh} , digunakan persamaan (26).

$$K_{mesh} = \frac{1}{2\pi} \left[\ln \left(\frac{D^2}{16hd} + \frac{(D+2h)^2}{8Dd} - \frac{h}{4d} \right) + \frac{K_{ii}}{K_h} \cdot \ln \frac{8}{\pi(2n-1)} \right] \tag{26}$$

dengan:

$K_{ii} = 1$ untuk *grid* dengan elektrode sekeliling atau sudut *grid* atau

$K_{ii} = \frac{1}{(2n)^{0.5}}$ untuk *grid* tanpa elektrode atau dengan sedikit elektrode dan penempatan elektrode tidak

di sudut sekeliling *grid*;

kedalaman penanaman *grid*.

$K_h = \sqrt{1 + \frac{h}{h_0}}$ dengan nilai $h_0 = 1$ meter, berdasarkan

Nilai K_i dihitung dengan persamaan (27).

$$K_i = 0,656 + 0,172 n \tag{27}$$

Penggunaan persamaan (27), terdapat dua nilai E_{mesh} untuk *grid* dengan elektrode dan *grid* tanpa elektrode. Perhitungan nilai E_{mesh} untuk *grid* dengan elektrode digunakan persamaan (28).

$$E_{mesh} = \frac{\rho \cdot K_{mesh} \cdot K_i \cdot I_{grid, maks.}}{L_{cond.} + 1,15 l_{rod}} \tag{28}$$

sedangkan perhitungan nilai E_{mesh} untuk *grid* tanpa elektrode, digunakan persamaan (29).

$$E_{mesh} = \frac{\rho \cdot K_{mesh} \cdot K_i \cdot I_{grid, maks.}}{L_{cond.} + l_{rod}} \tag{29}$$

dengan:

l_{rod} = panjang total elektrode. Nilai 1,15 sebagai penggambaran dalam kenyataan, kepadatan arus lebih tinggi di sekeliling elektrode di konduktor *grid* [11],[16].

3.5.2 Tegangan langkah

Tegangan langkah sesuai IEEE Std 80-2013 [11] didasarkan kepada berat badan seseorang sebesar 60 kg dan nilai resistans badan sebesar 1000 ohm, seperti ditunjukkan pada persamaan (30)

$$E_{step60} = \left[1000 + 6 C_{surface} (h_{step}, K) \cdot \rho_{surface} \right] \frac{0,1365}{\sqrt{t_{shock}}} \tag{30}$$

Nilai $C_{surface}$ ditentukan penggunaan “Diagram alir prosedur perencanaan sistem pembumian di GI”, jika permukaan tanah penggunaan lapisan pengaman dengan nilai resistivitas yang tinggi, seperti lapisan batu kerikil, sedangkan nilai K merupakan faktor refleksi yang dihitung dengan persamaan (31).

$$K = \frac{(\rho_{ground} - \rho_{surface})}{(\rho_{ground} + \rho_{surface})} \quad (31).$$

Nilai t_{shock} ditentukan berdasarkan karakteristik pengoperasian *circuit breaker* (*cb*) “O-C-O” (*open-close-open*) masing diperhitungkan sebagai open-close dan close-open, sehingga 0,12 ditambah 0,12 diperoleh 0,24 detik. Dalam tinjauan teoritis ini dibulatkan menjadi 0,3 detik.

Tegangan langkah didefinisikan seperti persamaan (32).

$$E_{step} = \frac{\rho \cdot K_{mesh} \cdot K_i \cdot I_{grid, maks.}}{L_{tot.}} \quad (32),$$

dengan:

$L_{tot.} = L_{cond.} + l_{rod}$, untuk *grid* tanpa elektrode atau beberapa elektrode di tengah-tengah *grid*, atau

$L_{tot.} = L_{cond.} + 1,15 l_{rod}$, untuk *grid* dengan elektrode di sekeliling *grid*.

Penyederhanaan terhadap tegangan langkah maksimum diasumsikan terjadi di sisi luar sekeliling konduktor pada kedalaman *grid* yang sama (h). Untuk kedalaman $0,25 \leq h \leq 2,5$ meter diperoleh nilai perhitungan dengan persamaan (33).

$$K_{step} = \frac{1}{\pi} \left[\frac{1}{2h} + \frac{1}{D+d} + \frac{1}{D} (1 - 0,5^{n-2}) \right] \quad (33).$$

Kedalaman kurang dari 0,25 meter diperoleh nilai yang dihitung dengan persamaan (34).

$$K_{step} = \frac{1}{\pi} \left(\frac{1}{2h} + \frac{1}{D+d} + \frac{1}{D} W \right) \quad (34),$$

dengan:

$$W = \frac{1}{2} + \frac{1}{3} + \frac{1}{4} + \dots + \frac{1}{n-1}.$$

Untuk $n \geq 6$, maka nilai W , adalah

$$W = \frac{1}{2(n-1)} + \ln(n-1) - 0,423$$

3.5.3 Batasan-batasan untuk tegangan mesh dan langkah

Penggunaan persamaan (27) sampai (34) untuk penentuan E_{mesh} dan E_{step} perlu dilakukan

beberapa batasan, yaitu (i) $n \leq 25$ meter; (ii) $0,25 \leq h \leq 2,5$; (iii) $d < 0,25 h$; dan (iv) $D > 2,5$ meter. Batasan tersebut berlaku untuk *grid* berbentuk segi empat atau persegi panjang dengan sejumlah konduktor. Pembatasan tersebut berkaitan dengan beberapa kasus ditemukan ketidakakuratan hasil perhitungan. Implementasi terhadap *grid* empat persegi panjang dengan jarak antar konduktor sama, nilai n untuk penentuan E_{mesh} pada perhitungan K_{mesh} dan K_i digunakan persamaan (35).

$$n = \sqrt{n_A \cdot n_B} \quad (35),$$

dengan n_A dan n_B , adalah jumlah konduktor pada masing-masing sisi (sisi membujur dan melintang).

Untuk penentuan E_{step} pada perhitungan nilai K_{step} dan K_i digunakan nilai n maksimum, yaitu penggunaan nilai n_A dan n_B terbesar (maksimum) atau seperti persamaan (36).

$$n = maks. (n_A, n_B) \quad (36).$$

3.5.4 Panjang minimum konduktor tertanam

Perhitungan awal untuk konduktor tertanam, berpedoman pada ketentuan, bahwa tegangan sentuh maksimum di dalam daerah pembumian harus di bawah nilai aman. Berdasarkan nilai aman tersebut, maka nilai E_{mesh} lebih kecil dari E_{touch} atau $E_{mesh} < E_{touch}$. Tegangan sentuh tersebut berdasarkan IEEE Std 80-2013 [11], didasarkan kepada berat badan seseorang sebesar 60 kg dengan penggunaan persamaan (37).

$$E_{touch 60} = \left[1000 + 6 C_{surface} (h_{step}, K) \cdot \rho_{surface} \right] \frac{0,1365}{\sqrt{t_{shock}}} \quad (37).$$

Penggunaan persamaan (37) yang disubstitusi ke persamaan yang dikemukakan oleh Dalziel [42] sebagai konversi tegangan sentuh pada seseorang. Perhitungan tegangan sentuh untuk seseorang dengan berat badan 50 dan 70 kg, digunakan persamaan (38) dan (39) [42],[11],[16].

dan

$$E_{touch\ 50} = [1000 + 6 C_{surface}(h_{step}, K) \cdot \rho_{surface}] \frac{0,116}{\sqrt{t_{shock}}} \quad (38),$$

$$E_{touch\ 70} = [1000 + 6 C_{surface}(h_{step}, K) \cdot \rho_{surface}] \frac{0,157}{\sqrt{t_{shock}}} \quad (39),$$

sehingga diperoleh:

$$\frac{\rho \cdot K_{mesh} \cdot K_i \cdot I_{grid, maks.}}{L} < [1000 + 1,5 C_{surface}(h_{step}, K) \cdot \rho_{surface}] \frac{0,116}{\sqrt{t_{shock}}} \quad (40).$$

Berdasarkan persamaan (40) diperoleh panjang konduktor minimum untuk $E_{mesh} < E_{touch\ 50}$, seperti persamaan (41) [42],[11],[16].

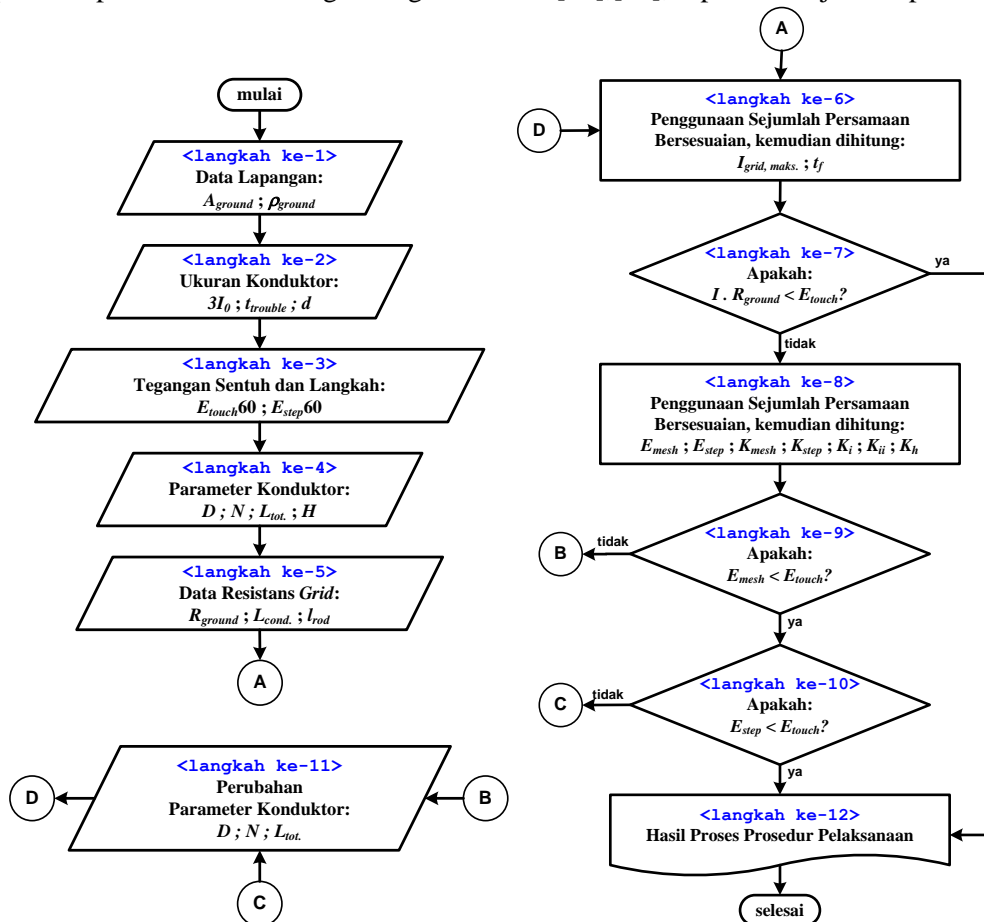
$$L > \frac{\rho \cdot K_{mesh} \cdot K_i \cdot I_{grid, maks.} \cdot \sqrt{t_{shock}}}{[16 + 0,174 \cdot C_{surface}(h_{step}, K) \cdot \rho_{surface}]} \quad (41),$$

Panjang konduktor minimum untuk $E_{mesh} < E_{touch\ 70}$ digunakan persamaan (42).

$$L > \frac{\rho \cdot K_{mesh} \cdot K_i \cdot I_{grid, maks.} \cdot \sqrt{t_{shock}}}{[157 + 0,235 \cdot C_{surface}(h_{step}, K) \cdot \rho_{surface}]} \quad (42).$$

3.6 Diagram Alir Tahapan dan Urutan Prosedur

Tahapan dan urutan prosedur dibuat dalam bentuk diagram berdasarkan tahapan-tahapan perolehan tujuan penelitian. Diagram alir tahapan dan urutan prosedur pelaksanaan konstruksi terhadap sistem pembumian model grid di gardu induk [11],[16], seperti ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 2 Diagram alir tahapan dan urutan prosedur pelaksanaan konstruksi terhadap sistem pembumian model grid di gardu induk

4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil dan pembahasan, maka ditarik kesimpulan sesuai tujuan, yaitu (1) Setiap elemen sistem pembumian model *grid*, harus dengan kriteria konduktivitas cukup, tahan terhadap kerusakan mekanis, dan secara mekanis dapat diandalkan dan kuat. Bahan tembaga dan aluminium menjadi pilihan; (2) Penentuan kondisi tanah didasarkan kepada (i) struktur, (ii) nilai resistivitas, dan (iii) model tanah; (3) Perhitungan nilai resistans bumi pada sistem pembumian berkenaan dengan jumlah lapisan dan keseragaman tanah; (4) Perhitungan arus *grid* maksimum, meliputi (i) penentuan lokasi dan jenis gangguan terburuk, (ii) penghitungan faktor pembagi arus gangguan, (iii) penghitungan faktor penurunan, dan (iv) penentuan faktor koreksi proyeksi; (5) Perhitungan tegangan *mesh* dan langkah, meliputi (i) tegangan *mesh* (*mesh voltage*) dan (ii) tegangan langkah (*step voltage*), (iii) batasan-batasan untuk tegangan *mesh* dan langkah, dan (iv) panjang minimum konduktor tertanam; dan (6) Diagram alir pelaksanaan prosedur konstruksi sistem pembumian model *grid* merupakan urutan kriteria parameter-parameter yang wajib dipenuhi untuk perolehan sistem pengaman yang efisien, tetapi aman bagi manusia sesuai standard *IEEE*. Rekomendasi terhadap hasil tinjauan teoritis ini digunakan untuk publikasi lanjutan, berupa implementasi yaitu procedure konstruksi diimplementasikan untuk evaluasi sejumlah sistem pembumian di gardu induk penaik tegangan di area pembangkitan atau gardu induk penurun tegangan.

REFERENSI

- [1] S.L. Uppal, "Chapter 24 Static Substation," in *Electrical Power*. Delhi: Khanna Publisher, 1984, pp. 752-776.
- [2] A. Arismunandar, S. Kuwahara, *Buku Pegangan Teknik Tenaga Listrik: Jilid I Pembangkit dengan Tenaga Air*, Cetakan Kelima. Jakarta: Pradnya Paramita, 1991.
- [3] U.S. Department of Energy, Office of Electricity Delivery and Energy Reliability. (published 2015, July). *United States Electricity Industry Primer*. [Online]. DOE/OE-0017, p. 4. Available: <https://www.energy.gov/sites/prod/files/2015/12/f28/united-states-electricity-industry-primer.pdf>
- [4] World Energy Council, *World Energy Resources 2016*. [Online]. (24th edition of the World Energy Resources report), pp. 3-11. Available: <https://www.worldenergy.org/wp-content/uploads/2016/10/World-Energy-Resources-Full-report-2016.10.03.pdf>
- [5] UK Essays. (published 2015, March 23; viewed 24th Jan. 2018). General Structure of Electrical Power System Engineering. [Online]. Available: <https://www.ukessays.com/essays/engineering/general-structure-of-electrical-power-system-engineering-essay.php?cref=1>.
- [6] J. Burke, "How a Substation Happens," in *The Electric Power Engineering Handbook: Electric Power Substations Engineering*, Third Edition, (J.D. McDonald, ed.). Boca Raton, FL: CRC Press, 2012, pp. 1-7.
- [7] M. Zhang. (2015, Apr. 1-3). "Energy Technology Exploration of Element Power Transmission and Distribution System," in *Proc. of International Conference International Conference on Mechatronics, Electronic, Industrial and Control Engineering (MEIC 2015)*, Shenyang, China. [Online]. *Advances in Engineering Research* Volume 8, pp. 1302-1305. Available: http://download.atlantis-press.com/php/download_paper.php?id=19930
- [8] A. Goeritno, S. Rasiman. (published 15th June 2017). "Performance of Bulk Oil Circuit Breaker (BOCB) Influenced by Its Parameters (Case Study at the Substation of Bogor Baru)," in *The 3rd International Conference on Engineering, Technology and Industrial Application (ICETIA)*. [Online]. Available: <http://aip.scitation.org/doi/pdf/10.1063/1.4985446>
- [9] J. Randolph, P.C. Bolin, and A.L. Clapp, "Substation," in *Standard Handbook for Electrical Engineers*, H.W. Beaty and D.G. Fink (editors). New York, NY: McGraw-Hill, 2013, pp. 17.2-17.5.
- [10] Power Systems Engineering. (published 30th May 2012; viewed 24th Jan. 2018). *Why We Need Electrical Power Substations*. [Online]. Available: <http://peguru.com/2012/05/why-d-we-need-electrical-power-substations/>

- [11] IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding, IEEE Std 80-2013 (Revision of IEEE Std 80-2000), 2015.
- [12] H.M. Khodr, G.A. Salloum, and Vladimiro Miranda. (2006, Aug. 15-18). "Grounding System Design in Electrical Substation: An Optimization Approach," in *Proc. 2006 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition: Latin America, 2006*, Caracas, Venezuela. [Online]. TDC '06 IEEE/PES, pp. 1-5. Available: <http://ieeexplore.ieee.org/document/4104575/>
- [13] C.R. Bayliss and B.J. Hardy, "Earthing and Bonding," in *Transmission and Distribution Electrical Engineering*, Third edition. Burlington, MA: Elsevier, Ltd., 2007, pp. 215-232.
- [14] R.P. Keil, "Substation Grounding," in *The Electric Power Engineering Handbook: Electric Power Substations Engineering*, Third Edition, (J.D. McDonald, ed.). Boca Raton, FL: CRC Press, 2012, pp. 1-22.
- [15] I. Baleva, "Substation Grounding," M.S. thesis, Electrical and Electronics Engineering, California State Univ., Sacramento, CA, (Aug. 3). 2012.
- [16] V. Balev and P. Charan, "Substation Grounding Optimization," M.S. thesis, Electrical and Electronics Engineering, California State Univ., Sacramento, CA, 2013.
- [17] Effects of Current Passing Through the Human Body, CIE/IEC 497-1:1994, (Revision of CIE/IEC 497-1:1987) 1994.
- [18] A. Ouazani, A. Khellassi, I. Habi, "The Effect of Electric Current on the Human Body," in *International Conference on Systems, Signal Processing and Electronics Engineering (ICSSEE'2012)*, Dubai (UAE), pp. 207-209, December 26-27, 2012.
- [19] IEEE Guide for Measuring Earth Resistivity, Ground Impedance, and Earth Surface Potentials of a Grounding System, IEEE Std 81-2012 (Revision of IEEE Std 81-1983), 2012.
- [20] A. El-Morshedy, A.G. Zeitoun, M.M. Ghourab, "Modeling Of Substation Grounding Grids," in *IEEE Proceedings C - Generation, Transmission And Distribution*, 133(5), July 1986, pp. 287-292.
- [21] E.M. Elrefaie, S. Ghoneim, M. Kamal, R. Ghaly, "Evolutionary strategy technique to optimize the grounding grids design," in *Power and Energy Society General Meeting 2012 IEEE*, pp. 1-6, 2012.
- [22] E. Wilcox and M. Lamendola. (published 1st Jan. 2000). "Why Test Grounding?," in EC&M. [Online]. Available: <http://www.ecmweb.com/content/why-test-grounding>
- [23] A. Arismunandar, S. Kuwahara, *Buku Pegangan Teknik Tenaga Listrik: Jilid III Gardu Induk*, Cetakan Kelima. Jakarta: Pradnya Paramita, 1991.
- [24] IEEE Guide for Generating Station Grounding, IEEE Std 665-1995 (R2001) (Revision of IEEE Std 665-1987), 2011.
- [25] F. Wenner, "A method of measuring earth resistances," in *Bulletin of Bureau Standard*, 12(3), Rep. 258, pp. 469-482, 1916.
- [26] H.B. Dwight, "Calculations of Resistances to Ground," in *AIEE Transactions*, pp. 1319-1328, December 1936.
- [27] S.J. Schwarz, "Analytical expression for resistance of grounding systems," in *AIEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol.73, no.13, part III-B, pp. 1011-1016, Aug. 1954.
- [28] F. Dawalibi and D. Mukhedkar, "Influence of ground rods on grounding systems," in *IEEE Transactions on Power Apparatus and System*, PAS-98(6), pp. 2089-2098, November/December 1979.
- [29] J. He, G. Yu, J. Yuan, R. Zeng, B. Zhang, J. Zou, Z. Guan, "Decreasing Grounding Resistance of Substation by Deep-Ground-Well Method," in *IEEE Transactions On Power Delivery*, vol. 20, no. 2, pp. 738-744, April 2005.
- [30] C.J. Blattner, "Study of driven ground rods and four point soil resistivity data," in *IEEE Transactions Power Apparatus and System*, PAS-101(8), pp. 2837-2850, August 1982.
- [31] J.G. Sverak, "Optimized grounding grid design using variable spacing technique," in *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. PAS-95, no.1, pp. 362-374, Jan./Feb. 1976.
- [32] Y.L. Chow and M.M.A. Salama, "A Simplified Method for Calculating the Substation Grounding Grid Resistance," in *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 9, No. 2, pp. 736-742, April 1994.

- [33] IEEE Standard for Qualifying Permanent Connections Used in Substation Grounding, ANSI/IEEE Std 837-2014 (Revision of ANSI/IEEE Std 837-1989), 2014.
- [34] J.G. Sverak, "Simplified analysis of electrical gradients above a ground grid: Part I — How good is the present IEEE method?," in *IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems*, PAS-103(1), pp. 7–25, January 1984.
- [35] B. Thapar, V. Gerez, Balakrishnan, D.A. Blank, "Simplified Equations for Mesh and Step Voltages in an AC Substation," in *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 6, no. 2, pp. 601-607, April 1991.
- [36] F. Dawalibi and D. Mukhedkar, "Optimum Design of Substation Grounding in Two layer Earth Structure (Part II)," in *IEEE Transactions on Power and Apparatus and Systems*, vol. 94, no. 2, pp. 262-266, March- April 1975.
- [37] F. Dawalibi, J. Ma, R.D. Southey, "Behavior of Grounding System in Multilayer Soils: A Parametric Analysis," in *IEEE Transaction on Power Delivery*, vol. 9, no. 1, pp. 333-342, January 1994.
- [38] Puttarach, N. Chakpitak, T. Kasirawat, and C. Pongsriwat, "Substation Grounding Grid Analysis with the Variation of Soil Layer Depth Method," in *IEEE PES International Conference Power Technology*, Lausanne, Switzerland, pp.1881-1886, July, 2007.
- [39] M.G. Unde, B.E. Kushare, "Grounding Grid Performance of Substation in Two Layer Soil - A Parametric Analysis," in *International Journal of Engineering Sciences & Emerging Technologies*, vol. 1, Issue 2, pp. 69-76, February 2012.
- [40] T.A. Short, "Grounding and Safety," in *Electric Power Distribution Handbook*, Boca Raton, FL: CRC Press LLC, 2004, pp. 13.1-13.48.
- [41] A. Phayomhom, S. Sirisumrannukul, T. Kasirawat, A. Puttarach, "Safety Design Planning of Ground Grid for Outdoor Substations in MEA's Power Distribution System," in *ECTI Transactions on Electrical Engineering, Electronics, and Communications*, vol. 9, no.1, pp. 101-112, February 2011.
- [42] C.F. Dalziel., "Threshold 60-cycle fibrillating currents," in *AIEE Transactions Power Apparatus System*, 79, pp. 667–673, 1960.

