

'Phantom Virtual' Tomografi Elektrik Berbasis Konsep Rangkaian Resistor - II

¹Amanatulhay Pribadi & ²A.D. Garnadi & ³S. Nurdianti

¹Department of Electrical Engineering, Institut Teknologi Bandung, Bandung, Indonesia

²Department of Mathematics, Institut Pertanian Bogor, Bogor, Indonesia

³Department of Mathematics, Institut Pertanian Bogor, Bogor, Indonesia

¹amanatulhay.pribadi@gmail.com, ²agah.garnadi@gmail.com, ³s.nurdianti@gmail.com

Abstrak

Phantoms are essentially required to generate boundary data for studying the inverse solver performance in electrical impedance tomography (EIT). A resistive-based boundary data simulator (BDS) is developed to generate accurate boundary data using neighbouring current pattern for assessing the EIT inverse solvers. Domain diameter, inhomogeneity number, inhomogeneity geometry (shape, size, and position), background conductivity, and inhomogeneity conductivity are all set as BDS input variables. Different sets of boundary data are generated by changing the input variables of the BDS, and resistivity images are reconstructed using electrical impedance tomography and diffuse optical tomography reconstruction software (EIDORS).

Kata Kunci: EIT, BDS, EIDORS.

1 Pendahuluan

Untuk mempelajari *electrical impedance tomography* (EIT) dibutuhkan phantom sebagai pemodelan inverse untuk membangkitkan data. Apabila EIT bekerja dengan mengukur data tegangan pada *boundary* lalu menggunakannya untuk merekonstruksi distribusi konduktivitas objek, maka sebaliknya pada phantom yaitu objek sudah dimodelkan dan akan dibandingkan bagaimana data tegangan yang dihasilkan pada *boundary*. Simulasi dengan menggunakan phantom nyata memiliki kekurangan, misalkan data *error* dan tidak stabil di mana impedansi phantom dapat dipengaruhi oleh kondisi lingkungan. Oleh karena itu, dirancang sebuah virtual network model yang lebih stabil dan konsisten menggunakan rangkaian listrik 2D.

Boundary data simulator (BDS) yang berbasis resistivitas dikembangkan untuk menghasilkan *boundary data* yang akurat tanpa adanya *error* yang dihasilkan instrumen. Dengan begitu, dapat lebih mudah untuk menghasilkan tegangan dengan berbagai variasi konduktivitas, inhomogenitas, dan geometri. Pada kenyataannya, sebuah objek EIT, misalkan bagian tubuh pasien, memiliki distribusi nilai konduktivitas yang kontinu. Namun, simulasi secara virtual dapat didekati dengan pemodelan diskrit sehingga pembuatan model phantom ini dapat menggunakan susunan resistor diskrit

dengan jumlah yang terbatas atau *finite* dengan konfigurasi yang diinginkan.

Gagnon dkk (2010) [2] dan Hahn dkk (2008) [3] secara independen menggunakan rangkaian resistor untuk digunakan sebagai phantom. Krammer dkk (2015) [5], menambahkan variable resistor pada sejumlah komponennya, sehingga bisa menirukan perubahan karakteristik bahan di posisi tertentu. Hussain dkk, (1989) menyusun simulator phantom yang disusun bangun dari polygon beraturan, sekaligus menggunakannya untuk rekonstruksi citranya. Sementara Daniels (1996), mempergunakan HSPICE untuk simulasi object benda dimana penghampiran menggunakan susunan rangkaian resistor serupa kubus. Penyusunan phantom resistor fisik, antara lain digunakan untuk kalibrasi perangkat EIT. Pada paper ini, *resistive-based* BDS dikembangkan dengan menggunakan Multisim 11.0.

2 Model Phantom Model

2.1 Model Kontinum dan Diskretisasi Metode Finite Element

Jun Gu dalam papernya [6] memodelkan *Electrical Resistance Tomography* (ERT) sebagai model resistor diskrit dengan menggunakan metode FE (*finite element*). Persamaan yang mengatur medan arus pada sensor ERT secara umum adalah persamaan Poisson:

$$\nabla \cdot [\sigma(x, y) \nabla \phi(x, y)] = 0 \quad (1a)$$

di mana, $\sigma(x, y)$ adalah konduktivitas dua dimensi dan $\phi(x, y)$ adalah distribusi potensial elektrik. Kondisi batas diberikan sebagai berikut (1b-1d),

$$\int_{\Gamma_1} \sigma \frac{\partial \phi}{\partial n} ds = I, \int_{\Gamma_2} \sigma \frac{\partial \phi}{\partial n} ds = -I, \quad (1b)$$

$$\phi|_{\Gamma_l} = \text{const.} (l = 1, 2, \dots, N), \quad (1c)$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial n} \Big|_{\Pi} = 0 \quad (1d)$$

di mana, Γ_1 dan Γ_2 , adalah domain-domain elektroda untuk injeksi arus, Γ_1 adalah domain-domain elektroda untuk pengukuran tegangan, Π merepresentasikan domain-domain lain pada batas eksternal sensor. Finite element model yang sesuai dengan persamaan (1) adalah

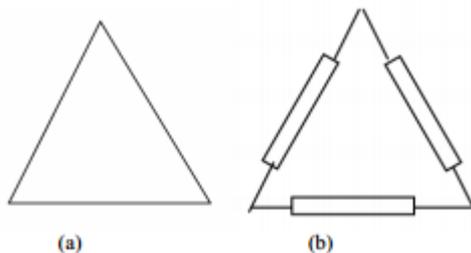
$$K^0 \phi = B \quad (2)$$

di mana K^0 adalah matriks koefisien, ϕ adalah potensial elektrik pada seluruh node dan B meliputi kondisi batas.

Entri untuk K^0 dapat dinyatakan sebagai

$$K_{i,j}^0 = \sum_{e \in E^0} K_{i,j}^e \quad (3)$$

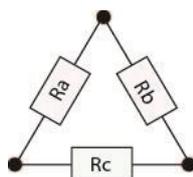
di mana $K_{i,j}^0$ adalah konduktansi antara node i dan node j untuk element e, yang mana merupakan fungsi dari konduktivitas elemen dan geometri elemen dan E^0 adalah set elemen.



Gambar1(a) elemen triangular pada FEM; (b) equivalent resistor network untuk elemen pada (a)

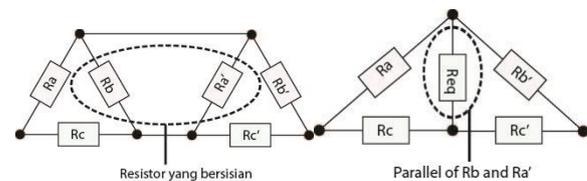
Untuk elemen-elemen triangular, dengan menganalisis entri pada (3), dapat disimpulkan bahwa resistor network yang ekuivalen untuk elemen adalah dengan tiga resistor seperti yang ditunjukkan Gambar 1. Nilai resistor dapat diturunkan dari persamaan (3).

2.2 Virtual Discrete Phantom



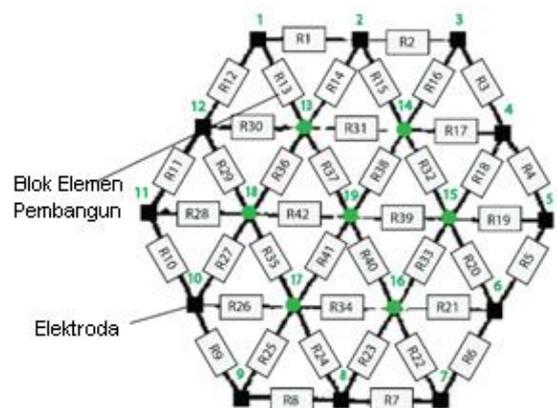
Gambar2segitiga resistive building block

Gambar 2 mengilustrasikan segitiga *building block* sebagai elemen dasar pembangun poligon resistor. *Building block* resistor disusun oleh tiga resistor yaitu Ra, Rb dan Rc. Untuk mendapatkan rangkaian poligon diperlukan proses *assembly* beberapa *building block*. Dirangkai resistor elemen segitiga yang bersisian secara paralel untuk membentuk resistor poligon seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 3 di bawah ini. Gambar kiri memperlihatkan dua segitiga *building block* di mana terdapat dua resistor yang bersisian. Keduanya dapat diparalelkan menjadi satu resistor ekuivalen seperti gambar kanan.



Gambar3proses assembly dua building block memanfaatkan aturan penjumlahan dua resistor paralel

Proses *assembly building block* satu demi satu melalui proses di atas dilakukan sehingga akan diperoleh poligon resistor sebagai phantom. Perhatikan bahwa proses penjumlahan paralel hanya berlaku untuk dua *building block* yang bersisian, sementara resistor tepi bukan merupakan resistor ekuivalen yang dihasilkan dari penjumlahan paralel dua resistor yang berasal dari *building block* pembangun.



Gambar4 skematik rangkaian resistor poligon sebagai Phantom yang digunakan pada percobaan

Gambar 4 mengilustrasikan skematik rangkaian Phantom yang digunakan pada percobaan. Rangkaian secara keseluruhan merupakan heksagonal beraturan yang dibentuk oleh 24 segitiga sama sisi dengan jumlah node pada tepi adalah 12. Total resistor yang digunakan adalah 42 buah yang terletak pada sisi-sisi segitiga

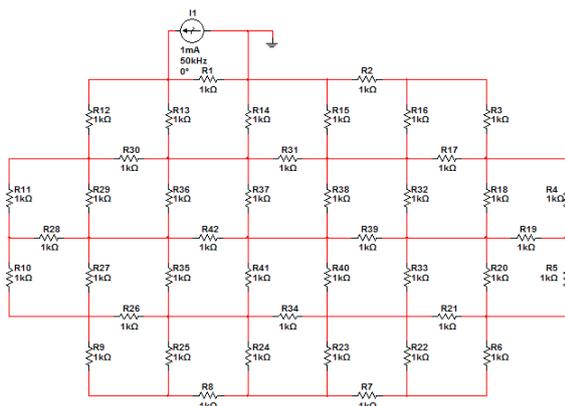
dengan besar hambatan yang dapat diubah-ubah. Node pada rangkaian berjumlah 19 terdapat pada titik-titik sudut segitiga.

Arus injeksi dialirkan pada rangkaian dengan menghubungkan positif dan negatif sumber arus pada pasangan dua node tepi yang bersebelahan. Dua belas elektroda diposisikan pada seluruh node tepi. Pada elektroda itu pula lah dilakukan pengukuran tegangan. Adanya impedansi pada tiap cabang rangkaian menyebabkan nilai tegangan yang berbeda. Data beda potensial masing-masing resistor ini didapatkan dengan melakukan simulasi pada Multisim 11.0. Penomoran resistor dan node dilakukan secara berurutan searah jarum jam dari luar hingga ke dalam, dimulai dari node dan resistor pada sisi heksagonal atas paling kiri sebagai node satu serta resistor satu dan seterusnya.

2.3 A Resistive-Based Boundary Data Simulator

Pada penelitian ini, *boundary data simulator* dirancang pada Multisim 11.0, yaitu sebuah perangkat lunak untuk mendesain rangkaian listrik dan melakukan simulasi rangkaian tersebut. Dengan adanya Multisim, virtual phantom 2D dapat dibangun dengan menggambarkan elemen rangkaian yang mudah divariasikan dan hasil simulasi yang stabil.

Multisim-based BDS ini terdiri dari 3 elemen utama: rangkaian resistor sebagai virtual phantom, sumber arus dengan sepasang node sebagai posisi injeksi arus, dan voltmeter sebagai pengukur tegangan pada elektroda tepi.



Gambar 5 Implementasi pada Multisim dari rangkaian poligon Gambar 4

Rangkaian virtual discrete phantom ditunjukkan oleh gambar di atas, yang merupakan implementasi Multisim dari rangkaian Phantom pada Gambar 4. Terlihat seluruh resistor yang menyusun rangkaian Phantom masing-masing bernilai sama yaitu 1 kΩ sebagai model

objek yang homogen. Nilai ini akan diubah pada simulasi rangkaian non homogen yaitu bernilai 22 kΩ untuk pengganti benda.

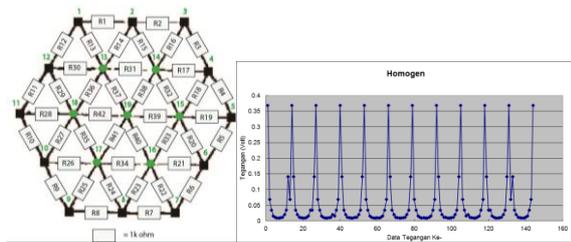
Arus listrik yang diberikan kepada rangkaian sebesar 1 mA berasal dari sumber arus AC. Sumber arus tersebut diatur berfrekuensi 50 kHz dan dipasangkan pada resistor yang menghubungkan dua node tepi *adjacent*. Negatif sumber arus dihubungkan pula pada *ground* sehingga memiliki tegangan 0 Volt. Pola arus divariasikan dengan mengubah letak injeksi pada sekeliling tepi secara berurutan. Pasangan node yang dipasangkan sumber arus bergantian secara berurutan dimulai dari node 1-2, 2-3, dan seterusnya hingga node 12-1.

Elemen utama yang terakhir dari Multisim-based BDS adalah voltmeter sebagai pembaca data beda potensial. Beda potensial ini terukur dengan menghubungkan dua node masing-masing resistor tepi (1 hingga 12) dengan voltmeter. Dua belas nilai ini dikumpulkan untuk masing-masing pola arus dan besar resistor.

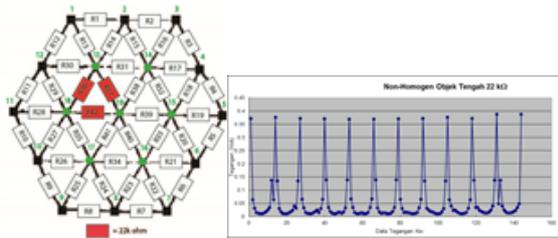
BDS berbasis rangkaian resistor dikembangkan untuk merangkai virtual discrete phantom dengan jumlah elemen yang terbatas dan input elemen yang variatif. Posisi dan besar resistansi dapat diubah dengan mudah untuk menyesuaikan homogenitas dan inhomogenitas objek yang diinginkan. Begitu pula pola arus dapat diubah untuk setiap iterasi simulasi. Data beda potensial yang dihasilkan oleh BDS akan dikumpulkan dan direkonstruksi oleh EIDORS.

2.4 Hasil dan Pembahasan

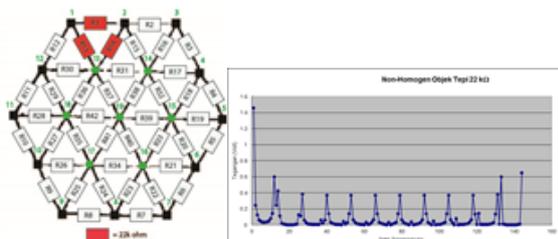
Pengujian *resistive-based* BDS dilakukan dengan menyimulasikan tiga macam model rangkaian yaitu rangkaian homogen dengan nilai resistansi 1 kΩ, rangkaian non homogen dengan objek di tengah rangkaian berresistansi 22 kΩ, dan rangkaian non homogen dengan objek di tepi yang berresistansi 22 kΩ. Rangkaian disimulasikan dengan 12 variasi pola sumber arus di mana masing-masing pola terdapat 12 data pengukuran. Oleh karena itu masing-masing rangkaian menghasilkan 144 data beda potensial secara berurutan dari pola satu hingga dua belas serta dari beda potensial resistor satu hingga beda potensial resistor dua belas yang membentuk grafik di bawah ini. Data hasil simulasi diilustrasikan dengan menggunakan grafik garis.



Gambar6 ilustrasi(kiri) dan hasil simulasi (kanan) rangkaian homogen



Gambar7 ilustrasi (kiri) dan hasil simulasi (kanan) rangkaian non-homogen objek tengah



Gambar8 ilustrasi (kiri) dan hasil simulasi (kanan) rangkaian non-homogen objek tepi

Ketiga gambar di atas menunjukkan bahwa *boundary data* yang dihasilkan umumnya memiliki puncak beda potensial pada resistor di sekitar titik injeksi arus. Karena jumlah iterasi yang dilakukan adalah 12 pola arus, maka untuk setiap rangkaian akan ditemui 12 puncak grafik. Rangkaian dengan inhomogenitas menunjukkan pola grafik yang berbeda dari grafik homogen saat resistor yang berbeda berada pada tepi objek. Dari perbedaan ini dapat kita ketahui bahwa BDS lebih dapat mengenal adanya inhomogenitas di sekitar tepi dibandingkan pada sekitar pusat objek.

Melalui hasil pengujian Multisim-based *boundary data simulator* dapat diketahui bahwa BDS ini mampu menghasilkan *boundary potential data* dari konfigurasi 2D *virtual discrete phantom* dengan praktis dan akurat tanpa adanya *noise* akibat lingkungan. Variabel input yang mudah untuk diubah serta singkatnya waktu simulasi termasuk beberapa poin tambah dari Multisim-based BDS. Salah satu hal penting yang perlu diperhatikan adalah resolusi atau jumlah elemen *phantom* karena semakin besar jumlah elemen *phantom* semakin tinggi pula akurasi dari BDS.

3 Kesimpulan

Sebuah *resistive-based boundary data simulator* dapat digunakan untuk pembangkitan data untuk menguji pemecahan *inverse problem* pada EIT 2D. BDS dapat digunakan dengan mengatur posisi dan besar resistorphantom sesuai konfigurasi objek yang diinginkan. Injeksi arus menggunakan pola *neighbouring* secara berurutan. Dari hasil percobaan dapat disimpulkan bahwa *resistive-based* BDS berhasil mensimulasikan phantom EIT dan membangkitkan *boundary data* untuk setiap variasi non-homogenitas objek.

4 Ucapan Terima Kasih

Penelitian ini didanai hibah penelitian PUPT-IPB dengan kontrak no 083/SP2H/PL/Dit.Litabmas/II/2015.

5 Daftar Pustaka

- [1] Daniels, A. R., R. G. Green, and I. Basarab-Horwath. (1996): "Modelling of three-dimensional resistive discontinuities using HSPICE." *Measurement Science and Technology* 7.3 338.
- [2] Gagnon, H., Cousineau, M., Adler, A., & Hartinger, A. E. (2010). A resistive mesh phantom for assessing the performance of EIT systems. *Biomedical Engineering, IEEE Transactions on*, 57(9), 2257-2266.
- [3] Hahn, G., A. Just, J. Dittmar, and G. Hellige. (2008) "Systematic errors of EIT systems determined by easily-scalable resistive phantoms." *Physiological measurement* 29, no. 6: S163.
- [4] M.A. Hussain, B. Noble, B. Becker, (1989) *Computer Simulation of an Inverse Problem for Electric Current Computed Tomography using a Uniform Triangular Discretization*, Engineering in Medicine and Biology Society, 1989. *Images of the Twenty-First Century., Proceedings of the Annual International Conference of the IEEE Engineering in*. IEEE, 1989.
- [5] Péter Krammer, Andreas D. Waldmann, Michel Zogg, Péter L. Róka¹, Josef X. Brunner and Stephan H. Bohm, (2015), *Electrical impedance tomography simulator*, *Proceedings EIT2015*, p40.
- [6] Jun Gu, W Yin, Yannian Rui, Chao Wang, and Huaxiang Wang, "A New Resistor Network Based Forward Model for Electrical Impedance Tomography Sensors," *International Instrumentation and Measurement Technology Conference*, Singapore, 5-7 May 2009.

Seminar Nasional Instrumentasi, Kontrol dan Otomasi (SNIKO) 2015
Bandung, Indonesia, 10-11 Desember 2015