

ANALISA KEBUTUHAN PERLINDUNGAN KATODIK UNTUK SISTEM PENTANAHAN PERALATAN TIPE GRID-ROD BERBAHAN BAJA PADA GARDU INDUK

Betta Yudhi Setyawan*
Ir. Agung Warsito, DHET**
Karnoto, ST., MT.**

Abstract

One of the most important thing in the substation is operator and equipment safety when a high fault current occur . A grounding system should be installed in a manner that will minimize effect of ground potential gradients to such voltage and current levels that will not endanger the safety of the people or equipment under normal and fault conditions. System of ground electrodes has the form of a grid as horizontally buried conductor, supplemented by a number of vertical ground rods connected to the grid. Commonly, Copper is used as primary ground conductor material, however Steel may also used for ground grid conductors and rods. Of course, such a design requires that attention be paid to the corrosion of the steel. Use of galvanized or corrosion resistant steel, in combination with cathodic protection system, is typical for steel grounding systems.

A simulation programme will be used in this final project. This programme used for simulating cathodic protection system design calculation for substation steel grounding system. The simulation result are appropriate design parameters of sacrificial anodes cathodic protection system for substation steel grounding system. The simulation Programs will be created using GUI design environment (GUIDE) tools with Matlab 7.9 programming.

The results of the experiments described that an appropriate sacrificial anodes cathodic protection system is needed for protecting steel grounding system from corrosion. Magnesium anodes and zinc anodes can be used for sacrificial anodes, however, only certain sizes magnesium anodes can be used in this case. At least 5645,2138 lb magnesium anode is needed to protecting steel grounding structure for 20 years. In this case, A 17 lb magnesium anode with 6" 55" packaged size is selected to be used. Based on the prices comparison, 60% savings can be achieved in some cathodically protected substation steel grounding design.

Keywords : *Steel Grounding, Corrosion, Cathodic Protection, Magnesium Anode, and Zinc Anode.*

I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Pada umumnya pentanahan peralatan pada Gardu induk bertujuan untuk menjaga keselamatan peralatan maupun personil yang ada di dalamnya, baik pada saat normal maupun pada saat terjadi gangguan. Sistem pentanahan peralatan batang (*rod*) dan kisi-kisi (*Grid*) digunakan untuk membatasi tegangan yang timbul pada peralatan dan meratakan gradien tegangan dipermukaan tanah.

Pada penelitian tugas akhir yang telah diolakukan sebelumnya, telah dikembangkan perangkat lunak untuk mempermudah perencanaan sistem pentanahan peralatan, dan dapat dipilih menggunakan logam tembaga ataupun logam baja sebagai elektroda pentanahan. Namun belum menambahkan suatu perlindungan terhadap korosi baja yaitu dengan sistem perlindungan katodik *sacrificial anode*. Penggunaan anoda *magnesium* dan *zinc* akan menghambat terjadinya korosi pada baja, sehingga akan memperpanjang umur pakai baja.

Sistem pentanahan peralatan gardu induk dengan bahan logam baja yang dilengkapi sistem perlindungan katodik berbeda dengan sistem dengan bahan logam tembaga. Mulai dari bentuk struktur pentanahan sampai dengan biaya

pembuatannya. Sistem perlindungan katodik yang diterapkan harus melindungi struktur pentanahan peralatan baja secara efektif dan efisien. Hal-hal tersebut terangkum dalam pembahasan pada tugas akhir ini.

1.2 Tujuan

Adapun tujuan pembuatan tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Menganalisa kebutuhan sistem perlindungan katodik yang sesuai untuk sistem pentanahan peralatan tipe *grid-rod* pada studi kasus gardu induk 500 kV Pedan Klaten dengan baja 1020 sebagai material konduktor.
2. Menentukan dan memilih jenis *sacrificial anode* yang akan digunakan pada sistem perlindungan katodik.
3. Membandingkan biaya investasi awal sistem pentanahan peralatan berbahan baja yang dilengkapi sistem pentanahan peralatan berbahan tembaga.

1.3 Pembatasan Masalah

Dalam pembuatan tugas akhir ini penulis membatasi permasalahan sebagai berikut :

1. Analisa kebutuhan sistem perlindungan katodik akan diterapkan untuk hasil rancangan sistem pentanahan peralatan tipe kombinasi *Grid-Rod*

***) Agung Warsito, Karnoto adalah dosen di Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Diponegoro (Undip) Semarang Jl. Prof. Soedarto, S.H. Tembalang Semarang 50275.

*) Betta Yudhi Setyawan adalah mahasiswa di Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Diponegoro (Undip) Semarang Jl. Prof. Soedarto, S.H. Tembalang Semarang 50275.

berbahan baja dengan studi kasus pada Gardu Induk 500 kV Pedan, Klaten yang telah dibahas pada penelitian tugas akhir terdahulu.

2. Perlindungan katodik pada pentanahan peralatan berbahan baja di gardu induk tersebut merupakan jenis *sacrificial anode*.
3. Jenis *sacrificial anode* yang akan dipilih adalah anoda *magnesium* dan anoda *zinc*.
4. Analisa kebutuhan perlindungan katodik meliputi jenis anoda, berat anoda, jumlah anoda, ukuran anoda, luasan proteksi dan jarak rata-rata antar anoda.
5. Tidak menghitung laju korosi, terutama akibat pengaruh faktor lingkungan seperti pH, suhu, kelembaban dan aerasi.

II DASAR TEORI

2.1 Umum

Sistem pentanahan peralatan memiliki tujuan untuk membatasi tegangan antara bagian-bagian peralatan dengan tanah sampai pada suatu harga yang aman (tidak membahayakan) untuk semua kondisi operasi, baik pada saat kondisi normal maupun pada saat terjadi gangguan.

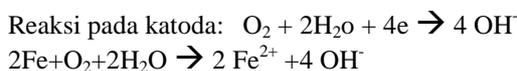
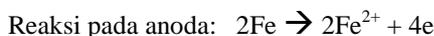
Sistem pentanahan peralatan yang dibuat dari bahan baja akan memiliki sifat rentan terhadap korosi, sehingga diperlukan suatu upaya untuk mengurangi laju korosi yang terjadi. Korosi merupakan timbul akibat reaksi elektrokimia antara baja, air dan oksigen, sehingga mengurangi massa baja. Salah satu upaya yang dapat dilakukan adalah perlindungan terhadap korosi secara katodik, baik dengan *sacrificial anode* atau *impressed current*. Anoda *magnesium* dan anoda *zinc* sering digunakan untuk perlindungan katodik terhadap struktur baja di bawah tanah.

2.2 Perencanaan Sistem Perlindungan Katodik Untuk Pentanahan Peralatan Berbahan Baja pada Gardu Induk

Perencanaan sistem perlindungan katodik dilakukan untuk menentukan jenis perlindungan katodik yang akan digunakan, terutama tentang jenis dan jumlah anoda yang akan digunakan. berikut ini akan terlebih dahulu dijelaskan tentang korosi dan teori perlindungan korosi.

2.2.1 Pengertian Korosi

Korosi merupakan penurunan mutu logam akibat reaksi elektrokimia dengan lingkungannya. Secara umum korosi meliputi hilangnya logam pada bagian yang terbuka dan bersentuhan langsung dengan air dan oksigen. Reaksi kimia yang timbul pada baja karbon dalam tanah dapat mengikuti tahapan reaksi berikut [19]:



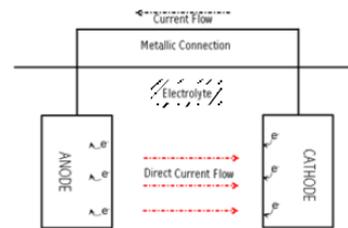
Reaksi oksidasi lanjut



Korosi pada logam terjadi karena adanya aliran arus listrik dari satu bagian pada ke bagian yang lain di permukaan logam. Aliran arus ini akan menyebabkan hilangnya logam pada bagian dimana arus dilepaskan ke lingkungan (oksidasi atau reaksi anoda). Korosi terjadi di titik dimana arus kembali ke permukaan logam (reaksi katoda). Korosi ini disebut juga korosi galvanik.

Terdapat empat unsur pokok yang harus dipenuhi agar korosi galvanik dapat terjadi dapat dilihat pada gambar 1. Jika salah satunya hilang, maka korosi tidak dapat terjadi. Empat unsur pokok tersebut antara lain;

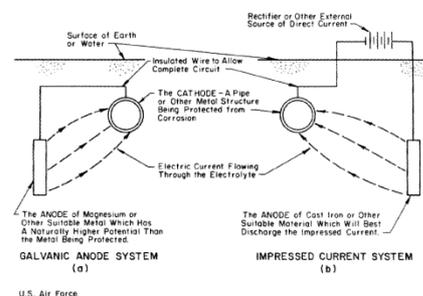
- a. Anoda, tempat terjadinya reaksi oksidasi.
- b. Katoda, tempat terjadinya reaksi reduksi.
- c. Elektrolit, lingkungan tempat katoda dan anoda.
- d. Sambungan logam



Gambar 1. Mekanisme Korosi galvanik

2.2.2 Metode Pencegahan Korosi: Proteksi katodik

Proteksi Katodik (*Cathodic Protection*) adalah teknik yang digunakan untuk mengendalikan korosi pada permukaan logam dengan menjadikan permukaan logam tersebut sebagai katoda dari sel elektrokimia. Proteksi katodik dapat dilakukan dengan dua cara yaitu dengan menggunakan *sacrificial anode* dan *Impressed Current Cathodic Protection* seperti pada gambar 2 berikut:



Gambar 2. Proteksi katodik dengan anoda galvanik dan sistem arus paksa

2.2.2.1 Sistem Galvanik (*Sacrificial anode*)

Proteksi katodik sistem galvanik memanfaatkan potensial elektroda dari dua logam yang berbeda. Pada sel galvanik logam dengan

potensial lebih rendah akan mengalami korosi. Jika logam yang memiliki potensial lebih rendah seperti *magnesium* dihubungkan dengan struktur baja melalui kabel berisolasi, maka *magnesium* sebagai anoda akan terkorosi dan struktur baja sebagai katoda akan terlindungi. Hal ini yang menyebabkan sistem ini disebut sebagai *sacrificial anode cathodic protection system*.

2.2.2.2. Jenis Material Anoda

Salah satu material *sacrificial anode* yang biasa digunakan adalah *magnesium*, selain itu ada juga *zinc*, keduanya digunakan sebagai material anoda untuk sistem perlindungan katodik *sacrificial anode*, berikut ini adalah sedikit penjelasan tentang material-material tersebut:

a. Anoda Magnesium

Ada dua komposisi anoda *magnesium* yang sering digunakan, yaitu *standard alloy* dan “*high potential*” alloy. Laju konsumsi teoritis dari *magnesium* adalah 1000 Ahr/lb atau 8.8 lbs/Ayr. Efisiensi *magnesium alloy* yang digunakan pada proteksi katodik jarang melebihi 65% dari nilai teoritis. Potensial hubung buka *standard alloy* kira-kira -1,55 V terhadap Cu/CuSO₄. Sedangkan untuk “*high potential*” alloy kira-kira -1,75 V.

b. Anoda Zinc

Terdapat dua komposisi anoda zinc yang sering digunakan, yaitu *standard alloy zinc anode* untuk penggunaan di air tawar dan tanah, dan yang lainnya adalah *seawater alloy* untuk penggunaan di air laut. Laju konsumsi teoritis anoda *zinc* adalah 23,5 lbs/Ayr atau 372 Ahr/lb. Efisiensi *zinc* biasanya antara 90 % sampai 95 % tergantung keluaran arus. Namun dalam perencanaan biasanya digunakan 90 % untuk efisiensi [12].

Potensial hubung buka anoda zinc kira-kira -1,10 V di hampir semua jenis tanah maupun air. Namun lebih cocok pada tanah dengan resistivitas kurang dari 10 ohm-m.

2.2.2.3 Arus keluaran masing-masing anoda

Terdapat dua arus keluaran masing-masing anoda yang harus diperhitungkan, yaitu arus keluaran anoda berdasarkan jumlah dan berat minimum anoda sebagai batasan minimum arus keluaran yang dibutuhkan (I_o) dan arus keluaran yang dihitung berdasarkan resistansi tunggal masing-masing anoda (I_{aH} dan I_{aV}).

Untuk mendapatkan perlindungan katodik yang layak, arus proteksi yang diberikan dari tiap anoda harus lebih besar dari kebutuhan total arus selama waktu desain. Ketentuan yang berlaku sebagai berikut :

$$I = \text{Arus keluaran tiap anoda} > I_{\text{Arus keluaran minimum tiap anoda}}$$

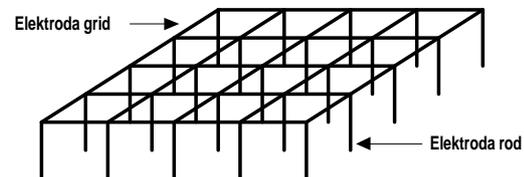
$$I_{ah} > I_o \text{ atau } I_{av} > I_o$$

2.3 Perencanaan Sistem Pentanahan Peralatan

Sistem pentanahan harus direncanakan sebaik mungkin dan seefisien mungkin. Adapun salah satu acuan yang dapat digunakan sebagai pedoman adalah *IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding, IEEE Standard 80-2000*.

2.3.1 Pentanahan Kombinasi Grid dan Rod

Kombinasi sistem pentanahan suatu gardu induk seringkali menggunakan konduktor *grid* yang disusun horisontal dengan permukaan tanah yang dibantu dengan batang-batang vertikal (*rod*) (lihat gambar 3.). Bentuk pentanahan gabungan antara *grid-rod* ini dapat meratakan tegangan yang mungkin timbul apabila terjadi arus gangguan ke tanah sehingga tidak membahayakan manusia yang berada disekitar *switchyard*.



Gambar 3. Sistem pentanahan yang terdiri dari kombinasi antara *grid rod*

III PEMBUATAN PROGRAM SIMULASI

3.1 Pengambilan Data

Data yang digunakan merupakan data dari proyek perancangan pentanahan pada gardu induk 150 / 500 KV Pedan, Klaten tahun 1999. Berikut adalah data yang digunakan:

a. Data gardu induk

- Tegangan sistem (V_{sis}) = 500 kV
- Arus Gangguan (i_{ga}) = 40 kA
- Waktu *fault clearance* (t_s) = 0.5 s
- Waktu *fault current flow* (t_c) = 1s
- Impedansi trafo (Z_{tra}) = 14.7%
- Impedansi kawat tanah atas = 0.17545 Ohm
- Tahanan jenis tanah (ρ) = 50 ohm-m
- Tahanan jenis *crushed rock* (ρ_c) = 3000 ohm-m
- Ketebalan *crushed rock* (h_s) = 0.1 m
- Panjang area (P_{area}) = 396 m
- Lebar area (L_{area}) = 364 m

b. Perencanaan Elektroda Pentanahan

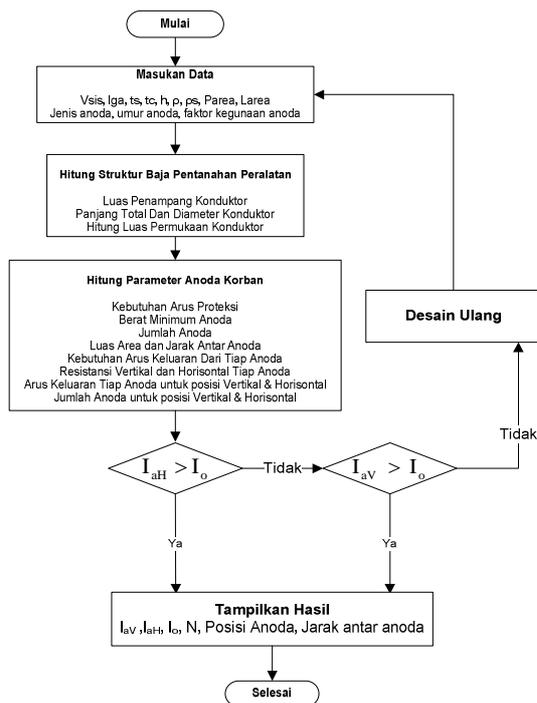
- Tipe Konduktor = *standard annealed soft copper wire* dan *Steel 1020*
- Panjang mesh (P_{mesh}) = 50 m
- Lebar mesh (L_{mesh}) = 25 m
- Kedalaman Penanaman (h) = 0.5 m
- Jumlah rod (N_{rod}) = 46 batang
- Panjang rod (L_{rod}) = 5 m/ batang

Selain data untuk perancangan pentanahan, juga digunakan data untuk perencanaan sistem perlindungan katodik.

- Rapat arus proteksi baja terpendam (I') = $2\text{mA}/\text{ft}^2$
- Umur Anoda = 20 tahun
- Laju Konsumsi Anoda *Magnesium* = 8,8 lb/AY
- Efisiensi Anoda *Magnesium* = 50 %
- Laju Konsumsi Anoda Zinc = 23,5 lb/AY
- Efisiensi Anoda Zinc = 90 %

3.2 Pembuatan Program Simulasi Perencanaan Perlindungan Katodik Untuk Pentanahan Peralatan Berbahan Baja Pada Gardu Induk

Program simulasi analisa kebutuhan perlindungan katodik terhadap sistem pentanahan peralatan tipe *grid-rod* berbahan baja pada gardu induk ini menggunakan program Matlab 7.9. Pembuatan program simulasi ini dimulai dari pembuatan tampilan GUI dan penulisan seranai program dan pengujian program. Secara umum diagram alir pembuatan program simulasi tahap ini dapat dilihat pada Gambar 3.1.



Gambar 9. Diagram alir program simulasi analisa kebutuhan perlindungan katodik untuk pentanahan peralatan berbahan baja pada gardu induk.

Jalannya program dimulai dari pemasukan data, kemudian tahap pertama adalah menentukan bentuk struktur baja pentanahan peralatan berbahan baja yang akan dilindungi. Langkah kedua adalah menentukan sistem perlindungan katodik yang akan digunakan. Tahap ketiga adalah menentukan keamanan gardu induk dan kelayakan sistem perlindungan katodik.

IV. HASIL DAN ANALISIS

Pada bab ini akan dibahas mengenai analisa kebutuhan perlindungan katodik pada hasil rancangan struktur pentanahan peralatan berbahan baja Gardu Induk 500 kV di Pedan, Klaten. Struktur yang akan dilindungi merupakan rancangan sistem pentanahan peralatan jenis kombinasi *grid* dan *rod* berbahan baja. Sistem pentanahan peralatan dirancang dengan bahan konduktor baja lunak jenis *steel 1020* yang dipendam di dalam tanah. Sistem perlindungan katodik yang diaplikasikan adalah jenis metode *sacrificial anode*. Akan dibandingkan antara penggunaan *sacrificial anode* jenis *magnesium* dan *zinc* pada sistem pentanahan peralatan tersebut. Proses pengolahan data ini mengacu pada langkah-langkah perencanaan pentanahan peralatan *IEEE standard 80-2000* dan langkah-langkah perencanaan sistem perlindungan katodik pada buku pedoman *electrical engineering cathodic protection* yang mengacu pada *NACE standard RP-02-85*.

4.1 Perencanaan Sistem Perlindungan Katodik Pada Struktur Pentanahan Peralatan Gardu Induk Dengan Metode *Sacrificial anode*

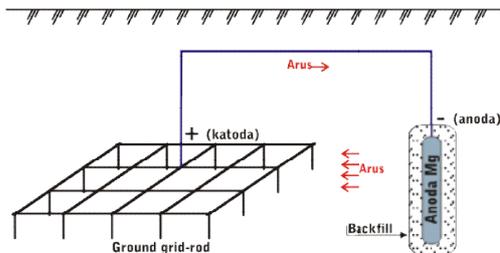
Pada prinsipnya, sistem perlindungan katodik memanfaatkan prinsip kerja sel galvanik yang terbentuk pada saat terjadinya korosi baja. Pada peristiwa korosi, logam baja yang terkorosi bertindak sebagai anoda, sedangkan pada peristiwa perlindungan katodik logam baja bertindak sebagai katoda karena dipasangkan dengan logam yang lebih negatif sehingga tidak terkorosi.

Pada gambar 4.1 ditunjukkan gambaran sel galvanik yang terbentuk dari sistem perlindungan katodik terhadap pentanahan peralatan *grid-rod* berbahan anoda magnesium sebagai *sacrificial anode*. Berikut ini adalah potensial elektroda baja dan *magnesium* terhadap referensi elektroda $\text{Cu}|\text{CuSO}_4$:

$$\begin{aligned} \text{Potensial elektroda Baja} &= -0,5 \text{ V} \\ \text{Potensial elektroda Magnesium} &= -1,75 \text{ V} \end{aligned}$$

Terlihat bahwa *magnesium* memiliki potensial elektroda yang lebih elektronegatif terhadap elektroda referensi $\text{Cu}|\text{CuSO}_4$ dibandingkan dengan potensial baja terhadap elektroda referensi $\text{Cu}|\text{CuSO}_4$. Dengan kata lain elektroda *magnesium* lebih elektronegatif dibandingkan dengan elektroda baja. Pada sebuah sel galvanik yang terdiri atas dua buah elektroda logam, arus akan mengalir ke arah logam dengan potensial elektroda yang lebih elektronegatif dan mengalami korosi karena cenderung melepaskan elektron. Peristiwa terlepasnya elektron ini merupakan reaksi oksidasi yang terjadi pada sisi anoda sel galvanik. Pada Sel galvanik yang dibuat

dari elektroda *magnesium* dan baja, baja akan bertindak sebagai katoda dan *magnesium* menjadi anoda. Aliran arus terjadi pada kabel penghubung dari konduktor baja (katoda) yang berpotensi lebih elektropositif ke anoda *magnesium* (anoda) dengan potensial lebih elektro negatif, mengakibatkan logam *magnesium* terkorosi dan logam baja terlindungi.



Gambar 4.1 Sel galvanik yang terbentuk dari sistem perlindungan katodik terhadap pentanahan peralatan *grid-rod* berbahan baja dengan anoda magnesium sebagai *sacrificial anode*.

4.1.1 Perhitungan Jumlah Anoda Berdasarkan Kriteria Berat Total Minimum Anoda

Dari hasil perancangan pentanahan peralatan tipe *grid-rod* berbahan baja pada gardu induk 500 kV Pedan, Klaten dapat diperoleh data-data struktur seperti berikut:

Luas Penampang Konduktor <i>Grid</i>	: 300 mm ²
Luas Penampang Konduktor <i>Rod</i>	: 500 mm ²
Diameter Konduktor <i>Grid</i>	: 20 mm
Diameter Konduktor <i>Rod</i>	: 26 mm
Luas permukaan struktur yang dilindungi	: 6815,9541 ft ²

Sistem perlindungan katodik ini dirancang untuk digunakan dalam kurun waktu 20 tahun sebelum akhirnya dilakukan penggantian anoda yang baru, dengan perkiraan kebutuhan rapat arus proteksi 2 mA/ft² untuk melindungi struktur pentanahan peralatan tersebut.

Adapun anoda yang akan digunakan adalah anoda *Magnesium* 17 lbs dan *Zinc* 18 lbs. Anoda *magnesium* dengan berat 17 lbs dipilih karena merupakan berat anoda yang sering digunakan dibandingkan berat anoda lainnya, dan sebagai pembanding dipilih berat anoda *zinc* yang tersedia yaitu 18 lbs. Dari perhitungan yang telah dilakukan, diperoleh hasil seperti pada tabel 4.1 berikut:

Tabel 4.1 Perbandingan penggunaan anoda *magnesium* dan anoda *zinc* pada sistem perlindungan katodik *sacrificial anode* untuk pentanahan peralatan berbahan baja.

No	Parameter	<i>Magnesium</i>	<i>Zinc</i>
1	Berat total minimum anoda	5645,2138 lb	8375,1593 lb
2	Jumlah anoda	333 anoda	466 anoda
3	Luas area yang dilindungi masing-masing anoda	20,4683 ft ² /anoda	14,6265 ft ² /anoda
4	Jarak antar anoda	30,2721 m	21,6322 m

Dari tabel dapat diketahui bahwa untuk melindungi struktur pentanahan peralatan tipe *grid-rod* berbahan baja tersebut dalam kurun waktu 20 tahun, minimal diperlukan 5645,2138 lb anoda *magnesium* atau 8375,1593 lb anoda *zinc*. Hal ini dikarenakan laju konsumsi anoda *zinc* yang lebih besar daripada anoda *magnesium*, yaitu sebesar 23,5 lbs/A.year untuk *zinc* dan 8,8 lbs/A.year untuk *magnesium*. Dengan kata lain jumlah anoda *zinc* yang dibutuhkan lebih banyak daripada anoda *magnesium* dan jarak pemasangan antar anoda *zinc* lebih dekat dibandingkan dengan anoda *magnesium*.

4.1.2. Perhitungan Jumlah Anoda Berdasarkan Kriteria Arus Keluaran Anoda

Kriteria arus keluaran selain untuk menentukan jumlah anoda juga menentukan kesesuaian anoda yang digunakan. *Sacrificial anode* dapat dipasang secara vertikal maupun horisontal dan akan mempengaruhi arus keluaran masing-masing anoda. Berikut ini adalah tabel hasil perhitungan arus keluaran dari anoda *magnesium* 17 lb dan *zinc* 18 lb serta jumlah anoda yang dibutuhkan untuk pemasangan anoda secara vertikal terhadap tanah maupun pemasangan anoda secara horisontal terhadap tanah.

Tabel 4.2 Hasil perhitungan jumlah anoda dan arus keluaran tiap anoda *magnesium* dan *zinc*.

Hasil Perhitungan	<i>Magnesium, 17 lbs 6" x 55" packaged</i>		<i>Zinc, 18 lbs 5" x 42" packaged</i>	
	V	H	V	H
Keluaran arus tiap anoda	0,0482 A	0,0431 A	0,0105 A	0,008918 A
Jumlah anoda berdasarkan keluaran arus	284	317	1300	1529
Jumlah minimum anoda	333		466	
Arus keluaran minimum tiap anoda	0,040936 A		0,029253A	

Untuk mendapatkan perlindungan katodik yang baik, keluaran arus tiap anoda baik untuk posisi vertikal (I_{av}) atau horisontal (I_{ah}) harus lebih besar dari kebutuhan keluaran arus tiap anoda (I_o).

Berdasarkan tabel 4.2 di atas dapat diketahui bahwa anoda yang memenuhi kriteria diatas adalah anoda *magnesium* 17 lbs ukuran 6" x 55", baik untuk posisi vertikal maupun horisontal. Sedangkan untuk anoda *zinc* 18 lbs 5" x 42" tidak dapat digunakan karena tidak memenuhi kriteria.

Untuk mengetahui ukuran-ukuran anoda yang dapat digunakan sebagai anoda didalam kasus ini, dilakukan perhitungan lebih lanjut untuk ukuran anoda *magnesium* dan *zinc* yang lainnya. Tabel 4.3 dan 4.4 berikut akan menampilkan arus keluaran anoda posisi vertikal (I_{aV}) dan arus keluaran anoda posisi horisontal (I_{aH}) terhadap kebutuhan keluaran arus anoda (I_O) untuk masing-masing ukuran berat anoda *magnesium* dan *zinc*.

Tabel 4.3 Perhitungan jumlah anoda dan arus keluaran tiap anoda *magnesium*

Berat Anoda (lbs)	Arus Keluaran (I_O)	Arus Keluaran Anoda Posisi Vertikal (I_{aV})	Arus Keluaran Anoda Posisi Horisontal (I_{aH})
3	0,007243 A	0,018139 A	0,013539 A
5	0,012064 A	0,019528 A	0,01485 A
9 ^a	0,021707 A	0,032856 A	0,026682 A
9 ^b	0,021707 A	0,023122 A	0,018047 A
12	0,028942 A	0,02738 A	0,021765 A
14 ^a	0,033742 A	0,04258 A	0,036468 A
14 ^b	0,033742 A	0,030417 A	0,024214 A
17 ^a	0,040937 A	0,04815 A	0,043135 A
17 ^b	0,040937 A	0,032488 A	0,026082 A
20	0,048169 A	0,052023 A	0,050129 A
24	0,057762 A	0,034141 A	0,027332 A
32	0,077002 A	0,034632 A	0,027241 A
40	0,095999 A	0,05604 A	0,053849 A
48 ^a	0,11552 A	0,041559 A	0,033869 A
48 ^b	0,11552 A	0,039768 A	0,029513 A
60	0,14349 A	0,05729 A	0,055002 A

Tabel 4.4 Perhitungan jumlah anoda dan arus keluaran tiap anoda *zinc*

Berat Anoda (lbs)	Arus Keluaran (I_O)	Arus Keluaran Anoda Posisi Vertikal (I_{aV})	Arus Keluaran Anoda Posisi Horisontal (I_{aH})
5	0,0081336 A	0,0053189 A	0,0041796 A
18	0,029253 A	0,010492 A	0,0089178 A
27	0,043833 A	0,012509 A	0,011209 A
30 ^a	0,048685 A	0,014451 A	0,013925 A
30 ^b	0,048685 A	0,010409 A	0,0086401 A
50	0,081142 A	0,013205 A	0,011764 A
60	0,097371 A	0,015208 A	0,014627 A

Pada tabel 4.3 dapat dilihat bahwa pada kolom atau baris yang diarsir merupakan nilai arus yang tidak sesuai dengan kategori yang telah ditetapkan. Nilai arus tersebut lebih kecil dari nilai arus keluaran yang dibutuhkan dari setiap anoda. Anoda *magnesium* yang dapat digunakan pada kasus ini adalah anoda *magnesium* dengan berat 3 lb, 5 lb, 9^a lb, 9^b lb, 14^a lb, 17^a lb, 20 lb. Khusus untuk berat 9^b lb, pada kasus ini hanya dapat digunakan dengan posisi vertikal saja.

Pada tabel 4.4 dapat dilihat bahwa semua kolom arus keluaran diarsir. Ukuran anoda *zinc* yang tersedia tidak dapat digunakan pada kasus ini karena arus keluaran tiap anoda kurang dari arus

keluaran minimum yang dibutuhkan. Resistivitas tanah di sekitar struktur terlalu besar sehingga tidak cocok jika menggunakan anoda *zinc*. Berdasarkan hasil perhitungan pada tabel 4.5 berikut, anoda *zinc* dapat digunakan bila resistivitas tanah setidaknya 30 ohm.m atau lebih kecil.

Tabel 4.5 Perhitungan arus keluaran tiap anoda *zinc* untuk resistivitas tanah kurang dari 50 ohm.m

resistansi tanah (ohm)	30 ohm.m			20 ohm.m		
	I_O	I_{aH}	I_{aV}	I_O	I_{aH}	I_{aV}
Berat (lb)						
5	0.0081	0.0071	0.0089	0.0081	0.0109	0.0133
18	0.0292	0.0168	0.0175	0.0292	0.0302	0.0262
27	0.0438	0.0226	0.0209	0.0438	0.0462	0.0313
30a	0.0487	0.0240	0.0241	0.0487	0.0810	0.0361
30b	0.0487	0.0161	0.0174	0.0487	0.0283	0.0260
50	0.0811	0.0240	0.0220	0.0811	0.0501	0.0325
60	0.0974	0.0332	0.0254	0.0974	0.0912	0.0380

Posisi pemasangan anoda yang direkomendasikan adalah secara horisontal dengan sejajar dengan struktur atau lebih dalam. Pemasangan secara horisontal dilakukan bila luas tanah mencukupi dan $I_{aH} > I_O$. Bila kedua keadaan itu tidak terpenuhi maka dapat dipakai dengan posisi vertikal.

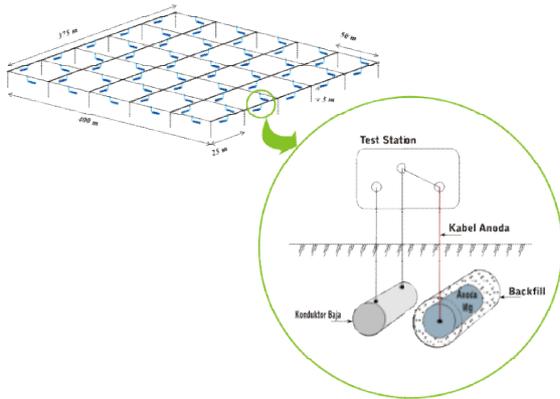
4.1.3. Kebutuhan Sistem Perlindungan Katodik *Sacrificial anode Terhadap Sistem Pentanahan Peralatan Tipe Grid-Rod pada Gardu Induk*

Berdasarkan perhitungan dan pertimbangan yang telah dilakukan, maka telah didapatkan sebuah rancangan sistem perlindungan katodik *sacrificial anode* sebagai berikut:

- Struktur yang dilindungi : Pentanahan peralatan tipe *grid-rod* berbahan baja pada gardu induk 500 kV Pedan, Klaten
- Luas permukaan struktur : 6815,9541 ft²
- Jenis anoda : *high potential magnesium anode*
- Ukuran anoda : 6" x 55" *packaged*
- Berat satuan anoda : 17 lb / buah
- Umur pakai anoda : 20 tahun
- Berat total minimum : 5645,2138 lb
- Jumlah Anoda : 333 buah
- Posisi pemasangan anoda : Horisontal
- Jarak pemasangan anoda : ± 30,2721 m

Kedalaman anoda : ± 0,5 m

GAMBAR STRUKTUR SISTEM PERLINDUNGAN KATODIK ANODA KORBAN PADA KONDUKTOR PENTANAHAN PERALATAN BERBAHAN BAJA



gambar 4.2 Rancangan sistem perlindungan katodik *sacrificial anode* terhadap sistem pentanahan peralatan tipe *grid-rod* pada gardu induk

4.2. Perhitungan Biaya Investasi Awal

Sistem pentanahan peralatan tipe *grid-rod* berbahan baja pada gardu induk dengan perlindungan katodik *sacrificial anode* bukanlah sistem digunakan secara umum. Logam tembaga lebih utama digunakan sebagai bahan material konduktor pentanahan peralatan dan tidak memerlukan sistem perlindungan katodik karena lebih tahan terhadap korosi. Berikut ini adalah perbandingan biaya investasi awal antara sistem pentanahan peralatan baja ditambah perlindungan katodik terhadap sistem pentanahan peralatan berbahan tembaga

Tabel 4.6 perbandingan biaya investasi awal antara pentanahan peralatan baja ditambah perlindungan katodik dan pentanahan peralatan berbahan tembaga

No	Jenis biaya	Jumlah (USD (\$))	
		Tembaga	Baja
1	Biaya bahan konduktor	\$ 443.693,00	\$ 83.273,80
2	Biaya pemasangan pentanahan peralatan	\$ 14.400,00	\$ 14.400,00
3	Biaya total anoda	-	\$ 64.518,75
4	Biaya pemasangan anoda	-	\$ 4.995,00
Jumlah total biaya investasi awal		\$ 458.093,00	\$ 167.187,55

Tabel 4.6 diatas menampilkan rincian anggaran biaya untuk kedua jenis sistem pentanahan peralatan. Untuk sistem pentanahan peralatan berbahan baja ditambah sistem perlindungan katodik biaya yang dibutuhkan adalah \$167.187,55. Terjadi penghematan hingga 60 % dibandingkan dengan sistem pentanahan peralatan dengan bahan konduktor tembaga. Biaya pemasangan anoda berpengaruh besar pada biaya keseluruhan, karena semakin banyak jumlah anoda yang digunakan maka semakin besar biaya pemasangannya.

V. KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 KESIMPULAN

Berdasarkan pengujian dan analisis yang telah dilakukan, maka dapat disimpulkan beberapa hal sebagai berikut :

1. Sistem perlindungan katodik yang sesuai untuk digunakan pada struktur pentanahan peralatan berbahan baja tersebut adalah jenis anoda *magnesium* dengan berat 3 lb ,5 lb ,9^a lb ,9^b lb, 14^a lb, 17^a lb, 20 lb. Dalam kasus ini dipilih anoda magnesium 17 lb dengan ukuran 6” x 55 “.
2. Anoda *zinc* lebih tepat digunakan pada resistivitas tanah kurang dari 30 ohm.m sehingga tidak dapat digunakan pada kasus ini.
3. Untuk memberikan perlindungan katodik pada struktur pentanahan peralatan tipe *grid-rod* berbahan baja di gardu induk 500 kV Pedan, Klaten dibutuhkan 5645,2138 lb anoda *magnesium* atau kurang lebih 333 buah anoda *magnesium* 17 lb.
4. Nilai arus keluaran I_{aH} anoda magnesium 17 lb ukuran 6” x 55” adalah sebesar 0,0431 A lebih besar dari I_o yang dibutuhkan yaitu 0,040936 A, sehingga anoda dapat dipasang dengan posisi horisontal.
5. Penggunaan sistem pentanahan berbahan baja dengan perlindungan katodik *sacrificial anode* dapat memberikan penghematan biaya investasi hingga 60 % dibandingkan dengan pentanahan peralatan dengan bahan logam tembaga.

5.2 SARAN

1. Dapat dikembangkan untuk jenis baja yang terlapsi, seperti baja tahan karat (*stainless steel*).
2. Dapat dikembangkan untuk pentanahan tipe lainnya maupun di lokasi penggunaan lainnya selain gardu induk.
3. Perlu dikembangkan analisa untuk penggunaan sistem *impressed current* sebagai ganti dari sistem *sacrificial anode* untuk perlindungan katodik pada konduktor pentanahan.
4. Dapat dikembangkan lebih lanjut dengan memperhitungkan laju korosi akibat pengaruh faktor lingkungan seperti suhu, kelembaban, aerasi dan ph tanah.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] T.S. Hutauruk, *Pentanahan Netral Sistem Tenaga dan Pengetanahan Peralatan*, Erlangga, Jakarta, 1991.
- [2] M. Khalifa, *High Voltage Engineering*, Marcel Dekker Inc. New York and Basel, New York, 1980.
- [3] Roger. C. Dugan, Mark. F. Mc Granaghm, H. Wayne. Beaty, *Electrical Power System Quality*, Mc Graw Hill, New York, 1989.
- [4] Ronald P. O'Riley, *Electrical Grounding*, Delmar Publisher Inc., New Delhi, 1988.
- [5] C.W. Stagg and A.H. El-Abiad, *Computer Methode in Power system Analysis*, Mc Graw Hill, New York, 1989.
- [6] M.V. Deshpande, *Electrical Power System Design*, Mc Graw Hill, New Delhi, 1984.
- [7] Turan Gonen, *Modern Power System Analysis*, John Wiley & Sons, New York, 1987.
- [8] *IEEE Recommended Practice for Grounding of Industrial and Commercial Power Systems*, IEEE Standard 142, 1982.
- [9] *IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding*, IEEE Standard 80, 1986.
- [10] *IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding*, IEEE Standard 80, 2000.
- [11] Dibyantoro. Primasto, *Perencanaan Sistem Pentanahan Peralatan Pada Gardu Induk 500 KV Pedan*, Skripsi S-1, Universitas Diponegoro, 2003.
- [12] *Military Handbook Electrical Engineering Cathodic Protection*, Departement of Defense United State Of America, 1990.
- [13] Nelson. John P. And Holm. William K. , *A Cathodically Protected Electrical substation Ground Grid*, IEEE Transaction on industry Application, 1985.
- [14] *TM 5-811-7: Electrical Desain Cathodic Protection*, Headquarters departement of army, Washington, D.C, 1985.
- [15] Delina, Mutia, *Pembuatan perangkat lunak pembantu perancangan proteksi katodik sistem anoda korban*. Tesis S-2, Univesitas Indonesia, 2007.
- [16] *Public Works Technical Bulletin 420-49-37 :Cathodic Protection Anode Selection*. U.S. Army Corps of Engineers, Washington, DC. 2001.
- [17] Sulistijono, *Perancangan System Proteksi Katodik Metode Anoda Tumbal Pipa PT. Pertamina Upms V Surabaya Dari Instalasi Perak Ke Instalasi Bandaran*,. Institut Teknologi Surabaya, Surabaya.
- [18] Sulistijono, *Materi Persentasi Teknik Material dan Metalurgi*, Institut Teknologi Surabaya, Surabaya.
- [19] Soeroso . Hartati, S. Bintoro, Nursalam. To'at, Tjahjono. Teguh, *Pengaruh Inhibitor*

Molibdat Pada Korosi Baja Karbon diLingkungan Larutan Beton Artificial, LIPI, Tangerang, 2005.

- [20] Sen. P.K., Malmadal. Keith, P. Nelson. John, *Steel Grounding Design Guide and Application Notes*, IEEE, Colorado, 2002.
- [21] Hillel. Dael, *Introduction to soil physics*. Academic press inc., Orlando, Florida, 1982.

BIODATA PENULIS



Betta Yudhi Setyawan
(L2F005523),
dilahirkan di Banjarnegara,
25 November 1987.
Menempuh pendidikan dasar
di SD Tawang Sari
Wonosobo, SDK Debora
Banjarnegara. Melanjutkan

ke SLTP N 1 Banjarnegara, dan pendidikan lanjutan tingkat atas di SMAN 1 Banjarnegara. Pada tahun 2005 melanjutkan studi Strata S-1 di Jurusan Teknik Elektro Universitas Diponegoro Semarang, mengambil konsentrasi Teknik Tenaga Listrik.

Menyetujui,
Dosen Pembimbing I

Ir. Agung Warsito, DHET
NIP. 19580617 1987031 002

Dosen Pembimbing II

Karnoto, ST, MT
NIP. 19690709 1997021 001