

## REVIEW METODE ELEMEN HINGGA UNTUK PENTANAHAN

**Inaya Retno Putri<sup>\*</sup>, Tarcisius Haryono, Eka Firmansyah**

Departemen Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada

Jl. Grafika No. 2, Yogyakarta 55281.

<sup>\*</sup>Email: inaya.stl14@mail.ugm.ac.id

### Abstrak

*Sistem pentanahan merupakan salah satu bagian dari sistem proteksi. Terdapat banyak permasalahan pada sistem pentanahan, antara lain perhitungan resistans pentanahan, disipasi panas pada sistem HVDC (High Voltage Direct Current), fenomena ionisasi dan karakteristik impuls dengan struktur tanah yang lengkap. Metode elemen hingga merupakan teknik simulasi numeris yang tepat digunakan untuk menganalisis masalah dalam sistem pentanahan. Ide dasar metode elemen hingga adalah membagi struktur atau daerah yang dianalisis menjadi jumlah yang sangat besar dari suatu elemen hingga (finite element). Dalam paper ini akan disampaikan review dari beberapa metode elemen hingga yang telah dikembangkan. Di bagian akhir dapat kami simpulkan bahwa metode elemen hingga merupakan teknik simulasi numeris yang baik digunakan untuk menganalisis sistem pentanahan.*

**Kata kunci:** metode elemen hingga, sistem pentanahan, sistem proteksi

## 1. PENDAHULUAN

Listrik merupakan energi sekunder yang sangat berpengaruh dalam kehidupan manusia. Selain bermanfaat bagi kehidupan manusia, tenaga listrik juga dapat membahayakan jika tidak memiliki instalasi dan pengamanan yang sesuai standar. Salah satu cara untuk menanggulangi bahaya dalam instalasi tenaga listrik yaitu menggunakan sistem pentanahan (*grounding system*). Sistem pentanahan merupakan salah satu elemen kunci dalam perlindungan keamanan manusia dan keamanan berbagai macam instalasi listrik (Ghoneim, Hirsch, Elmorshedy, et al. 2006) (Ghoneim, Hirsch & Elmorshedy 2006) (Gazzana et al. 2014) (Anggoro 2012) (Wu et al. 2014). Tujuan utama sistem pentanahan adalah memberikan bantuan deteksi cepat dan meminimalkan tegangan dan tekanan termal pada peralatan, memberikan keamanan dan mengurangi gangguan sistem (Somani et al. 2005).

Apabila terjadi gangguan hubung singkat, arus gangguan mengalir melalui peralatan-peralatan yang terbuat dari bahan metal dan mengalir juga ke tanah di sekitar lokasi gangguan, akibatnya timbul gradien tegangan antar peralatan dengan peralatan, peralatan dengan tanah, dan antara permukaan tanah itu sendiri. Besar gradien tegangan tergantung pada jenis tanah dan tahanan jenis tanah. Kinerja sistem pentanahan secara lengkap berhubungan dengan variabel yang mempengaruhinya. Sistem pentanahan dapat dinyatakan dengan parameter tanah (resistivitas dan permitivitas), geometri elektroda (panjang dan daerah yang termasuk), dasar stokastik dan alam yang tidak dapat diramalkan dari petir (jarak dan bentuk gelombang) dan kedalaman tanah yang merupakan parameter paling penting dalam proses disipasi arus listrik ke tanah (Dias et al. 2014).

Ada banyak metode yang digunakan untuk menganalisis desain atau kinerja sistem pentanahan. Salah satu metode yang digunakan adalah metode elemen hingga (*finite element method*). Selain itu, metode ini juga bisa digunakan untuk menghitung resistans pentanahan. Paper ini mereview penelitian-penelitian mengenai penyelesaian masalah pada sistem pentanahan (*grounding system*) menggunakan metode elemen hingga.

## 2. METODOLOGI

Pendekatan analitis dan teknik simulasi numeris telah dikembangkan untuk menganalisis desain sistem pentanahan (Clark et al. 2014). Salah satu teknik simulasi numeris yang digunakan adalah metode elemen hingga. Metode elemen hingga memungkinkan pemodelan yang efisien dengan lingkup tanah yang berbeda-beda. Maka dari itu, metode elemen hingga (*finite element method*) dapat digunakan untuk merepresentasikan sistem pentanahan dan menunjukkan perhitungan geometri yang lengkap dan pertimbangan tepat dari karakteristik bahan (Lourentzou, M.I, Kladas 1999).

Ide dasar metode elemen hingga adalah membagi struktur atau daerah yang dianalisa menjadi jumlah yang sangat besar dari suatu elemen hingga. Elemen adalah kumpulan titik (nodal) yang saling terhubung satu sama lain. Sedangkan kumpulan nodal dan elemen didefinisikan sebagai *mesh*. Pada dasarnya sistem dibagi menjadi  $n$  bagian konduktor terbatas dan mengasumsikan bahwa arus di setiap bagian distribusi sepanjang *finite element* seragam (Coo 2006). Metode FEM untuk analisis pentanahan dapat dibagi menjadi :

1. Analisis untuk perhitungan resistans pentanahan (Hong et al. 2009)(Katsanou et al. 2009)
2. Analisis disipasi panas sistem HVDC (Georges & Mikhael 2014)
3. Analisis sistem pentanahan dengan fenomena ionisasi di sekitar pentanahan (Li et al. 2010) (Habjanic & Trlep 2006)
4. Analisis karakteristik impuls dalam sistem pentanahan dengan struktur tanah yang lengkap (Sima et al. 2015)

## 2.1 Model Matematika

Ada dua pendekatan dasar dalam menganalisis dan menghitung sistem pentanahan : Pendekatan integral dan pendekatan diferensial. Perhitungan potensial listrik dengan menggunakan persamaan integral untuk arus kawat, perhitungan relatif cepat dan berdiri sendiri sebagai konfigurasi sistem pentanahan. Sedangkan pendekatan diferensial sangat mudah digunakan untuk tanah heterogen dalam domain perhitungan (Trlep et al. 2000).

1. Model matematika yang digunakan untuk menghitung resistans pentanahan menggunakan satu dari dua metode perhitungan :
  - Analisis Aliran Arus  
Untuk geometri yang berubah-ubah, resistans antara dua elektrode dapat dihitung dari tegangan  $V$  dan disipasi daya  $P$  di tanah:

$$R = \frac{V^2}{P} \quad (1)$$

dengan disipasi tenaga  $P$  ditentukan oleh :

$$P = \int_v E \cdot J dV = \int_v \sigma E^2 dV \quad (2)$$

dengan :

$J$  : Kerapatan arus

$\sigma$  : Konduktivitas listrik

2. Model matematika menggunakan persamaan Poisson untuk bidang arus pada tanah anisotropic dengan potensial listrik skalar  $\varphi$

$$\nabla([\sigma]\nabla\varphi) = 0 \quad (3)$$

3. Model matematika untuk geometri elektroda dan tanah heterogen merepresentasikan sistem pentanahan dengan dua teknik(Lourentzou, M.I, Kladas 1999):
  - *Thin wire approximation*
  - Metode elemen hingga dengan persamaan laplace

$$-\nabla(\sigma\nabla\varphi) = 0 \quad (4)$$

4. Dalam pendekatan teknik, masalah bidang elektromagnetik dalam domain frekuensi dengan melihat parameter konduktivitas, permitivitas dan permeabilitas, dapat diselesaikan dengan persamaan Maxwell (Alipio et al. 2012) :

$$\nabla \times \vec{H} = \sigma \vec{E} + j\omega \epsilon \vec{E} \quad (5)$$

5. Model matematika untuk fenomena ionisasi tanah, gradien tegangan  $E$  dengan persamaan (Li et al. 2010):

$$E = \rho \cdot J \quad (6)$$

Ketika  $E$  melampaui gradien ionisasi  $E_c$ , *breakdown* akan terjadi.

## 2.2 Model Transien pada Sistem Pentanahan

Analisis transien pada sistem pentanahan dapat diklasifikasikan menjadi (Saraj & Vujevi 2009):

1. Model rangkaian listrik (*electric circuit model*)
2. Model saluran transmisi (*transmission line model*)
3. Model elektromagnetik (*electromagnetic model*)
4. Model hybrid (*hybrid model*)

Model rangkaian listrik (Otero 1999)(Geri 1999)(Wang et al. 2005) berhubungan dengan sebuah analogi teori rangkaian, pertama dikembangkan pendekatan rangkaian berdasarkan model *treated* parameter bagian jaringan pentanahan sebagai frekuensi sendiri dan pengembangan berikutnya termasuk frekuensi ketergantungan dari bagian sendiri dan induktans bersama, kapasitans, konduktans dan resistans sendiri (Saraj & Vujevi 2009).

Model *transmission line* (Liu et al. 2001)(Liu et al. 2005) berdasarkan pendekatan *transmission line* dari jaringan pentanahan dan dapat dicoba sebaik model rangkaian. Beberapa dari model tersebut cocok dalam domain waktu, ketika yang lain dapat menyelesaikan domain frekuensi. Pada model ini komputasi sangat efisien dan relatif mudah merumuskan(Saraj & Vujevi 2009).

Model elektromagnetik (Grcev 1996)(Grcev & Heimbach 1997) dikatakan paling akurat dan dengan paling sedikit asumsi, formulasi masalah dipecahkan dengan diferensial, integral dan metode diferensial integral (Saraj & Vujevi 2009).

Model hybrid (Zhang et al. 2005)(Visacro & Soares 2005) timbul sebagai sebuah sinergi dari pendekatan rangkaian dan pendekatan teori elektromagnetik yang digambarkan dengan berbagai kombinasi yang memungkinkan (Saraj & Vujevi 2009).

## 3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Penelitian metode elemen hingga untuk pentanahan diaplikasikan untuk perhitungan resistans pentanahan, analisis disipasi panas pada sistem HVDC, fenomena ionisasi serta karakteristik impuls dengan hasil sebagai berikut :

- 1) Metode elemen hingga untuk perhitungan resistans pentanahan

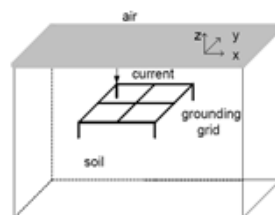
Model 3D metode elemen hingga telah digunakan untuk menghitung resistans pentanahan dan profil potensial jaringan pentanahan yang berbeda(Hong et al. 2009)(Katsanou et al. 2009). Pada penelitian ini, simulasi menawarkan sebuah fleksibilitas yang bagus dalam menghitung sebuah sistem pentanahan rumit tanpa asumsi yang mudah.

- 2) Metode elemen hingga untuk analisis disipasi panas pada sistem HVDC

Metode elemen hingga menggambarkan implementasi pada software untuk mensimulasi dan menganalisis kasus elektroda HVDC yang ditanam di tanah dan distribusi suhu di sekitar penanaman elektroda HVDC telah dihitung menggunakan metode elemen hingga(Georges & Mikhael 2014).

- 3) Metode elemen hingga untuk fenomena ionisasi

Metode elemen hingga telah digunakan untuk menganalisis karakteristik tanah yang beragam dan fenomena ionisasi di sekitar tanah (Li et al. 2010)(Habjanic & Trlep 2006). Fenomena ionisasi tidak mudah terjadi di area dengan resistivitas tanah yang rendah(Wang & Jin 2011).

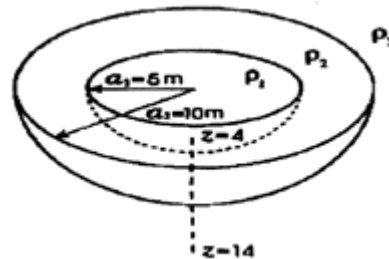


**Gambar 1. Gambaran Jaringan Pentanahan** (Wang & Jin 2011)

#### 4) Metode elemen hingga untuk karakteristik impuls

Berdasarkan persamaan Maxwell, metode elemen hingga digunakan untuk menghitung karakteristik impuls sistem pentanahan dalam struktur tanah yang lengkap. Hasil simulasi menunjukkan bahwa arus dari konduktor eksternal jaringan pentanahan lebih tinggi dari pada arus konduktor internal (Sima et al. 2015).

*Finite element* (elemen hingga) telah diaplikasikan untuk model sistem pentanahan yang terdiri dari batang vertikal pada lapisan tanah (Lourentzou, M.I, Kladas 1999). Model terdiri dari 3 bagian resistivitas tanah berturut-turut  $\rho_1 = 50 \Omega\text{m}$ ,  $\rho_2 = 400 \Omega\text{m}$ ,  $\rho_3 = 1000 \Omega\text{m}$ . Batang vertikal dengan panjang 10m dan diameternya 5 cm dan ditempatkan pada kedalaman mulai dari  $z = 4$  m hingga  $z = 14$  m seperti ditunjukkan pada gambar 2.



**Gambar 2. Geometri dari pertimbangan sistem pentanahan** (Lourentzou, M.I, Kladas 1999)

#### 4. KESIMPULAN

*Paper* ini mereview metode elemen hingga (*finite element*) untuk sistem pentanahan. Metode elemen hingga merupakan teknik simulasi numeris yang baik digunakan untuk pemodelan yang efisien suatu geometri elektroda dan lingkup tanah yang berbeda-beda. Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan, metode elemen hingga digunakan untuk berbagai analisis pentanahan, yaitu analisis untuk perhitungan resistans pentanahan (Hong et al. 2009)(Katsanou et al. 2009), analisis disipasi panas pada sistem HVDC (Georges & Mikhael 2014), analisis sistem pentanahan dengan fenomena ionisasi di sekitar pentanahan (Li et al. 2010) (Habjanic & Trlep 2006), analisis karakteristik impuls dalam sistem pentanahan dengan struktur tanah yang lengkap (Sima et al. 2015). Metode elemen hingga dapat mendekati struktur nyata tanah, sebagaimana bentuk sebenarnya dari zona ionisasi serta lebih baik dari metode analitis lainnya (Habjanic & Trlep 2006). Metode elemen hingga telah digunakan sebagai metode numeris terbaik untuk menghitung sistem pentanahan (M & J 2012). Selain itu, metode elemen hingga dapat menjadi peralatan efisien untuk menganalisis *meshes ground* dan juga memodelkan semua jenis sistem pentanahan, tanpa membatasi karakteristik sistem pentanahan, tidak seperti model komputasi lain yang hanya berdasarkan metode analitis (Cardoso 1994).

#### DAFTAR PUSTAKA

- Alipio, R.S. et al., 2012. Electric fields of grounding electrodes with frequency dependent soil parameters. *Electric Power Systems Research*, 83(1), pp.220–226.
- Anggoro, B., 2012. The concept of grounding impedance diagnostics method. , (September), pp.1013–1017.
- Cardoso, J.R., 1994. FEM Modelling of Grounded Systems with Unbounded Approach. , 30(5), pp.2893–2896.
- Clark, D. et al., 2014. Controlled Large-Scale Tests of Practical Grounding Electrodes — Part II: Comparison of Analytical and Numerical Predictions With Experimental Results. , 29(3), pp.1240–1248.
- Coa, L.M., 2006. Comparative Study between IEEE Std. 80-2000 and Finite Elements Method Application for Grounding Systems Analysis. , pp.1–5.
- Dias, G., Gazzana, D.S. & Bretas, A.S., 2014. The Need for Standardization of Human Tolerability Levels for Lightning Currents and Voltages. , pp.1804–1808.

- Gazzana, D.S. et al., 2014. A study of human safety against lightning considering the grounding system and the evaluation of the associated parameters. *Electric Power Systems Research*, 113, pp.88–94.
- Georges, S. & Mikhael, Z., 2014. Modelling and Simulation of Heat Dissipation due to HVDC Ground Electrodes Using the Finite Element Method. , (4), pp.476–480.
- Geri, A., 1999. Behaviour of Grounding Systems Excited by High Impulse Currents: the Model and Its Validation. , 14(3), pp.1008–1017.
- Ghoneim, S., Hirsch, H., Elmorshedy, A., et al., 2006. Surface Potential Calculation for Grounding Grids. , pp.501–505.
- Ghoneim, S., Hirsch, H. & Elmorshedy, A., 2006. Effect of Profile Location on Step and Touch Voltages of Grounding Grids. , pp.228–233.
- Grcev, D., 1996. Computer Analysis of Transient Voltages in Large Grounding Systems. , 11(2), pp.815–823.
- Grcev, L.D. & Heimbach, M., 1997. Frequency Dependent and Transient Characteristics of Substation Grounding Systems. , 12(1), pp.172–178.
- Habjanic, A. & Trlep, M., 2006. The Simulation of the Soil Ionization Phenomenon Around the Grounding System by the Finite Element Method. , 42(4), pp.867–870.
- Hong, T.P., Van, Q. Do & Viet, T.V., 2009. Grounding Resistance Calculation Using FEM and Reduced Scale Model. , pp.278–281.
- Katsanou, V.N., Papagiannis, G.K. & Ieee, M., 2009. Substation grounding system resistance calculations using a FEM approach. , 486, pp.1–6.
- Li, J. et al., 2010. Finite Element Modeling of the Grounding System in Consideration of Soil Nonlinear Characteristic. , pp.164–167.
- Liu, Y., Theethayi, N. & Thottappillil, R., 2005. An Engineering Model for Transient Analysis of Grounding System Under Lightning Strikes: Nonuniform Transmission-Line Approach., 20(2), pp.722–730.
- Liu, Y., Zitnik, M. & Thottappillil, R., 2001. An Improved Transmission-Line Model of Grounding System. , 43(3), pp.348–355.
- Lourentzou, M.I, Kladas, A.G., 1999. Finite Element Modelling of Grounding Systems Considering Electrode Geometry Effects., 35(3), pp.5–8.
- M, B. & J, S., 2012. Effect of Increasing the Grounding Grid Resistance of a Ground System at a Substation on the Safety and Transient Overvoltage on the Interior Equipments. , pp.1–6.
- Otero, A., 1999. Frequency Dependent Grounding System Calculation by Means of a Conventional Nodal Analysis Technique., 14(3), pp.873–878.
- Saraj, P. & Vujevi, S., 2009. A Review of Methods for Grounding Grid Analysis. , pp.1–8.
- Sima, W. et al., 2015. Finite Element Model of Grounding Electrode Impulse Characteristics in Complex Soil Structure Based on Geometric Coordinate Transformation.
- Somani, A. et al., 2005. Evaluation Of Grounding And Protection Methods For A Shipboard Power System., pp.117–124.
- Trlep, M., Hamler, A. & Hribernik, B., 2000. The Analysis of Complex Grounding Systems by FEM. , 34(5), pp.2521–2524.
- Visacro, S. & Soares, A., 2005. HEM: A Model for Simulation of Lightning-Related Engineering Problems. , 20(2), pp.1206–1208.
- Wang, F.H. & Jin, Z.J., 2011. The FEM Analysis of Grounding System When Considering the Soil Ionization Phenomenon under Different Soil Structures. , pp.1–4.
- Wang, J. et al., 2005. Extension of Dynamic Model of Impulse Behavior of Concentrated Grounds at High Currents. , 20(3), pp.2160–2165.
- Wu, J. et al., 2014. Optimal design of tower footing device with combined vertical and horizontal grounding electrodes under lightning. *Electric Power Systems Research*, 113, pp.188–195.
- Zhang, B. et al., 2005. Numerical Analysis of Transient Performance of Grounding Systems Considering Soil Ionization by Coupling Moment Method With Circuit Theory., 41(5), pp.1440–1443.