

# ANALISIS SISTEM PENTANAHAN TURBIN PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA BAYU SIDRAP SULAWESI SELATAN

*Ali Faisal Alwini dan Syamsir Abduh*

Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Industri, Universitas Trisakti

Jalan Kyai Tapa No. 1, Grogol, Jakarta Barat 11440

*E-mail: alifaisal121@hotmail.com, syamsir@trisakti.ac.id*

## **ABSTRACT**

*The wind power plant is one of the renewable energy source that can reduce the environmental and social impacts caused by fossil power plants. Furthermore, it requires protection systems, such as ground protection system for the safety of personnel and devices that use electricity as a power source from electric surges. In this paper, analysis of the 2.5 MW wind power plant grounding system design in Sidrap South Sulawesi is presented. The analysis was done using ETAP 16.0 software to determine the value of actual touch voltage, step voltage, and grounding resistance. The ETAP simulation results show that the value of actual touch voltage is 2162.8 V, step voltage is 726.2 V, and the grounding resistance is 0.8  $\Omega$ . The results indicate that wind power plant grounding systems are able to keep humans and devices around the power plant safe.*

**Keywords:** *grounding system, wind powerplant, ETAP 16.0*

## **ABSTRAK**

*Pembangkit listrik tenaga bayu (PLTB) merupakan suatu pembangkit energi terbarukan yang dapat mengurangi dampak lingkungan dan sosial yang ditimbulkan oleh pembangkit listrik tenaga fosil. PLTB membutuhkan sistem proteksi pentanahan yang merupakan suatu proteksi terhadap keselamatan personel dan perangkat yang menggunakan listrik sebagai sumber tenaga dari lonjakan listrik. Pada tulisan ini dipaparkan hasil analisis terhadap rancangan sistem pentanahan pada PLTB 2,5 MW di Sidrap Sulawesi Selatan. Analisis dilakukan dengan bantuan software ETAP 16.0 untuk menentukan nilai tegangan sentuh aktual, tegangan langkah, dan tahanan pentanahan. Dari hasil simulasi ETAP diperoleh nilai tegangan sentuh aktual sebesar 2162,8 V dan tegangan langkah sebesar 726,2 V, dan tahanan pentanahan sebesar 0,8  $\Omega$ . Hasil ini menunjukkan bahwa sistem pentanahan PLTB dapat melindungi personel dan peralatan di sekitarnya.*

**Kata kunci:** *sistem pentanahan, pembangkit listrik tenaga bayu, ETAP 16.0*

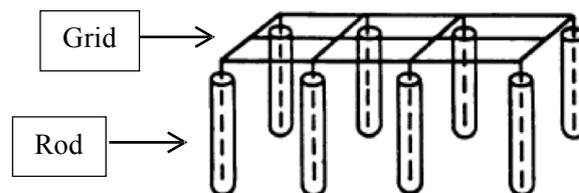
## 1. PENDAHULUAN

Program pemerintah untuk meningkatkan kapasitas pembangkit listrik sebesar 35.000 megawatt (MW) hingga 2019, mendorong PT UPC Renewable, yang merupakan perusahaan global yang bergerak dibidang pembangkit energi terbarukan, untuk bekerja sama dengan PT Binatek Energi Terbarukan membangun pembangkit listrik tenaga bayu (PLTB) di Sidrap Sulawesi Selatan (Sulsel) yang merupakan pembangkit tenaga bayu pertama dan terbesar di Indonesia. Pembangunan PLTB berkapasitas 75 MW dengan jumlah kincir angin 30 unit yang masing-masing unit pembangkitnya berkapasitas 2,5 MW diharapkan dapat mengurangi dampak lingkungan dan sosial yang ditimbulkan oleh pembangkit listrik tenaga fosil.

Pengoperasian yang aman dari suatu sistem pembangkit sangatlah penting demi keberlangsungan sistem tersebut dan terjaganya keamanan personel yang berada di kawasan pembangkit [1]. Operasi yang aman ini perlu didukung oleh sistem pentanahan yang dirancang dan dipasang untuk menjamin kinerja yang andal dan keberlangsungan dari sistem pembangkit. Sistem pentanahan berfungsi sebagai pengamanan listrik dari terjadinya lonjakan listrik pada sistem dengan menarik arus gangguan ke dalam tanah pada saat terjadinya gangguan arus lebih pada sistem sehingga peralatan-peralatan listrik yang digunakan tidak terganggu dan personel yang berada disekitar kawasan tersebut dapat terjamin keselamatannya.

## 2. KAJIAN PUSTAKA

Sistem pentanahan pada pembangkit bayu ini menggunakan gabungan sistem pentanahan *grid* dengan batang pentanahan *rod* seperti diperlihatkan pada Gambar 1.



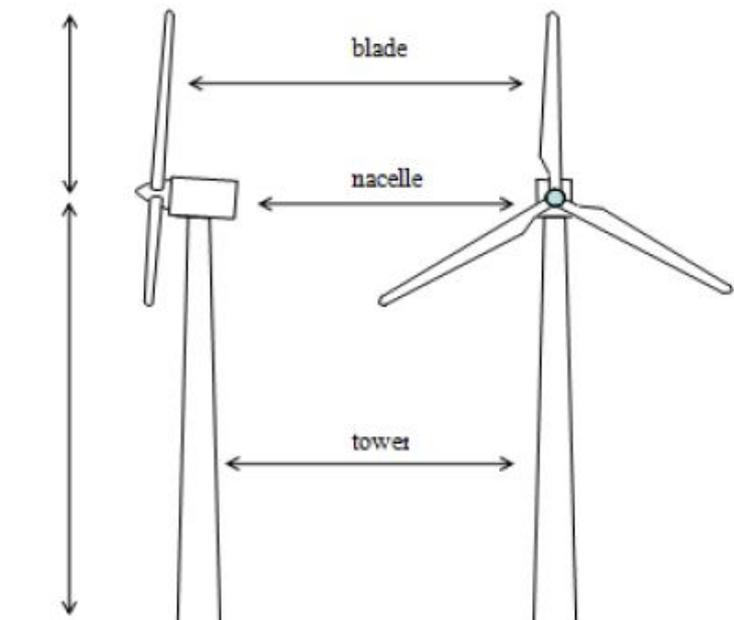
Gambar 1 Pentanahan *Grid-rod*

Pada sistem pentahanan *grid*, batang-batang elektroda ditanam sejajar dengan permukaan tanah, hal ini merupakan usaha untuk meratakan tegangan yang timbul. Sedangkan pada sistem *rod*, batang-batang elektroda ditanam tegak lurus kedalam tanah, yang fungsinya untuk mengurangi/memperkecil tahanan pentahanan.

Perancangan pada penelitian ini menggunakan *finite element method* (FEM) pada ETAP 16.0. Nilai tahanan yang didapatkan melalui Metode FEM sangat dekat dengan nilai sebenarnya dibandingkan dengan hasil perhitungan metode konvensional [3]. Nilai tahanan pentahanan yang mendekati nilai sebenarnya dapat menghasilkan rancangan yang mampu menahan arus gangguan yang berlebihan dengan efisien.

## 2.1 Pembangkit Listrik Tenaga Bayu

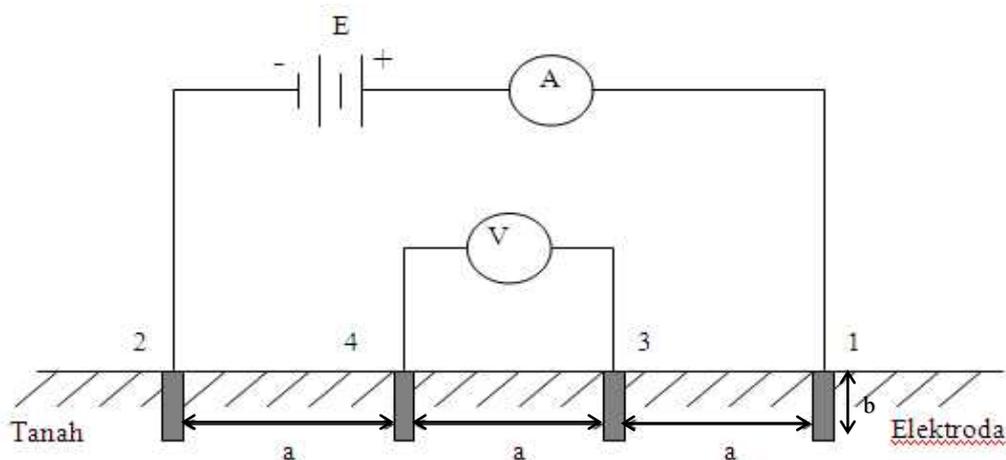
Energi angin yang masuk ke dalam area efektif turbin akan memutar baling-baling/kincir angin, kemudian diteruskan ke generator untuk diubah menjadi energi listrik. Pada Gambar 2 diperlihatkan turbin angin PLTB horizontal dengan 3 *blade*.



Gambar 2. Struktur Turbin Angin [2]

## 2.2 Resistivitas Tanah

Untuk mendapatkan nilai resistivitas tanah yang akurat perlu dilakukan pengukuran secara manual pada daerah pembangkit dengan menggunakan metode empat titik, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3 di bawah ini.



Gambar 3. Pengukuran Tahanan Tanah Metode 4 Titik [5]

Nilai efektif dari resistivitas tanah dapat dihitung dengan Persamaan (1) berikut:

$$\rho_a = \frac{4\pi au}{nI} \quad (1)$$

dengan  $\rho_a$  adalah tahanan tanah ( $\Omega\text{cm}$ ),  $a$  adalah jarak antara elektroda batang yang dimasukkan ke tanah (cm),  $b$  adalah kedalaman penanaman elektroda batang (cm),  $u$  adalah tegangan yang terukur pada voltmeter (V),  $n$  adalah perbandingan  $b/a$ ,  $I$  adalah arus yang terukur pada ampermeter (A).

## 2.3 Penentuan Ukuran Konduktor Minimum

Panas yang diakibatkan oleh arus gangguan dan durasi gangguan seharusnya tidak boleh menghancurkan konduktor pentanahan tersebut. Oleh sebab itu besarnya ukuran konduktor yang akan digunakan perlu ditentukan dengan Persamaan (2) berikut [6]:

$$A = \frac{I}{\sqrt{\left(\frac{TCAP \cdot 10^{-4}}{t_c \alpha_r \rho_r}\right) \ln\left(\frac{K_o + T_m}{K_o + T_a}\right)}} \quad (2)$$

$A$  adalah luas penampang konduktor ( $\text{mm}^2$ ),  $I$  adalah arus gangguan (kA),  $TCAP$  adalah kapasitas termal per unit volume ( $\text{J}/\text{cm}^3\text{C}$ ),  $t_c$  adalah durasi gangguan (s),  $\alpha_r$  adalah koefisien panas resistivitas material pada temperature  $T_r$  ( $1/^\circ\text{C}$ ),  $\rho_r$  adalah tahanan konduktor pentahanan pada temperatur  $T_r$  ( $\mu\Omega\text{cm}$ ),  $K_o$  adalah koefisien yang nilainya  $1/(\alpha_o)$  atau  $1/(\alpha_r) - T_r$  ( $^\circ\text{C}$ ),  $T_m$  adalah batas temperatur maksimum yang dapat ditahan material ( $^\circ\text{C}$ ),  $T_a$  adalah temperatur tanah disekitar lokasi ( $^\circ\text{C}$ ).

#### 2.4 Tegangan Sentuh dan Tegangan Langkah yang Diizinkan

Berdasarkan Standar IEEE 80-2000, nilai maksimum tegangan sentuh dan tegangan langkah dapat dihitung dengan Persamaan (3-6) [5].

Untuk berat badan 50 kg

$$E_{langkah50} = (1000 + 6C_s \cdot \rho_s) \frac{0.116}{\sqrt{t_s}} \quad (3)$$

$$E_{sentuh50} = (1000 + 1.5C_s \cdot \rho_s) \frac{0.116}{\sqrt{t_s}} \quad (4)$$

Untuk berat badan 70 kg

$$E_{langkah70} = (1000 + 6C_s \cdot \rho_s) \frac{0.157}{\sqrt{t_s}} \quad (5)$$

$$E_{sentuh70} = (1000 + 1.5C_s \cdot \rho_s) \frac{0.157}{\sqrt{t_s}} \quad (6)$$

$E_{langkah}$  adalah tegangan langkah (V),  $E_{sentuh}$  adalah tegangan sentuh (V),  $C_s$  adalah faktor *derating* permukaan tanah,

$$C_s = 1 - \frac{0,09(1 - \frac{\rho}{\rho_s})}{2h_s + 0,09} \quad (7)$$

$\rho_s$  adalah tahanan permukaan material ( $\Omega\text{m}$ ),  $t_s$  adalah durasi dari arus kejut dalam (s). Jika lapisan pelindung tidak digunakan, maka nilai  $C_s = 1$  dan  $\rho_s = \rho$ .

## 2.5 Penentuan Tahanan Grid

Sistem pentanahan yang baik akan menghasilkan tahanan tanah yang rendah untuk meminimalisir nilai *ground potential rise* (GPR). Nilai tahanan tanah untuk substasiun dan stasiun pembangkit biasanya bernilai 1  $\Omega$  atau kurang, sedangkan untuk substasiun jaringan distribusi rendah biasanya tahanan tanah bernilai 1 – 5  $\Omega$  tergantung pada keadaan sekitar [4]. Untuk menentukan nilai tahanan pentanahan digunakan Persamaan (8).

$$R_g = \rho \left[ \frac{1}{L_T} + \frac{1}{\sqrt{20A}} \left( 1 + \frac{1}{1 + h\sqrt{\frac{20}{A}}} \right) \right] \quad (8)$$

$R_g$  adalah tahanan pentanahan ( $\Omega$ ),  $\rho$  adalah tahanan jenis tanah ( $\Omega\text{m}$ ),  $L_T$  adalah panjang total konduktor yang di tanah (m),  $A$  adalah luas area pentanahan *grid* ( $\text{m}^2$ ),  $h$  adalah kedalaman penanaman konduktor *grid* (m).

## 2.6 Penentuan Arus Grid Maksimum

Arus *grid* maksimum merupakan arus terbesar yang mengalir pada *grid* pentanahan pada saat terjadi gangguan. Nilai arus *grid* maksimum dapat ditentukan dengan Persamaan 9.

$$I_G = D_f \cdot I_f \cdot S_f \quad (9)$$

$D_f$  adalah faktor pengurangan (*decrement factor*),  $I_f$  adalah arus hubung singkat (A),  $S_f$  adalah faktor pembagi (*division factor*).

## 2.7 Perhitungan Ground Potensial Rise (GPR)

*Ground Potential Rise* (GPR) adalah suatu tegangan maksimum yang dapat dicapai oleh suatu *grid* pentanahan yang dapat diperoleh dengan Persamaan (10) berikut.

$$\text{GPR} = R_G \cdot I_G \quad (10)$$

$R_G$  adalah resistansi *grid* pentanahan ( $\Omega$ ),  $I_G$  adalah arus *grid* maksimum (A).

### 3. METODE PENELITIAN

Agar dapat diperoleh rancangan sistem pentahanan yang baik, langkah-langkah yang perlu dilakukan adalah sebagai berikut:

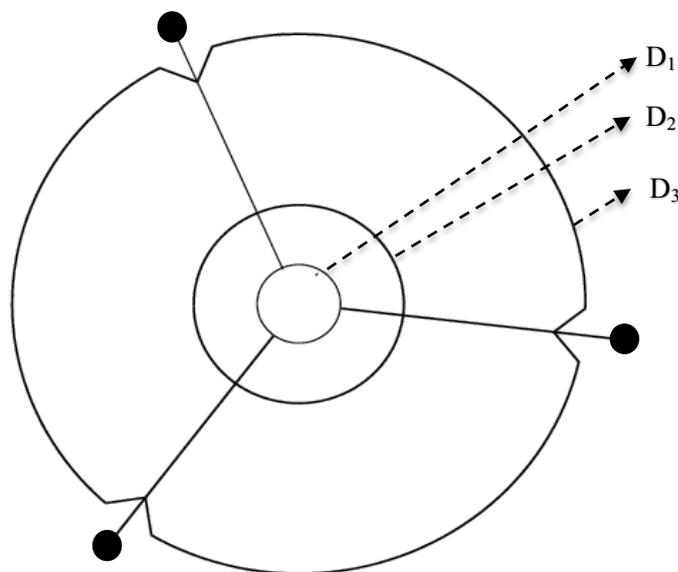
- 1) mengumpulkan data penunjang seperti *soil test resistivity*, model tanah pada rencana PLTB, area yang akan ditanahkan, arus hubung singkat sistem, dan durasi gangguan;
- 2) menentukan ukuran konduktor sistem pentahanan yang paling efisien untuk PLTB;
- 3) menentukan nilai tegangan sentuh ( $E_{sentuh}$ ) dan tegangan langkah ( $E_{langkah}$ ) yang dapat ditoleransi/diizinkan selama durasi gangguan;
- 4) membuat rancangan awal sistem pentahanan berupa konduktor yang mengelilingi area yang ditanahkan. Jarak konduktor dan lokasi *rod* (tembaga) pentahanan harus disesuaikan dengan besarnya arus hubung singkat ( $I_f$ );
- 5) menentukan nilai tahanan tanah ( $R_g$ );
- 6) menghitung arus gangguan ( $I_G$ ), yang menggambarkan kondisi gangguan terburuk yang dapat terjadi;
- 7) menghitung GPR dari rancangan awal, jika nilainya kurang dari tegangan sentuh yang diizinkan, maka tidak diperlukan analisis lebih lanjut;
- 8) menghitung tegangan *mesh* dan tegangan langkah pada *grid* dengan *software* ETAP, tegangan ini menggambarkan tegangan maksimum pada *grid*;
- 9) jika hasil perhitungan tegangan *mesh* kurang dari tegangan sentuh yang diperbolehkan, rancangan tersebut kemungkinan selesai. Bila perhitungan tegangan *mesh* lebih besar dari tegangan sentuh yang diperbolehkan, maka rancangan awal tersebut harus diperbaiki.
- 10) Jika tegangan sentuh dan tegangan langkah yang dihitung kurang dari tegangan yang diizinkan, rancangan tersebut dapat digunakan. Jika tidak, rancangan tersebut harus direvisi.
- 11) Jika tegangan *mesh* atau tegangan langkah lebih besar dari nilai yang diizinkan, rancangan *grid* perlu direvisi. Revisi rancangan dapat dilakukan dengan memperkecil jarak konduktor dan menambah *ground rod*.

12) Jika tegangan sentuh dan tegangan langkah kurang dari nilai yang diizinkan, maka rancangan sudah dapat diterima dan tidak perlu diperbaiki.

#### 4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Turbin pembangkit di Sidrap berkapasitas 2,5 MW dengan generator pembangkit 33 kV, model turbin yang digunakan dari Gamesa Iolica Corporation yang merupakan menara baja (tower) setinggi 80 m dengan panjang baling-baling (kincir) 57 m. Material untuk tulang tower sendiri dari *galvanised steel* yang diberi lembaran baja, yang berdiri di area berbentuk lingkaran dengan diameter tiang 5 m sehingga memiliki luas tanah pondasi  $A = 19,625 \text{ m}^2$ .

Konduktor sistem pentanahan memiliki diameter dan kedalaman penanaman yang berbeda-beda: 1) lingkaran terdalam ( $D_1$ ) memiliki diameter 4 m dengan kedalaman 0,1 m; 2) lingkaran kedua ( $D_2$ ) memiliki diameter 7 m dengan kedalaman 0,5 m; dan 3) lingkaran terluar ( $D_3$ ) memiliki diameter 24 m dengan kedalaman 1 m dari permukaan tanah. Jumlah batang pentanahan sebanyak 3 buah yang diletakkan di 3 titik seperti terlihat dalam Gambar 4.



Gambar 4 Rancangan Sistem Pentanahan 33 kV PLTB Sidrap

#### 4.1 Pemilihan Luas Penampang Konduktor Pentahanan

Sesuai dengan Persamaan (2), pemilihan konduktor ditentukan berdasarkan ukuran diameter konduktor dan jenis bahan konduktor yang akan digunakan sehingga akan didapat

$$A = 16,0 \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{3,42 \times 10^{-4}}{0,5 \times 0,00393 \times 1,72}\right) \ln \left(\frac{234 + 1083}{234 + 40}\right)}}$$

$$A = 40,14 \text{ mm}^2$$

Di pasaran tidak tersedia ukuran konduktor 40,14 mm<sup>2</sup> sehingga digunakan ukuran konduktor 50 mm<sup>2</sup>.

#### 4.2 Perhitungan Tegangan Sentuh dan Tegangan Langkah yang Diizinkan

Langkah ini dilakukan untuk mengetahui nilai batas aman sebelum pembangkit tersebut dibangun. Tegangan sentuh ( $E_{sentuh}$ ) dan tegangan langkah ( $E_{langkah}$ ) yang diizinkan dihitung dengan Persamaan (3) – (6), namun sebelumnya dihitung dulu nilai faktor *derating* ( $C_s$ ) dengan Persamaan (7).

$$C_s = 1 - \frac{0,09(1 - \frac{17,55}{10000})}{2 \times 0,15 + 0,09}$$

$$C_s = 0,7696$$

Lalu sesuai dengan Persamaan (3) – (6), akan didapat nilai batas tegangan sentuh dan tegangan langkah pada Tabel 1.

Tabel 1 Hasil Perhitungan Nilai Tegangan Sentuh dan Tegangan Langkah

Kriteria	Nilai Tegangan (V)
Kriteria $E_{sentuh50}$	2057,9
Kriteria $E_{langkah50}$	7739,5
Kriteria $E_{sentuh70}$	2785,2
Kriteria $E_{langkah70}$	10475,0

### 4.3 Perhitungan Resistansi Tanah

Berdasarkan standar IEEE 80-2000, nilai resistansi tanah harus dibawah 1  $\Omega$ . Perhitungan  $R_g$  sesuai dengan Persamaan (8). Untuk tahanan tanah lapis pertama,  $\rho_1 = 17,55 \Omega\text{m}$ .

$$R_g = 17,55 \left[ \frac{1}{30} + \frac{1}{\sqrt{20 \cdot 530,66}} \left( 1 + \frac{1}{1 + 0,5 \sqrt{\frac{20}{530,66}}} \right) \right]$$

$$R_g = 0,875 \Omega$$

Untuk tahanan tanah lapis kedua,  $\rho_2 = 35,5 \Omega\text{m}$

$$R_g = 35,5 \left[ \frac{1}{105} + \frac{1}{\sqrt{20 \cdot 530,66}} \left( 1 + \frac{1}{1 + 1 \sqrt{\frac{20}{530,66}}} \right) \right]$$

$$R_g = 0,95 \Omega$$

### 4.4 Perhitungan Arus Maksimum dan *Ground Potential Rise* (GPR)

Arus maksimum dihitung dengan Persamaan (9) sebagai berikut:

$$I_G = 0,6 \times 16.000 \times 1$$

$$I_G = 9600 \text{ A}$$

*Ground Potential Rise* (kenaikan tegangan tanah), yang merupakan tegangan maksimum yang mengalir pada *grid* saat terjadi gangguan dihitung dengan Persamaan (10). Untuk tahanan tanah lapis pertama,  $R_g = 0,87 \Omega\text{m}$ .

$$GPR = 0,87 \times 9600$$

$$GPR = 8352 \text{ V}$$

untuk tahanan tanah lapis kedua,  $R_g = 0,95 \Omega\text{m}$

$$GPR = 0,95 \times 9600$$

$$GPR = 9120 \text{ V}$$

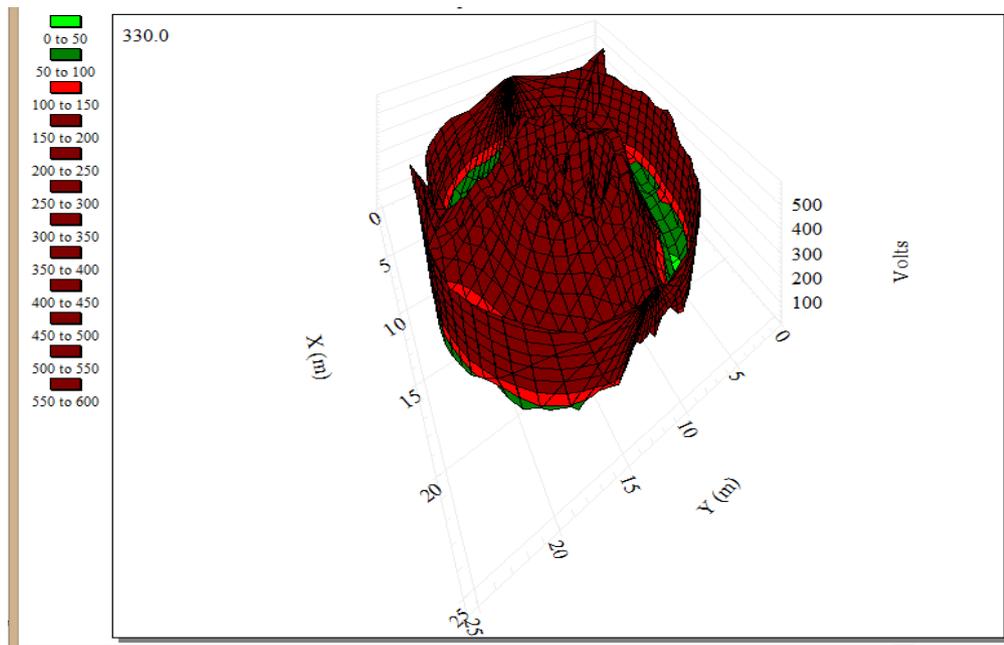
#### 4.5 Simulasi Rancangan Akhir Sistem Pentanahan dengan ETAP 16.0

Hasil perhitungan sistem pentanahan, yang telah memenuhi Standar IEEE 80-2000, dengan menggunakan ETAP diperlihatkan dalam Tabel 2. Tegangan sentuh aktual sebesar 2162,8 V dan tegangan langkah 726,2 V masih lebih kecil dari tegangan sentuh dan tegangan langkah yang diijinkan, selain itu tahanan pentanahan sebesar 0,8  $\Omega$  telah memenuhi standar yang berlaku.

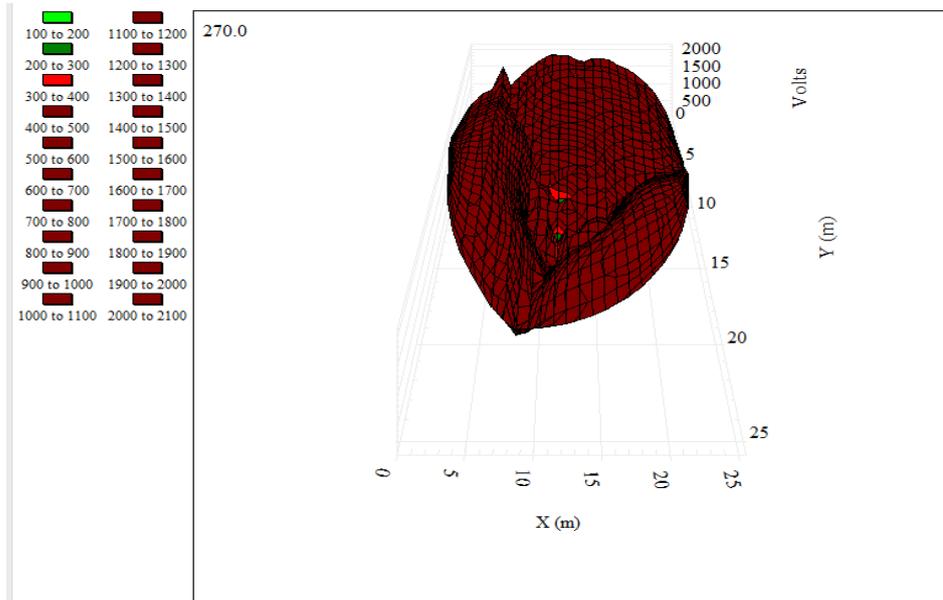
Tabel 2 Hasil Simulasi ETAP 16.0 dengan Metode FEM

$R_g$ ( $\Omega$ )	GPR (V)	$E_{sentuh}$ aktual (V)	$E_{langkah}$ (V)
0,8	7704,8	2162,8	726,2
Kriteria $E_{sentuh70}$ = 2785,2 V			
Kriteria $E_{langkah70}$ = 10475,0 V			

Profil tegangan langkah dan tegangan sentuh rancangan akhir sistem pentanahan PLTB Sidrap 33 kV menggunakan FEM diperlihatkan dalam Gambar 5 dan Gambar 6.



Gambar 5 Profil Tegangan Langkah Sistem Pentanahan



Gambar 6 Profil Tegangan Sentuh Sistem Pentanahan

Profil tegangan langkah dan tegangan sentuh tersebut menunjukkan nilai-nilai dari tegangan sentuh dan tegangan langkah pada sistem saat terjadi gangguan arus lebih pada sistem. Nilai tegangan langkah dan tegangan sentuh tersebut berbeda dari satu titik dengan titik lain di dalam area turbin yang diproteksi. Nilai maksimal tegangan pada titik tersebut merupakan hasil perhitungan dan masih berada di bawah nilai yang diizinkan sehingga rancangan sistem pentanahan PLTB dapat dipergunakan.

## 5. KESIMPULAN

Dari analisis dan evaluasi terhadap rancangan sistem pertanahan Pembangkit Listrik Tenaga Bayu Sidrap Sulawesi Selatan dapat diperoleh kesimpulan sebagai berikut:

1. Berdasarkan hasil perhitungan, ukuran luas penampang konduktor yang ditanam adalah sebesar  $40,14 \text{ mm}^2$ , akan tetapi karena di pasaran tidak terdapat konduktor dengan ukuran tersebut maka digunakan konduktor dengan luas penampang yang paling mendekati yaitu yang berukuran  $50 \text{ mm}^2$ .

2. Nilai tahanan tanah hasil perhitungan manual adalah  $0,87 \Omega$  dan  $0,95 \Omega$ , walaupun berbeda dengan hasil simulasi sebesar  $0,8 \Omega$  namun nilai ini masih sesuai dengan standar IEEE 80-2000 yang mensyaratkan nilai batas tahanan pentanahan ( $R_g$ ) suatu sistem pentanahan harus dibawah  $1 \Omega$ . Berdasarkan nilai tahanan pentanahan yang diperoleh dapat disimpulkan bahwa rancangan sistem pentanahan sudah baik sehingga dapat digunakan.
3. Untuk berat 70 kg, diperoleh nilai tegangan sentuh yang diizinkan sebesar 2785,28 V dan nilai tegangan langkah yang diizinkan sebesar 10475,04 V. Dengan merujuk nilai GPR yang lebih besar dari nilai tegangan sentuh, maka tegangan sentuh dan tegangan langkah sebenarnya perlu dihitung menggunakan simulasi ETAP 16.0. Dari hasil perhitungan ETAP diperoleh tegangan sentuh sebesar 2162,8 V dan tegangan langkah 726,2 V, dimana kedua nilai tersebut berada di bawah nilai tegangan sentuh dan tegangan langkah yang diizinkan, dengan demikian dapat disimpulkan bahwa rancangan sistem pentanahan sudah baik dan dapat digunakan.

#### DAFTAR PUSTAKA

- [1] Daman Suswanto. "Sistem Pentanahan Jaringan Distribusi", dalam *Sistem Distribusi Tenaga Listrik*, Edisi Pertama, Padang, 2009, hlm. 167-184.
- [2] Troels S. Sorensen. "The update of IEC 61400-24 Lightning Protection Of Wind Turbines." dalam *29th Int. Conf. on Lightning Protection*, Uppsala, Sweden, 2008.
- [3] U.U. Uma, L.O. Uzoечи, B.J. Robert. "Optimization Design Of Ground Grid Mesh Of 132/33KV Substation Using ETAP." *Nigerian Journal Of Technology*, Vol. 35, No. 4, hlm. 926-934, Oktober 2016.
- [4] PT Indokomas Buana Perkasa. "The Result of Soil Resistivity in The 150/33kV Sidrap Wind Farm Substation Area (New)". UPC Renewables Corp., Jakarta, Indonesia, Februari, 2018.
- [5] The Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc. "Guide for Safety in AC Substation Grounding." IEEE 80-2000. 30 Januari 2000.

- [6] T.S. Hutauruk. *Pengetanahan Netral Sistem Tenaga dan Pengetanahan Peralatan*. Jakarta: Erlangga, 1987, hlm. 158.